



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TUDENGIVORMELI FEST21 ELEKTRISÜSTEEMI ELEKTROMAGNETILISE ÜHILDUVUSE UURIMINE

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF FEST21 FORMULA STUDENT ELECTRIC SYSTEM

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Karl Martin Meras

Üliõpilaskood: 179774 EAAB

Juhendaja: Tanel Jalakas, Vanemteadur

Kaasjuhendaja: Marek Jarkovoi, Insener

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

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.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Karl Martin Meras (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Tudengivormeli FEST21 elektrisüsteemi elektromagnetilise ühilduvuse uurimine,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Tanel Jalakas ja kaasjuhendaja Marek Jarkovoi,

(juhendaja nimi)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2022 (*kuupäev*)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

<i>Autor:</i> Karl Martin Meras	<i>Lõputöö liik:</i> Bakalaureusetöö
<i>Töö pealkiri:</i> Tudengivormeli FEST21 elektisüsteemi elektromagnetilise ühilduvuse uurimine	
<i>Kuupäev:</i> 18.05.2022	<i>67 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)</i>
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> Vanemteadur Tanel Jalakas ja Insener Marek Jarkovoi	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i>	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Lõputööl on kolm eesmärki. Esmalt koguda ning talletada infot elektromagnetilise ühilduvuse kohta, suurendades seeläbi tudengivormeli meeskonna tiimi sisest teadlikkust elektromagnetilisest ühilduvusest ja võimalikest seonduvatest tehnilistest probleemidest. Teiseks eesmärgiks on sooritada esmakordsed elektromagnetilise ühilduvuse mõõtmised FEST21 tudengivormeli elektrisüsteemis. Kolmandaks eesmärgiks on omandatud teoreetiliste ning sooritatud mõõtmiste põhjal anda soovitusi tulevaste elektrivormelite elektromagnetilise ühilduvuse parendamiseks.</p> <p>Lõputöö esimesed kaks peatükki kajastavad elektromagnetilise ühilduvuse algtõdesid. Kolmas peatükk käsitleb elektromagnetilise ühilduvusega seotud standardeid. Neljandas peatükis tuleb juttu elektromagnetilise häiringu olemusest ning antakse soovitusi selle vastu võitlemiseks. Viies peatükk sisaldab tudengivormeli FEST21 elektrisüsteemi lahtimõtestamist, võistlussarja reeglitest tulenevaid piiranguid ja hooaja vältel esinenud probleeme elektromagnetilise ühilduvusega.</p> <p>Lõputöö viimane osa keskendub tudengivormeli elektrisüsteemi seadmete elektromagnetilise ühilduvuse mõõtmistele. Mõõteobjektiks valiti kolm tiimisiselt disainitud trükkplaati ning mõõtmised sooritati rist-elektromagnetlaine kambris. Mõõtmiste eesmärk ei olnud teha trükkplaadile vastavushindamist, vaid saada esialgsed andmed analüüsiks. Kokku tehti neli mõõtmist, mille vahel sooritati seadmetiku omadusi parandavaid täiustusi. Mõõtetulemusi analüüsiti ning tulenevalt tulemustest anti soovitusi tulevaste elektrivormelite elektromagnetilise ühilduvuse parendamiseks.</p>	
<i>Märksõnad:</i> Tudengivormel, FEST21, elektromagnetiline ühilduvus, elektromagnetiline häiring, GTEM cell,	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Karl Martin Meras	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Analysis of electromagnetic compatibility of FEST21 Formula Student Electric system	
<i>Date:</i> 18.05.2022	<i>67 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> Senior lecturer Tanel Jalakas and Engineer Marek Jarkovoi	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> <p>This thesis has three objectives. First aim is to collect information about electromagnetic compatibility and increase within the team knowledge of electromagnetic compatibility. Second aim is to perform for the first-time electromagnetic compatibility measurements of FEST21 electric car, electronic systems. Third aim of this thesis is giving advises to make future electric car electromagnetic compatibility better, based on gained theoretical knowledge and measured electronical devices analysis.</p> <p>This thesis first two chapters have focus on electromagnetic compatibility basic theory. Third chapter is about electromagnetic standards. Fourth chapter is about impact of electromagnetic interference and ways to lessen it. Fifth chapter main focus is on FEST21 Formula Student car electric system, competition rule limitations to electric system and electromagnetic problems occurred during last season.</p> <p>This thesis last chapters is measuring electromagnetic compatibility of FEST21 electric system. Measuring object was three self-developed printed circuit boards which measurements were made with GTEM cell equipment. The main goal was not make conformity assesment to printed circuit boards but to make first measurements in order to analyse and validate self-developed circuit boards design. Four measurements were performed and between measurements, improvements were made. All measurements were analysed and due to this, advises to achieve better electromagnetic compatibility in future models of student formula electric cars were given.</p>	
<i>Keywords:</i> Formula Student, FEST21, electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, GTEM cell	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Tudengivormeli FEST21 ajamite ja juhtsüsteemi elektromagnetilise ühilduvuse uurimine**

Lõputöö teema inglise keeles: **Analysis of electromagnetic compatibility of FEST21 formula student drive and control systems**

Üliõpilane: **Karl Martin Meras, 179774 EAAB**

Eriala: **Elektroenergeetika ja mehhatroonika**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Tanel Jalakas**

Lõputöö kaasjuhendaja: **Marek Jarkovoi**
(ettevõtte, amet ja kontakt) **TalTech, Vanemteadur,**
tanel.jalakas@taltech.ee

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **2021/2022 2021/2022 kevad**
kehtivusaja annab juhendaja

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2022**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Teema on minu jaoks oluline uurida, kuna olen tudengivormeli liige. Tiimi siseselt on probleemid elektromagnetilise ühilduvusega üsna aktuaalsed. Oleme täheldanud ajamite mõju juhtimissüsteemile, sensoritele, tagasisideahelatele. Kuna varem pole tiimi siseselt antud teemaga süvitsi mindud, ega seda süvitsi uurinud, siis on oluline antud teema käsile võtta, et tulevastel aastatel oleks võimalik disainida kiirem, võimekam ja töökindlam vormel. Teadmatus elektromagnetiliste häiringute tekkimisest ja sellega võitlemisest seab hetkel üsna suured piirangud.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on määratleda ära tudengivormelis tekkivate häiringute allikad, tüübid ja mõjutatavad ahelad. Teha kokkuvõtte elektromagnetiliste häiringute vähendamiseks tehtavatest toimingutest ja projekteerimistavadest (seadmete kestad, paigutus, trükkplaatide disain, varjestus). Analüüsida FEST21 elektrisüsteemi disaini ning analüüsi järelduste põhjal sooritada ka reaalsed elektromagnetilise ühilduvuse mõõtmised (kiiruslikud ja juhtivuslikud häiringud). Mõõtmiste analüüsi baasil teha soovitusi, seadmete paigutuse, disaini ja varjestuse muutmiseks.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Määratleda ära tudengivormelis tekkivate häiringute allikad, tüübid ja mõjutatavad ahelad.
- Analüüsida FEST21 elektrisüsteemi disaini.
- Sooritada reaalsed FEST21 elektrisüsteemi elektromagnetilise ühilduvuse mõõtmised. Mõõtmiste analüüsi baasil teha soovitusi, seadmete paigutuse, disaini ja varjestuse muutmiseks.

4. Lähteandmed

Lähteandmeteks on erialane- ja teatmekirjandus, elektrivormeli projekteerimise materjalid, kasutatud seadmete andmelehed, katsetulemused.

5. Uurimismeetodid

Tudengivormeli FEST21 projekteerimisfailide analüüs. Elektromagnetilise ühilduvuse mõõtmised Taltech elektromagnetilise ühilduvuse labori mõõteseadmetega (analüsaator, mõõtevastuvõtja ja antennid). Mõõtetulemuste analüüs.

6. Graafiline osa

Graafiline osa sisaldab:

- FEST21 elektriseadmete skeem
- Mõõtetulemused tabelite ning emissioonide spektrogrammidena

7. Töö struktuur

1. Sissejuhatus

2. Elektromagnetiliste häiringute liigid
3. Elektromagnetiliste häiringute allikad
4. Elektromagnetiliste häiringute mõju seadmetele ning viisid selle vähendamiseks
5. FEST21 tudengivormeli elektrisüsteemi kirjeldus
- 5.1 Elektromagnetilise ühilduvusega seotud probleemid
6. FEST 21 tudengivormeli elektromagnetilise ühilduvuse mõõtmised
- 6.1 Mõõteaparatuuri ja objekti kirjeldus
- 6.2 Mõõtetulemused ja analüüs
7. Ettepanekud muudatusteks FEST21 elektrisüsteemis
8. Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

<https://www.raamatukoi.ee/elektromagnetiline---hilduvusr02754050>

<https://www.raamatukoi.ee/elektromagnetiline-uhilduvus>

<https://digital-library.theiet.org/content/books/cs/pbel008e>

http://egdk.ttu.ee/files/2013/EMY_loengukonspekt.pdf

9. Lõputöö konsultandid

10. Töö etapid ja ajakava

1. Kirjanduse ja alusmaterjalidega kogumine ja nendega tutvumine (01.01.2022).
2. Lõputöö sissejuhatava osa kirjutamine (01.02.2022)
3. Elektromagnetilise ühilduvuse mõõtmised (01.03.2022).
4. Mõõtetulemuste analüüs ning lõputöö viimase osa kirjutamine (20.03.22).
5. Töö küljendamine, korrigeerimine ning graafiliste materjalide täiustamine (10.04.22).

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel.

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
Lühendite ja tähiste loetelu	12
SISSEJUHATUS	14
1. ELEKTROMAGNETILISTE HÄIRINGUTE LIIGID	15
1.1 Häiringute liigitus sageduse järgi	15
1.2 Häiringute liigitus iseloomu järgi	16
1.3 Häiringute liigitus levi järgi	16
2. ELEKTROMAGNETILISTE HÄIRINGUTE ALLIKAD	18
2.1 Kitsaribalised häiringuallikad	18
2.2 Laiaribalised häiringuallikad	19
2.2.1 Laiaribaliste impulshäiringute allikad	19
2.2.2 Laiaribaliste siirdehäiringute allikad	19
3. ELEKTROMAGNETILISE ÜHILDUVUSEGA SEOTUD STANDARDID.....	21
3.1 Elektromagnetilis ühilduvuse nõuded Euroopas	21
3.2 Elektromagnetilise ühilduvuse standardite jaotus	22
4. ELEKTROMAGNETILISTE HÄIRINGUTE MÕJU SEADMETELE NING VIISID SELLE VÄHENDAMISEKS.....	23
4.1 Kujundus, paigutus ja maandamine.....	23
4.1.1 Süsteemi liigendamine	24
4.1.2 Maandamine	24
4.2 Trükkplaadi kujundus	26
4.2.1 Maandusplaadita maanduste kujundus	26
4.2.2 Maanduskihtide kasutamine	27
4.2.3 Mitmekihilised plaadid ning pindkoostetehnoloogia	27
4.2.4 Sisend ja väljundahelate ning maanduste kujundamine	28
4.2.5 Digitaal ja analoogahelate kujundamine	29
4.2.6 Loogikalülituste valik ja emissioon	29
4.2.7 Häiringukindel programmeerimine.....	30
4.3 Liidesed, filtreerimine ja varjestamine	30
4.3.1 Kaablid ja nende ühendused	30

4.3.2 Filtreerimine ja häiringusummutus.....	36
4.3.3 Varjestamine.....	38
5. FEST21 TUDENGIVORMELI ELEKTRISÜSTEEMI KIRJELDUS	42
5.1 FEST21 akupaki ja elektroonika sektsiooni kirjeldus	42
5.1.1 Akupakk	42
5.1.2 Elektroonika sektsioon	42
5.2 FEST21 kõrgpinge elektrisüsteemi kirjeldus.....	43
5.2.1 Mootorite kontrollid	44
5.2.2 Mootor	45
5.3 FEST21 madalpinge elektrisüsteemi kirjeldus.....	46
5.4 FEST21 elektromagnetilise ühilduvusega seotud probleemid	47
6. FEST21 TUDENGIVORMELI ELEKTROMAGNETILISE ÜHILDUVUSE MÕÕTMISED	48
6.1 Mõõteaparatuuri ja objekti kirjeldus	48
6.1.1 Mõõteaparatuur.....	49
6.1.2 Mõõteobjekti kirjeldus	49
6.2 Mõõtetulemused ja analüüs	50
6.2.1 Katse 1	50
6.2.2 Katse 2	51
6.2.3 Katse 3	52
6.2.4 Katse 4	53
6.2.5 Mõõtetulemuste täiendav analüüs	54
6.3 Ettepanekud muudatusteks FEST21 elektrisüsteemis	56
KOKKUVÕTE	57
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	59
LISAD.....	62

EESSÕNA

Lõputöö teema idee ning valik teostati koostöös Formula Student Team Tallinn tudengiorganisatsiooniga MTÜ Tudengi Vormel. Teema valikul olid abiks elektroonika alammeeskonna liikmed. Tulenevalt sellest said seatud eesmärgid läbi arutatud ning hiljem ka vastavalt formuleeritud.

Tänu soovin avaldada enda juhendajle Tanel Jalakale, kes abistas lõputöö teoreetilise poole valmimise ning ülesehitusega. Samuti soovin tänu avaldada kaasjuhendajale Marek Jarkovoile, kes oli abiks standardite lahtimõtestamisel ning seatud töö praktilise poole ehk seadmestiku elektromagnetilise ühilduvuse mõõtmistega. Lisaks soovin tänada ka Formula Student Team Tallinn meeskonnaliikmeid, kes olid igati vastutulelikud ning abiks nii nõu kui ka jõuga.

Lühendite ja tähiste loetelu

AC (Alternating current) - Vahelduvvool

AIL – Lineaarne pingereguleerija (trükkplaat)

AMS (Accumulator Management system) – Akuhaldussüsteem

CAN (Controller Area Network) – CAN siin ehk sõidukitele loodud standard, mis võimaldab seadmetel andmeid vahetada ilma juhtarvuti abita

CoG (Centre of Gravity) – Massikese

DASH (Dashboard) – Monitor vormeli olulisemate elektoonika ja oleku parameetrite kuvamiseks

DC (Direct current) – Alalisvool

ECU (Electronic Control Unit) – Elektrooniline juhtseade

EMI (Electromagnetic interference) – Elektromagnetiline häirumine, häire või interferents

EMÜ (ingl k EMC) – Elektromagnetiline ühilduvus, ehk süsteemi või seadmestiku võime talitleda rahuldavalt teda ümbritsevas elektromagnetilises keskkonnas nii, et ei tekiks talumatut elektromagnetilist häiringut millelegi selles keskkonnas

FEST21 – FSTT 2020/21 hooajal projekteeritud ja ehitatud Formula Student elektrivormel

Formula SAE – Ameerikast alguse saanud tootearendus võistlussari

FSG (Formula Student Germany) – Saksamaal korraldatav tudengivormeli võistlussari, mille reeglite järgi ehitatakse Euroopas tudengivormeleid

FSTT (Formula Student Team Tallinn) – Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli tudengitest koosnev tudengivormeli meeskond

GND (ground) - Maandusühendus

GSS (Ground Speed Sensor) – Maakiiruse sensor

GTO (Gate Turn Off) – Suletav türistor

HVD (High Voltage Disconnect) – Turvalisus element kõrgepinge ahela katkestamiseks

IMD (Insulation Monitoring Device) – Mõõteseade kõrgepinge isoleerituse mõõtmiseks

IVT – Pinge ja voolumõõtur

LVS (Low Voltage System) – Iga elektriline osa, mis ei ole TS

PCB (Printed Circuit Board) - Trükkplaat

PI (Proportional-integral) – Proportsionaal-Integraal kontrollor

PID (Proportional-Integral-Devarivative) – Proportsionaal-Integraal-Diferentsiaal kontrollor

RMS (Relay Monitoring Sensor) – Mõõdab kõrgepinge releede asendit ja edastab info TSAL trükkplaadile

rms (root mean square) – Vahelduvvoolu või pinge ruutkeskmise, ehk efektiivväärtus

SCR (Silicon controlled rectifier) – Üheoperatsiooniline türistor

TEM (Transverse Electromagnetic) – Rist-ektromagnetlaine

TS (Tractive System) – Vormeli iga osa, mis on elektriliselt ühendatud mootori(te) ja kõrgepinge akupakiga

TSAL (Tractive System Active Light) – Vormeli elektrisüsteemi oleku tuvastus seade

SISSEJUHATUS

Formula Student on 1980. aastatel Ameerikast alguse saanud tehnika valdkonna inseneridele suunatud tootearendus võistlus. Tänu suurele huvile on formula SAE võistlussari levinud üle kogu maailma, millest täna võtab osa üle 600 meeskonna tervest maailmast. [9] Võistlused jagunevad kolme kategooriasse: sise põlemismootoriga, elektri- ja isejuhtiv vormel. Võistlustel hinnatakse staatilisi, kui ka dünaamilisi alasid. Staatiliste alade alla kuuluvad vormeli disain, kuluaruanne ja äriplaan, mis tuleb kaitsta kohapeal olevatele kohtunikele. Dünaamilised alad on kiirendus, rajasõit, kaheksasõit, kestvussõit ja efektiivsus. Võitja selgitatakse välja punktisüsteemi alusel, kus võetakse arvesse iga ala erinev kaal. [1]

Formula Student Team Tallinn koosneb Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli bakalaureuse ja magistri tudengitest. Meeskond loodi 2006. aastal ning esimesel võistlusel käidi sõitva vormeliga 2008. aastal sise põlemismootorite kategoorias. Sise põlemismootorite kategoorias võisteldi viis aastat, pärast mida otsustati 2012/13 hooajal minna üle elektrivormelite kategooriasse. Tänapäevaks on kokku valminud elektrivormeleid üheksa erinevat eksemplari. Lisaks sellele alustati 2018. aastal ka paralleelselt isejuhtiva vormeli ehitust ning sellega võistlemist. [32] Lõputöö kirjutamise hetkel valmib meeskonna kümnes elektrivormel, nimega FEST22.

Tulenevalt sellest, et FSTT ehitab elektrivormelit, kus elektroonika on piltlikult öeldes võimalikult kokku pakitud, käib elektrivormeli ehitusega kaasas ka selle paratamatu osa, milleks on elektromagnetiline emissioon. Elektromagnetiline emissioon on otseseks põhjuseks elektriseadmete või süsteemide talituse halvenemisele. Talituse halvenemine võib põhjustada võistlussarjas, kus konkurents on tihe ning kaalul iga millisekund, tiimile suuri kaotusi. Selleks, et ennetada võimalikke probleemide tekkimist ning probleemide tekkimisel nendega teadlikult võidelda on vaja põhilisi teadmisi elektromagnetilisest ühilduvusest.

Antud lõputööl on kolm tähtsat eesmärki. Esimeseks eesmärgiks on koguda ja talletada teoreetilist informatsiooni EMÜ kohta ja suurendada tänu sellele üleüldist tiimisisest teadlikkust. Analüüsida elektrivormeli FEST21 elektrisüsteemi ja selle elektromagnetilist ühilduvust, ehk põhilisi emissiooni tekitajaid ja süsteemi häiringu- kindlust ning häiringutundlikkust. Teiseks oluliseks eesmärgiks on viia läbi reaalsed elektromagnetilise emissiooni mõõtmised 20/21 hooaja vormeli FEST21 elektroonika seadmetikus. Kolmandaks eesmärgiks on teoreetilise osa võrdlemine praktilisega ning seeläbi järelduste tegemine. Järelduste põhjal antakse lõputöö viimases peatükis soovitusi EMÜ parendamiseks tulevastel elektrivormelitel, FEST21 näitel.

1. ELEKTROMAGNETILISTE HÄIRINGUTE LIIGID

Iga elektriseade on potentsiaalne elektromagnetiliste häiringute allikas. Tehisliku elektromagnetilise häiringu allikana talitlevad elektriseadmestikud võib liigitada kahte põhigruppi: seadmed, mille esmane ülesanne on genereerida ja tarbida tahtlikke kõrgsageduslikke signaale ja need seadmed, mis genereerivad kõrgsageduslikku elektromagnetilist energiat oma tavalisel toimimisel tahtmatu kõrvalnähtusena. Keskkonda paisatud kõrgsageduslikke signaale iseloomustatakse kui tahtmatuid häiringusignaale. Sealjuures võivad need seadmed genereerida kõrgsageduslikke signaale mitte ainult neile ettenähtud sagedusalas, vaid palju laiemas sagedusalas. Selliste seadmete hulka kuulub näiteks kõrgsageduslik meditsiiniline seadmestik. [18]

Teine elektriseadmete grupp genereerib kõrgsageduslikke signaale, mis pole nende normaalseks talitluseks vajalikud. Need signaalid on keskkonnas kui elektromagnetiline müra. Algpõhjus elektromagnetilise häiringute tekitamises seisneb selles, et need seadmed tekitavad kiireid pinge ja voolu siirded. Kuigi juhuslike signaalide nivood on tavaliselt suhteliselt madalad, on nad sageli elektromagnetiliste häiringute peamiseks põhjuseks. Seadmestiku talitusega tahtmatult kaasnevate elektromagnetiliste häiringute allikate hulka kuuluvad näiteks lülitid, jõuelektroonikaseadmed. [2]

Elektriseadmete elektromagnetilist emissiooni ei ole lihtne täpselt määratleda või liigitada. Siiski võib neid liigitada kolme põhilisse kategooriasse, kui on teada signaali mõningad iseloomu omadused. Elektromagnetilised häiringud jagunevad järgmiselt: häiringute liigitus iseloomu, sageduste sisalduse ja levimisviisi järgi. [2]

1.1 Häiringute liigitus sageduse järgi

Raadiosageduslike häiringute ala algab sagedusest 150 kHz. See sagedusala jagatakse tavaliselt sagedusribadeks 0,15-30 MHz ja 30-1000 MHz. Jagamise põhjus seisneb selles, et antud sagedusvahemikes levivad häiringud erinevalt. Nimelt 0.15-30 MHz alas võime põhilislt rääkida juhtivuslikest häirngutest ja 30-1000 MHz alas kiiruslikel teel levivatest häiringutest. [2]

Raadioelektronsadmete EMÜ põhiliseks probleemiks osutub see, et raadiosageduslik spekter on piiratud samal ajal kui selle spektri tarbijate arv on pidevas kasvus. Kui vaadelada 3-30 MHz kõrgsagedusvahemikku ehk 27 MHz riba, mille kanali laius on 3 MHz, siis võib paigutada sellesse vahemikku 9000 kanalit. Soovijate arv, kes seda kanali vahemikku kasutada sooviks ületab mitmekümne kordselt selles vahemikus

vabade kanalite arvu. Sellest tulenevalt tekib olukord, kus paljud raadioelektronika seadmed töötavad samal kanalil. [2]

1.2 Häiringute liigitus iseloomu järgi

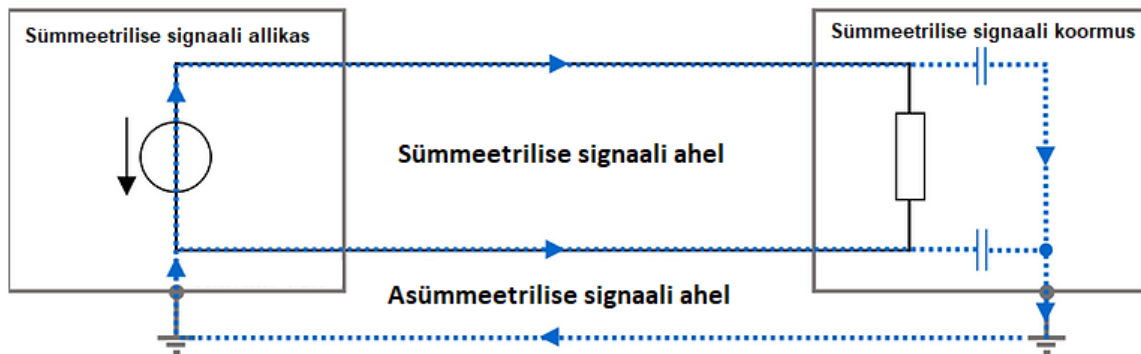
Üsna tihti elektromagnetilised häiringud tekitavad kahjustusi toitevõrgu pingele. Need häiringud võivad olla nii pika- kui lühiajalised. Pikaajalisi muutusi ei arvata tavaliselt EMÜ valdkonda, sest need põhjustavad peamiselt toitevõrgu pinge efektiivväärtuse muutusi. Lühiajaliste muutuste kestus on kuni mõnest sekundist mikrosekunditeni välja. Elektromagnetilised häiringud võib jagada kolme gruppi:

- Müra ehk peaaegu püsiv muutus pingekõveras. Müra on perioodilise iseloomuga ja tema kordussagedus on kõrgem kui võrgusagedus ning müra amplituud on väiksem kui võrgupinge tippväärtus. Impulsstoiteallikate korral esineb müra sageli mõnevoldise lülitussagedusliku pulsatsiooni kujul, mis liitub toitevõrgu pingega. Müraallikate hulka kuuluvad muundurid, elektrimootorid, impulsstoiteallikad, kaarkeevitusseadmed jne.
- Impulsid ehk võrgupingele ülestatud positiivsed ja negatiivsed tippväärtus. Impulssidele on iseloomulik lühiajalisus, suur amplituud ja kiire tõusu- ja/või langusaeg. Impulsid võivad võrgusageduse suhtes kulgeda nii sünkroonselt kui ka asünkroonselt ja impulsside vahel võib olla mitmesugustes lülitusprotsessides tekitatud müra. Tüüpilised impulsse tekitavad seadmed on lülitid, releed, alaldid ja türistorahelad.
- Siirded ehk transiendid. Siirde kestus võib ulatuda tööstussageduse mõnest perioodist kuni mõne sekundini. Siirdehäiringud genereerivad tavaliselt suure võimsusega lülitid ning siirete tekitajateks on põhiliselt rasketalitusmootorid, kompressorid, konditsioneerid jne. [2]

1.3 Häiringute liigitus levi järgi

Elektromagnetilised häiringud levivad juhtivuse kaudu ühendusjuhtides ja kiirguse teel ruumis. Juhtivuse kaudu juhistikus levivad elektromagnetilised häiringud tavaliselt alla 10 MHz sagedusega ning sellest kõrgemal sagedusel on ülekaalus kiirguslike häiringute levimine. Kiirguse teel levivad häiringud kas elektrivälja, magnetvälja või elektromagnetvälja vahendusel. Elektrivälja korral räägitakse mahtuvuslikust, magnetvälja korral aga induktiivsest sidestusest. [2]

Juhtivuslikud häiringud jagunevad omakorda sümmeetrilisteks (differential-mode) ning asümmeetrilisteks (common-mode) häiringuteks. Igas vooluringis on olemas sümmeetrilised kui ka asümmeetrilised voolud, mis määravad kiiratud ja peegeldatud raadiosagedusliku energia koguse. Kui on olemas juht ja juhi tagasivoolu tee siis on olemas ka üks kahest voolust, tavaliselt on siiski olemas mõlemad. Sümmeetrilised voolud kannavad endas tavaliselt andmeid või signaali ning asümmeetrilised voolud on tavaliselt kõrvalnäht või kõrvalsaadus sümmeetriliste voolude üle kandmisel. Sümmeetrilised voolud tekivad elektrilise kontuuri edasi- ja tagasivoolu ahela vahel. Seejuures on edasi- ja tagasivoolu juhi suund vastastikune. Asümmeetrilised häiringud tekivad sümmeetriliste häiringute muundumisel asümmeetrilisteks ning tavaliselt sümmeetrilise ja asümmeetrilise kontuuri voolud summeeruvad omavahel. Tulenevalt sellest tekib ka märgatavalt suurem vooluahel. [31]



Joonis 1.1. Sümmeetriliste ja asümmeetriliste häiringute levimis teekond. [28]

2. ELEKTROMAGNETILISTE HÄIRINGUTE ALLIKAD

Elektromagnetiliste häiringute allikad võib liigitada kaheks – looduslikud ja inimtekkelised allikad. Looduslike allikate alla kuuluvad atmosfäärilised allikad ehk näiteks välg, päike, tähed. Tehislike häiringute alla kuuluvad inimeste poolt loodud elektroonilised seadmed, mis võivad põhjustada elektromagnetilisi häiringuid. Inimeste poolt loodud elektrooniliste seadmete häiringuid saab piirata ning vastvalt vajadusele nende sagedusvahemikku teatud määral kujundada. [18]

Elektromagnetilised häiringud levivad kogu elektromagnetilise spektri ulatuses – alates null sagedusest. Tavaliselt on need kui kõrvalise välja elektriline või magnetiline mõju erinevatele elektriseadmetele. Sõltumata sellest, kas häiring on tekitatud tahtlikult või tahtmatult, omavahel eristatakse vastavalt tahtlike ja mittetahtlike häiringuallikaid. [30]

Tahtlikud häiringuallikad on eelkõige raadio ja telesaatejad. Nende tööpõhimõtteks on levitada saateantenni abil ümbritsevasse keskkonda elektromagnetilisi laineid, mille läbi toimub info edastamine. Lisaks võib sellesse gruppi lisada ka kõik seadmed, mis kiirgavad muul tahtlikul põhjusel keskkonda elektromagnetilisi laineid. Nendeks seadmeteks on näiteks raadio teel juhitud seadmed. Tahtlike häiringuallikate eeliseks on see, et allika iseloom on algusest peale selge ning tänu sellele on lihtsam tagada ka elektromagnetiline ühilduvus. Allika intensiivsust pole vaja määrata kuna see on täpselt määratav edastatava signaali võimsuse ja käsuandmise loa järgi. [30]

Mittetahtlike häiringuallikate hulka kuuluvad kõik elektroonika seadmed, mis ei kuulu tahtlike häiringuallikate alla ning kiirgavad keskkonda elektromagnetilisi häiringuid tahtmatu kõrvalnähtuna. Vahe tahtlike häiringuallikatega seisneb selles, et mittetahtlike häiringuallikate elektromagnetiliste häiringute väljaselgitamine on küllaltki keerukas protsess. Selleks, et saavutada elektromagnetiline ühilduvus on vaja leida häiringute allikad ning levimiskanaliid. Seejuures peab seade häiringu intensiivsus olema väiksem piirväärtustest dokumentides, mis käsitlevad vastavaid standardeid. Kogu selle protsessi lihtsustamiseks on võetud kasutusele ümbritseva keskkonna klassid. [2]

2.1 Kitsaribalised häiringuallikad

Kitsariba allikad on üldiselt inimtekkelised häiringuallikad. Need seadmed on enamjaolt raadiosaatejad, kõrgsagedusgeneraatorid ja ka 50 Hz sagedusega

elektrivõrk. Üldisema iseloomujoonena võib nende seadmete puhul välja tuua häiringu amplituudi või efektiivväärtuse kindlal sagedusel. [2]

Kitsaribalise häiringuallika iseloomustamiseks on kõige parem näide raadio saatejaam. Saatejaamade kiirus on üldjuhul kitsaribaline ning sisaldab ka enamasti kandesagedust ja külgribasi. Lisaks sellele sisaldab ta ka harmoonilisi ja mitteharmoonilisi kõrgema sagedusega komponente. Saatejaamade toimimisala on üsna lai – mõnekümnest hertsist kuni mõnesaja gigahertsini. Tänu sellele, et raadio saatejaamad on tahlikud kiirgajad on nende tööspekter jaotatud vastavalt standartitele ning kokkulepetele. Tänu sellele on lähtsuuruste abil võimalik lihtsasti kindlaks teha tõenäoline segav saatja. [2]

2.2 Laiaribalised häiringuallikad

Lairibalist häiringut iseloomustab pidev spektri joon, mis koosneb omavahel lähestiku olevatest spektrijoontest. Lairibaliste häiringute alla liigituvad üldiselt looduslikud häiringud. Lairiba häiringuallikad jagunevad omakorda müra- ja siirdehäiringute allikateks. Mürahäiring on eristatav tänu impulssidele, mis on erineva amplituudiga üksteisele tihedalt lähestikku või kattuvatest impulssidest, mis ei ole üksteisest eraldatavad. Siirdehäiringud on seevastu aga üksteisest selgelt eristatavad – enamasti ei kordu ning esinevad impulsskuul. [2]

2.2.1 Lairibaliste impulsshäiringute allikad

Kõige enam lairibalisi impulss häiringuid leiab linnadest. Linna häiringunivoo sõltub suuresti linna elanike arvust, linna ühistranspordi meetoditest ning ka mõjuriteks on aastaaeg ja asukoht. Põhilised häiringute tekitajad on autode süütesüsteemid, majapidamiseseadmed, infotehnoloogia seadmed ja transpordiseadmed. Lairibalise impulsi häiringu allikateks on näiteks auto süüteseadmed või alalisvoolu elektrimootorid. [2]

2.2.2 Lairibaliste siirdehäiringute allikad

Lairibalist siirdehäiringu allikat on kõige parem kirjeldada läbi induktiivahelate ümberlülitamise, kuna antud olukord on kõige enim esinev nähtus tööstusseadmetes ning kõrgepingeseadmetes. Kiirgajateks on enamasti trafode ja elektrimasinate mähised, releede ja kontaktorite poolid. Probleemiks on väljalülitusel tekkivad suured siirdepinged, mis võivad endaga kaasa tuua ümberlülitava ahelaosa taaslülituse, pooli isolatsiooni läbilöögi või kõige tavalisemal kujul põhjustada elektromagnetilisest

häiringust tulenevaid probleeme kõrvalahelates ning seadmetes. Häiringute tekke põhjus on alati sama, aga erinevus seisneb sisse- ja väljalülitamises. [2]

2.2.2.1 Siirdeprotsessid

Siirdeprotsesside peamiseks põhjusteks on kiired pinge muutused, mis võivad olla põhjustatud elektrisüsteemis toimunud voolu lülituste näol. Samuti võib olla üheks põhjustajaks süsteemi oleku muutus, kui on vaja viia süsteem üle ühest olekust teise. Siirdeprotsesside puhul käib jutt siiski väga lühikestest ajavahemikest, mida üldjuhul vaadeldakse millisekundites. Olenemata protsessi lühiajalisusest võivad ilmned a süsteemi voolu ja pinge kõverates ohtlikult kõrged tippväärtused. [25]

3. ELEKTROMAGNETILISE ÜHILDUVUSEGA SEOTUD STANDARDID

Selleks, et seadmed saaks toimida ilma häirumisteta ning teisi kui ka keskkonda suurel määral reostamata on vaja kehtestada seadmetele teatud standardid ning normatiivid. Standardid määravad suures osas nõudmised, reeglid ja seadmete testimise meetodika. Lisaks sellele on standardites sätestatud limiidid teatud maksimaalsetele ning minimaalsetele piirnormidele elektromagnetilise ühilduvuse saavutamiseks. Tänu standarditele on võimalik muuta mõõtmistulemused võrreldavaks ning korrata neid tänu standardites defineeritud mõõtemetoodikale. Lisaks eelpool mainitule on ka standardite eesmärgiks EMÜ testimise ühtlustamine (ka ülemaailmselt). [11]

EMÜ standardite määratlemise, sõnastamise ja väljastamisega tegelevad rahvusvahelised ja vastavalt piirkonnale piirkondlikud või riiklikud organisatsioonid ja komiteed. Üldjuhul sõnastavad reguleerivad organid standardid ise, kuid näiteks Euroopa Liit annab sõnastamise ülesande CENELEC-ile (European Committee for Electrotechnical Standardization). Ülemailmne EMÜ standardite komitee on IEC ehk International Electrotechnical Commission. IEC alla kuulub omakorda hulk väiksemaid komiteesid.

IEC üldiste ja põhiliste standardite komiteed:

- Technical Committee 77, EMC (TC77)
- International Special Committee on Radio Interference (CISPR)

Lisaks sellele kuulub IEC alla veel hulgaliselt partnerlus komiteesid. [11]

3.1 Elektromagnetilis ühilduvuse nõuded Euroopas

Elektromagnetilise ühilduvuse nõuded on Euroopa Liidus kehtestatud direktiiviga 2014/30/EU. [10] Antud direktiivi eesmärgiks on reguleerida EMÜ seadmeid ning seadmete EMÜ testimist Euroopa Liidus. EMÜ direktiiv kehtestab ka nõuded seadmele, millele peab seade vastama, et teda tohiks müüa Euroopa Liidus. Seadme vastavuse tõendamiseks kehtib vastavusmargis "CE". Lisaks sellele kehtestab ka direktiiv nõuded vastavushindamis asutustele ning muud olulised elektromagnetilised regulatsioonid. [12]

IEC poolt on loodud kaks oluliseimat põhiseeriat CISPR 16 ning IEC 61000, mis on EMÜ alusstandardid üle kogu maailma. Euroopas on kasutusel nende standardite üsna sarnased tuletused tähistatud vastavalt EN 55016 (CISPR 16) ja EN 61000 (IEC 61000), antud juhul tähistab märgis "EN" Euroopas kehtivat standardite normi. IEC 61000 (EN 61000) eesmärgiks on EMÜ alusmaterjali jagamine, nagu näiteks terminoloogia, kirjeldused elektromagnetilise olemuse kohta, elektromagnetilise keskkonna olemus ning tehnilised juhised mõõtmiste ning testimiste kohta. CISPR 16 (EN 55016) seevastu on 16-st väljaandest koosnev sari, mis kirjeldab põhjalikumalt seadmeid ning meetodeid häirete ja neile mõjuvate häirete mõõtmiseks sagedusel üle 9 kHz. [13]

3.2 Elektromagnetilise ühilduvuse standardite jaotus

Eelnevas peatükis (3.1) sai selgeks, et EMÜ alusstandardeid on kaks ning nad sisaldavad endas üldisemat laiapõhjalist kirjeldust EMÜ saavutamiseks. Lisaks sellele on kasutusel ka EMÜ seadme standardid, mis on oma olemuselt rohkem spetsiifilised ning suunatud teatud kindlale seadmegrupile. Näiteks nagu elektrilise tänavasõiduki laadimissüsteem (IEC 61851-21). Järgmiseks oluliseks normatiivide grupiks on perekonna grupp kuhu kuuluvad kõik seadmed, millel on üldised sarnased karakteristikud, mis töötavad samas keskkonnas ning neil on ühine kasutusrakendus. Sinna gruppi kuuluvad kõik seadmed, mis vastavad näiteks EN 55011 normatiividele. Olukorras, kus seade ei paigutu ühtegi eelnevalt mainitud gruppi, tuleb seade EMÜ tagamisel kasutada alusstandardeid, näiteks tööstusliku keskkonna puhul tuleb jälgida EN 61000-6-4 (häiringud) ning EN 61000-6-2 (immuunsus) normatiive. [11][13]

Kuna seadmeid ja seadmete kasutusvaldkondi ning funktsioone on palju, ei pruugi seadme paigutamine kindla standardi alla olla sugugi mitte lihtne ülesanne. Selle ülesande lihtsustamiseks on hea variant kasutada plokk skeemi, mis on toodud lisa (vt lisa 1), siiski võib antud plokk skeem piirkonniti erineda. [11]

4. ELEKTROMAGNETILISTE HÄIRINGUTE MÕJU SEADMETELE NING VIISID SELLE VÄHENDAMISEKS

Elektromagnetiliste häiringute mõju elektriseadmetele ei saa olla kunagi positiivse mõjuga. Üldiselt võib elektromagnetilise mõju jagada kaheks: mööduvateks või pöördumatuteks riketeks. Mööduvate rikete alla liigitatakse väiksemad häiringud elektriseadmete töös, mis otseselt ei kahjusta elektriseadmeid, küll aga põhjustavad nende talituse kehvenemise. Pöördumatuteks riketeks on rikked, mille tagajärjel saab elektroonikaseade füüsilisi kahjustusi näiteks elektroonikakomponentide riknemise näol, mille tagajärjeks on seadme töövõimetus. Pöördumatute häirete alla võib jaotada ka häire mõjul soovimatult rakendunud elektriliselt juhitavate elektriseadmete rakendumist. Näiteks võib teatud juhtudel ka ühekordne häiringuimpulss tekitada seadmete häirumise. Tänu millele võib seadme häirumine kosmose seadmetes, lennunduse, sõjatööstuses – või miks ka mitte tudengivormelis, lõppeda katastroofiliste tagajärgedega. [2]

Peaaegu alati on võimalik saavutada rahuldav elektromagnetiline ühilduvus kui kasutada selleks vastavaid tehnilisi võtteid ja häid tavasi projekteerimisel. [2] Kuna elektromagnetiline ühilduvus jaguneb mitmetesse erinevatesse valdkondadesse, on kõige otstarbekam keskenduda meile tähtsale valdkonnale, milleks on tootearendus. Järgevalt käsitleme selles peatükis tähtsaid punkte, mida peaks arvestama tootearenduse algfaasides, et tagada võimalik parim elektromagnetiline ühilduvus.

4.1 Kujundus, paigutus ja maandamine

Seadmed, kus on aktiivseid elektroonika elemente, tekitavad ka häiringuid. Seega kõige mõistlikum on jagada häiringuvoo juhtimismeetmed kolme tasemesse. Esimese tasandi meetmeid on mõistlik rakendada projekteerimise algetappides. Esimese tasandi meetmed hõlmavad endas elementide lahtisidestamist ja nende paigutamist, sagedusriba ja toimekiiruse piiramist, seejuures kõige olulisem on elementide ja maanduse paigutamine. Teine tasemel on oluline lahti mõtestada seadme väliste kaablite ja ka sisemiste ahelate vaheline sidestus. Lisameetmetena on võimalik kasutada häiringute juhtimisel filtreid sisend- ja väljundliidestest. Kolmas tase on vältimatu osa, kui eelnevad meetmed ei ole olnud piisavad ning vaja on kasutada täieliku seadme varjestamist. Antud variant on võrreldes eelnevate variantidega kulukam ning nõuab lisatööd. Siiski on vaja seadme projekteerimisel arvestada juba algetappides, et esimese taseme meetmed ei pruugi olla piisavad elektromagnetilise ühilduvuse saavutamiseks. [3]

4.1.1 Süsteemi liigendamine

Süsteemi liigendamine on disaini esimene etapp. Liigendamise eesmärgiks on eraldada süsteemi osad, mis on elektromagnetilise ühilduvuse tagamisel kriitilised ja mittekriitilised osad. Kriitilisteks osadeks võib nimetada allikaid, mis kiirgavad või on ise eriti tundlikud sisenevatele häiringutele. Näiteks mikroprotsessorite ahelad ja madala signaali nivooga analoogahelad. Mittekriitiliste osade alla kuuluvad seadme osad, mille signaalide tase, ribalaius ja ahelafunktsioonid on selliste omadustega, et nad ei ole häiringute suhtes tundlikud ja ei tekita ka ise häiringuid. Mittekriitiliste seadme osade näitena võib tuua: takteerimata loogika, lineaarsed toiteallikad ja võimsusvõimendi astmed. [3]

Peamine eesmärk elektriseadmel on see, et tema sisendid ja väljundid oleks kontrollitavad. Samuti on ka eesmärgiks paigutada liidesed üksteisele võimalikult lähedale. Kõige mõistlikum lahendus kriitiliste ahelate või osade kaitsmisel on kasutada alamkoostesõlmel varjestuskesta. Varjel on seejuures kaks mõju – ta on kaitsebarjäär nii välja kiiratava kui ka väljast kiirguvate häiringute eest. Lisaks sellele on ta voolujuhtiv keskkond. Kui trükkplaadil on ka olemas maandatud kiht, saab seda kasutada varjena ja trükkplaadi kaitsmisel ei olegi vaja üldise kesta varjestamist. [31]

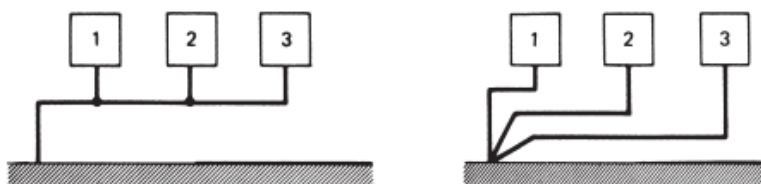
4.1.2 Maandamine

Maandamise üldine eesmärk on moodustada tugipunkt süsteemi välistele ühendustele. Maandussüsteemi kõige olulisemaks eesmärgiks on seega vähendada kriitilistes kohtades tekkivaid häiringupingeid võrreldes tahetud signaali pingega. Selle tagamiseks peab ta kriitilistes kohtades hoidma väikese takistusega voolu teekonda. Elektromagnetilise ühilduvuse puhul on seega põhiliseks probleemiks takistusel tekkivates häiringupingetes, mis on otseseks põhjuseks häiringuemisiooni või häiringutundlikusele. [31]

Ülekande takistuse võimalikult madalal hoidmine aitab ära hoida häiringuvoolude mõju ahelale. Jäiga maandatud toru või koaksiaalkaabli puhul on ülekande takistus kõige madalam. Halvimal juhul ehk varjestuse täielikul puudumisel läbivad kõik häiringuvoolud ahelat. Alternatiivse variandina võib ka kasutada maandatud plaati või kaablikanalit, mille kaitsemõju pole küll nii hea kui torul, kuid siiski parem kui paralleel juhtmega lahendusel. Seejuures on oluliseks aspektiks, et juhe peaks olema võimalikult lähedal kaablikanalile või plaadile, millel ei ole katkestuskohti voolu suunas. [3]

4.1.2.1 Üksikpunkt-süsteem

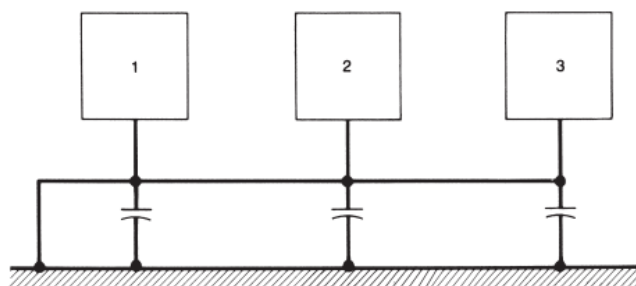
Üksikpunkt maandussüsteem on lihtsaim viis ühise maandustakistuse kaudu tekkiva sisetuse ning madalsageduslike maanduskontuuride probleemide kõrvaldamiseks. Süsteemi põhimõtteks on, et igal seadmel on oma ühendus ühise maanduspunktiga (vt. Joonis 4.1). Seejuures on oluline, et seadmed oleks ühendatud parema efekti saavutamiseks paralleelselt, et teiste seadmete voolud ei mõjutaks teisi seadmeid. Üksikpunkt maandussüsteem aitab vältida ka maandus antennide tekkimist. Siiski ei ole see süsteem täielikult häiringukindel. See süsteem toimib hästi mõningates olukordades madalamatel sagedustel, kuni sagedusteni megahertsides. Sageduse suurenedes hakkavad üksikute juhtmete maaühendused tekitama häiringupingeid. Ühise maandustakistuse mõju vähendamiseks paigutatakse kõige suuremad müra allikad ühisele maanduspunktile kõige lähemale. [30]



Joonis 4.1. Kaks erinevat võimalust üksikpunkt maandamiseks – esimesel jadaühendus (halvem) ning teisel paralleelühendus (parem). [30]

4.1.2.2 Mitmepunkti-süsteem

Selleks, et vältida probleeme, mis tekivad üksikpunktsüsteemi puhul on vaja rakendada hübriid ja mitmepunkti süsteemi. Mitmepunkti maaühendus süsteem väldib kõrgsageduslikke probleeme, ehk on vajalik kasutada suure signaaliga kõrgsagedussüsteemides ja digitaalsüsteemides. Seejuures on ülioluline kõrgete sageduste korral mitmepunkti ühendus väikese induktiivsusega maandusplaadi või varjestuse külge. See jällegi tekitab omakorda maanduskontuure, mis on tundlikud magnetvälja indutseeritud häiringutele. Selle lahenduseks on hübriid-maandussüsteem (vt. Joonis 4.2). Hübriid-maandussüsteemi kasutatakse olukordades, kus signaal katab laia sagedusala, näiteks on see laialdaselt kasutusel video signaali korral. [30]



Joonis 4.2. Näide hübriid-maandussüsteemist, mis käitub üksikpunkt maandusena madalatel sagedustel ja mitmepunkt maandusena kõrgetel sagedustel. [30]

4.2 Trükkplaadi kujundus

Trükkplaadi disain määrab ära elektromagnetilised näitajad seadmele, millesse see plaat kuulub. Trükkplaadi disainimisel on oluline pidada silmas eelpool olevaid põhimõtteid kujundamisel ja maandamisel. Kõrgsageduslike seadmete puhul disainides kujundustarkvaras maanduspunkt ühe sõlmene oleks tulemus katastroofiline. Kasutades näiteks kahepoolse trükkplaadi tehnoloogiat on kohustuslik alustada trükkplaadi disainimisel maanduskontuuridest. Peale maanduskontuuride kujundamist tuleb sisse viia kriitilisemad signaalid, mis peavad paiknema nende maanduste tagasitulevate juhtmete juures ning alles seejärel võib lisada ülejäänud ahelad. [3]

4.2.1 Maandusplaadita maanduste kujundus

Üheks põhiliseks eesmärgiks häiringupingete kõrvaldamisel on võimalikult väike maanduse näivtakistus, mis tagab parema EMÜ efektiivsuse. Selle vähendamiseks on kaks kõige lihtsamat viisi. Esmane viis on suurendada juhtme laiust ning vähendada juhtme pikkust. Teiseks oluliseks viisiks on tagada minimaalne võimalik voolu kontuur. [20]

Paralleelsete maandusjuhtide edasiarenduseks on maandusjuhtide kujundus võre- ehk maatriksina. Selline struktuur minimeerib iga signaali sulgumistee maandusinduktiivsust ning hoiab maa potentsiaalilt tagastuvate voolude tee arvu maksimaalsena. Eelistada tuleks laia maandusjuhete kitsale, kuna laiem juhe omab väiksemat induktiivsust. [31] Lisaks sellele on soovitatav vältida kammikujulist maandust. Selle kehvaks küljeks on tagasivoolude kulgemine suurtes kontuurides. Kammikujulise maandust saab lihtsasti kõrvaldada ristisuunaliste sildühenduste lisamisega. [3]

4.2.2 Maanduskihtide kasutamine

Väikseima võimaliku maandusjuhi induktiivsuse tagamiseks on parim lahendus kasutada maanduskihte. Eriti lihtne on sellise kihi realiseerimine mitmekihilise trükkplaadi puhul. Selline lahendus on parim tänu sellele, et võimaldab komponentide tihedamat pakkimist. Selle lahenduse rakenadmine on seega kõige tähtsam raadiosagedusahelate ja kõrge taktsagedusega digitaalhelate puhul. Lisaks sellele on oluline pidada silmas, et kriitiliste ahelate või seadmete paigutamine trükkplaadi äärtesse ei ole pädev lahendus ning seda peaks kindlalt vältima. [17]

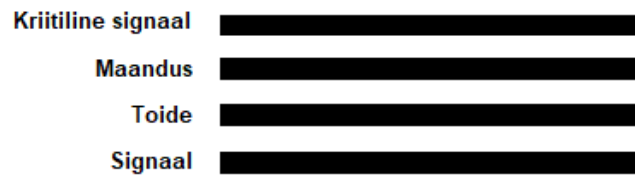
Kahekülgse trükkplaadi puhul võib võimalusel kasutada ka osalist maandusala. Osalise maandusala idee seisneb selle maandustee paigutamises nende ahelate või seadmete alla, mis vajavad väiksest tagasisuunalist induktiivsust. Kõrgetel sagedustel vool ei kulge mitte geomeetriselt kõige lühemat teed pidi vaid eelistab kulgeda võimalikult signaali lähedalt. Seejuures ei ole oluline, et maandusplaat kataks kogu trükkplaadi ulatuse kuid ta peaks katma kõiki kõige kriitilisemaid ahela osasid. Tänu korralikule paigutusele maandusplaadi äärte puisteväljad suurenevad ning tänu sellele omakorda suureneb ka efektiivne induktiivsus, mille tulemusena magnetiline sidestus vooluahelatega halveneb. [31]

Üks väga oluline osa trükkplaadi maandusplaadi disainimisel on tagada voolu kulgemise suund ilma katkestusteta. Igasugused pilud on lubamatud kuna nullivad positiivsed tulemused. Kui katkestuskohad on vältimatud või vajalikud näiteks kahekülgse osalise maandusalaga plaadi puhul, siis on oluline lisada voolusillad kõigi tundlike signaalide võimalikku lähedusse. [30] Üheks kõige levinumaks piludeks ehk maandusplaati läbivateks aukude ridaks on SIL ja DIL kerega integraallülitused. Pilude mõju avaldub kõige enam plaadi keskel asuvatele voolujuhtidele. Tagasivool hajub laiali pilu äärtele ning suureneb maandusinduktiivsus (suureneb häiringupinge selles maandusplaadi osas). Antud olukorra vältimiseks on hea lahendus sildade loomine iga ava paari vahele – selline lahendus võib suurendada häiringukindlust märgatavalt (mõni detsibell). [3]

4.2.3 Mitmekihilised plaadid ning pindkoostetehnoloogia

Suurte töökiirustega seadmete korral võib osutada oluliseks trükkplaadi disainimisel kasutada rohkem kui kahte kihti. Seejuures on oluline silmas pidada, et kihtide paigutamine ei toimuks suvalises järjekorras. Kõige tähtsamaks osutub iga kriitilise signaalikihi paigutamine maandusplaadi või vähem kriitilise signaali paigutamine toitepingekihi lähedusse. Saranaselt peavad ka toite ja maanduskihid paiknema naaberkihtidena. Jälgima peaks ka seda, et kriitilised signaalid ei kulgeks võimsuskihi

kõrval. Hea tavana tuleks maanduskiht ning võimsuskiht asetada kõrvuti sisemistele kihtidele. [20]



Joonis 4.3. Näide trükkplaadi kihtide paigutusest nelja kihise trükkplaadi korral. [31]

Pindkoostetehnoloogia üheks suureks eeliseks on selle võimalus kasutada trükkplaatidel väiksemaid komponente. Tänu väiksemate komponentide kasutus võimalusele väheneb märgatavalt ka kontuuride pindala. Lisaks sellele paranevad ka parastiit efektid just kõrgesageduslikes olukordades tänu komponentide korpuse kujundusele. Pindkooste ja maandusplaadiga trükkplaadi kujundus käivad käsikäes ning täiendavad vastastikku teineteist. [20]

4.2.4 Sisend ja väljundahelate ning maanduste kujundamine

Kõrgete sageduste filtreerimiseks on vaja kujundada trükkplaadile sisend- ja väljundjuhtmete jaoks eraldiseisev maandusala, ehk liideste maaühendus pind. Liideste maandusala osa peab olema ühendatud sisemise loogika maandusega ainult ühes punktis. Selline kujundus tagab, et häiringuvoolud ei saaks liikuda läbi liideste maandusala ning seda maandusala häiringute näol mõjutada. Juhul kui on oluline viia ühendusjuhtmed trükkplaadi erinevate osade juurde, tuleb siiski tagada nende maandamine eraldiseisvasse liideste maandusplaati. Liideste maandusplaati ei tohi seega läbida mitte ükski teine vool. [31]

Trükkplaadi maandusahelate eraldamise osas ollakse kahel erineval arvamusel. Esimene mõtteviis ütleb, et trükkplaadi digitaalhelate maandusala ei tohi mitte kunagi ulatuda analoogahelateni. Selle põhjuseks on digitaalsahelate häiringute sidestamine analoogahelatega. Selle arvamuse üheks tähtsaks põhimõtteks on ka see, et digitaalosa ei tohi olla ühendatud välise maandusega. Digitaal- ja analoogmaandusalade ühendus peab olema analoogdigitaalmuunduri juures ning realiseeritud üksikpunktühendusena. Digitaalosaga seoses olevad liidesed tuleb puhverdada – neid ei tohi ühendada digitaalosa maandusega. Puhveradmise võimalusteks on ühendus läbi optronsiolaatorite või releede. Sellele taskukohasemaks alternatiiviks on eraldi sisend- ja väljundmaandusega puhveraste. [3]

Teiseks maanduse kujundamise viisiks on juba eelnevalt käsitletud üksikpunkt nullsüsteem. Selle variandi kasutamise on oluline tagada, et trükkplaadil oleks kõrge kvaliteediga madaloomiline maandusala. Selle variandi kasutamise paratamatuks osaks on ühise näivtakistuse kaudu toimiv sidestus. Ainukene viis selle parandamiseks on lisaks maandusplaadi väikese näivtakistuse tagamisele trükkplaadi skeemide kujundused. Sellise kujundamisviisi kõige suuremaks nõrkuseks võib osutada tundlike analoogsignaali ja kõrgete töökiirustega digitaalsignaali liigne vastastikune häirumine. Teisalt on välistatud erinevate nullpunktide vaheline potentsiaalide erinevus, tänu millele võivad tekkida ka häiringud. [17]

Siiski võib pidada sisend- ja väljundahelate lahtisidestust mõlema maandusosa kujundamise korral äärmiselt oluliseks. Selle olulisus seisneb kaabli häiringuvoolu hoidmises võimalikult väiksena, et ei tekiks tahtmatuid häiringuid. Kaabli varjakesta ühendamisel valesti lahtisidestus kondensaatori suhtes on tagajärjeks väljakiirgav emissiooni allikas häiringupinge näol. Kaabli varjed tuleb alati ühendada punkti, kus on võimalik kõige väiksem näivtakistusega maandusala, seejuures peavad olema ühendatud sinna kõik kaabli varjed või signaali toiteühendused tehtud selle kaudu. [3]

4.2.5 Digitaal ja analoogahelate kujundamine

Digitaalhelad on üks suurimaid elektromagnetilise häiringu allikaid. Digitaalsüsteem sisaldab nelinurkse kujuga kõrgsageduslike impulsse, mis levivad üle kogu süsteemi. Peamiseks kiirgusallikaks digitaalhelates on protsessori taktgeneraator ja selle sagedusega seotud signaali harmoonilised. Analoogseadmed seevastu on palju tagasihoidlikuma iseloomuga, seda põhjusel, et nelinurkne kõrgsageduslaine neid tavaliselt ei mõjuta. Erandiks võib tuua laia sagedusvahemikuga videoahelad – nende ahelate edastusvõimed küündivad kümnetesse megahertsidesse. Lisaks sellele võivad ka kõrgel sagedusel (eriti mahtvusliku koormuse korral) mõned madalsageduslikud võimendusahelad võnkuma minna ja muutuda seeläbi häiringuallikateks. Näiteks lülitustalitusel töötav toiteallikas on arvestatav madala ja keskmise sagedusega häiringute allikas. [3]

4.2.6 Loogikalülituste valik ja emissioon

Põhiliseks loogikalülituste häirumise põhjuseks on tavaliselt häiringuimpulsside kiire tõusu- või langusaeg. Üldjuhul erineb see signaali hilistusajast ning ei ole lülituse andmetes määratud. Loogikalülituste riknemise minimeerimiseks on hea abinõu kasutada kõige aeglasemat tõusuaega, mis minimeerib kõrgemat järku harmooniliste amplituudi. Tänu sellele on häiringute välja kiirgamine väiksem. Suurendades puhtalt ainult tõusuaega 100 MHz juures, on võimalik saavutada häiringute paranemist 20 dB

võrra. Põhiliseks soovitusena loogikasekemide valikul on seega kiirete loogikasekemide vältimine, kui see on võimalik ja ei lähe vastuollu eeldatavate nõudmistega trükkplaadile. [3]

4.2.7 Häiringukindel programmeerimine

Oluliseks on hinnata seadme projekteerimisel häiringute mõju tootele ning vastavalt sellele saab muuta ka programmeerimisega seadet turvalisemaks, häiringukindlamaks ja sujuvamalt töötavamaks. Häiringutest tulenevaid anomaaliaid seadme töös on tavaliselt raske hinnata, kuid üldjuhul väljenduvad need programmi loendurite, spetsiaalsete registreerite või näiteks programmi mälu töös. Nende probleemide lahendamiseks on toodud kirjanduses näiteid küllaldaselt. [27]

4.3 Liidesed, filtreerimine ja varjestamine

4.3.1 Kaablid ja nende ühendused

Süsteemi või temaga sidestatud objektide peamiseks kiirgusallikaks on välised kaabelühendused. Nende mõju elektromagnetilisele ühilduvusele on suurim põhiliselt tänu nende pikkusele ning välistele elektromagnetiliste mõjude koostoimel. Tänu sellele on vaja seadmete liideste kujundus ning paigutus hoolikalt läbi mõelda. Diferentsiaalkujulised signaalid ei tohiks tekitada kaablites väljuvat kiirgust. Väga sageli on vaja signaalide edastamiseks kasutada varjestatud kaableid. Erandiks on toitekaablid ning madalsagedusliidesed, mille puhul on juba filtreerimine tagatud. [3]

Ülekoste vähendamiseks on mõistlik jagada kaablid erinevatesse liikidesse, kuna nii saab tagada edastavate signaalide ligikaudse ühesuuruse pinge ning voolu.

- Mürane – AC toide, elektrimootorid, maaühendus kerega, keevitusaparaadid, lairibalised signaalid, suure võimsusega raadiosagedusseadmed
- Nõrgalt mürane – DC toide, filtritega töötavad koormuslülitused, filtreeritud AC
- Nõrgalt tundlik – nõrgad madalsageduslikud signaalid, madala bitikiirusega digitaalsignaal
- Tundlik – Laiaribalised digitaalsignaalid, madala nivooga analoogsignaalid, raadiosageduslik vastuvõtja (sisend)

Lisaks sellele on oluline jälgida head tava kõrgsagedusvoolu kaablite paigutamist teistest kaablitest ning seadmetest võimalikult kaugemale isegi siis kui kaabel on

varjestatud. Sidestuse kaudu võib kanduda läheduses olevatesse kaablitesse üldkujuline emisioon. [3]

4.3.1.1 Kaablite varje maandamine

Optimaalseks elektromagnetilise ühilduvuse saavutamiseks on enamjaolt vaja kasutada kaablite varjestamist. Madalsagedusliku signaali korral kaablis on soovitatav maandada kaabli varje ainult ühes kaabli otsas. Selline lahendus on hästi sobilik madalsagedusel, mis tagab hea varje mahtuvuslikult sidestatud häiringute suhtes. Kõrgsageduslike signaalide puhul on olukord aga teine. Kõrgsagedusliku signaalijuhtme varje tuleb maandada juhtme mõlemast otsast. Selline varje kaitseb juhti magnetväljade eest, mis indutseerivad häiringupinge allika ja koormuse poolt moodustatud koontuuris. [3]

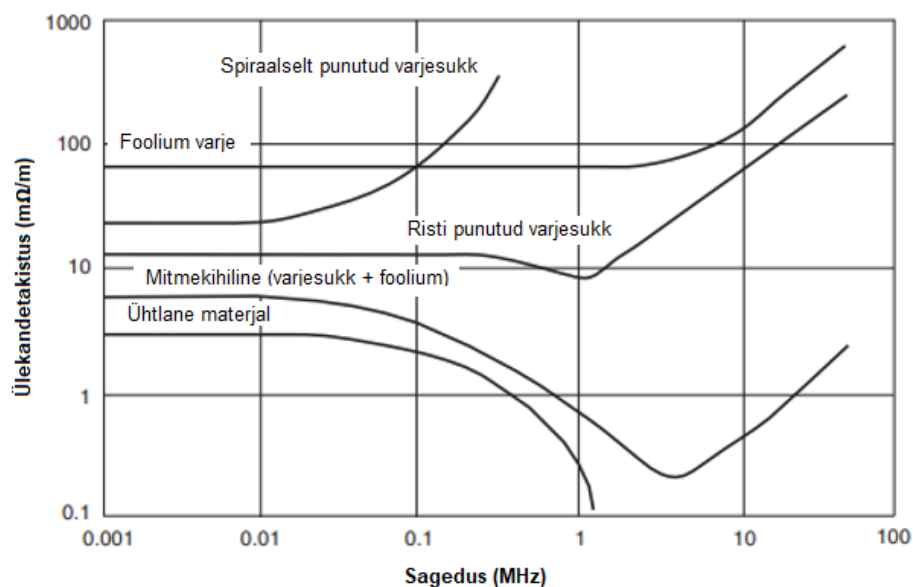
Kaabli varje maandamine mõlemas otsas tekitab siiski juurde kaks lisaprobleemi. Esimeseks probleemiks on see, et kaabli varje muutub sellise ühenduse korral vooluahela osaks ning iga varje takistusele mõjuv pinge osutub signaaliga järjestiku olevaks. Kahest otsast maandatud varje efekt on üsna piiratud kuna tema varje ahelas tekib suur häiringuvool. Varjes tekkinud häiringuvool põhjustab seega varje voolu pikisuunas mõjuva häiringupinge. Madalsagedusliku magnetvälja mõju minimeerimiseks tuleb ahela üks ots isoleerida maast, vähendada võimalikku voolu kontuuri pindala ning kujundada varje ühendused nii, et ta ei moodustaks ahela ühtset osa. Lihtsaim lahendus on kasutada varjega keerdpaar kaablit kuna selle varje on vaid ühest otsast maandatud. Maandamata ahelaga allikas tuleks seevastu kasutada moodust, kus varje on maandatud vastuvõtja sisendi poolel. Juhul kui selline moodus osutub võimatuks, tuleks varje maandada siiski allika poolel. Tänu sellele väheneb mahtuvuslik mürasidestus, siiski sageduse suurenedes väheneb maandamata otsa parasiitmahtuvus mõlema otsa varje mõju. [3]

Teiseks probleemi allikaks on olukord kus varje kahe otsa maanduste vahel tekib potentsiaalide erinevus. Sellise olukorra puhul tekib varjes üsna suur vool, mida piirab vaid varje ja selle potentsiaalide vahe allika impedants. Seejuures tuleb tähele panna, et need võivad olla väga väikesed ja vool kaabli "rikkumiseks" piisav. Antud olukord on üsna levinud ja selle vältimiseks on mõistlikum ebakindluse puhul maandada varje ainult ühes otsas. Üheks soovituslikuks mooduseks võib olla paralleelse maandusjuhtme kasutamine kogu kaabli pikkuse ulatuses. [3]

4.3.1.2 Kaabli varje ligiid

Võimalike kaabli varjestamise meetodeid on mitmeid. Kaabli varje omadused seejuures olenevad tema ehitusest. Enamlevinumad varje tüübid on:

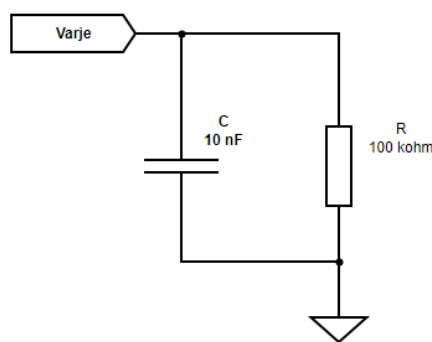
- Maajuhtme keerd (ingl. k Ground twisted pair) – maajuhe on mähitud keerdudena kaabli ümber. Omadustelt on üsna paindlik kuid väga kehva varjestusvõimega tänu ümbritseva varje puudumise tõttu. Kasutusala piirdub helisagedusega. [3]
- Varjesukk (ingl. k Braided shield) – Metallist punutud kattevõrk, mille kattevõime on umbes 80-95 %. Varje mõjutab teatud määral kaabli jäikust. Sobib kasutamiseks raadiosagedustel. [3] Lisaks sellele on olemas ka spiraalselt punutud kattevõrk (ingl. k Spiral braided shield). Antud juhe on paindlikum ning tänu spiraalselt punutud varjele voolab ka häiringuvool varjes spiraalselt. [30]
- Fooliumi või laminaatlindi varje (ingl. k Foil shield) – Varjesukaga võrreldes puuduvad avad, mistõttu moodustab ta täieliku varjestuspinna. Omaduste poolest on ta keskmise varje võimega, üsna paindlik ja väikese läbimõõduga. Mahtuvuslik varjestamine on väga hea, siiski ei sobi ta magnetiliseks varjestamiseks.
- Komposiitlint ja varjesukk (ingl. k Composite braided shield) – variant kus on ühendatud laminaatlindi ja varjesuka omadused. Tänu sellele on tal head kõrgsageduslikud omadused kuna mitmekordne sukk eraldab sise- ja välispinna voolud. Üldiselt on sellist tüüpi juhtmeid Saada nii madalsageduslikus varjestamiseks kui ka kõrgsageduslikuks varjestamiseks. [3]



Joonis 4.4 Mõõdetud juhtme varje ülekandetakistus ($m\Omega/m$) sõltuvalt sagedusest (MHz) erinevate varje tüüpide korral. [30].

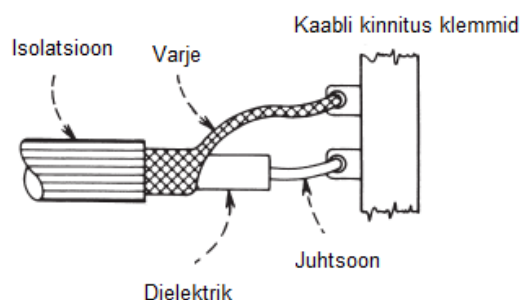
4.3.1.3 Kaabli varje ühendusviisid

Kaabli varje ühendamisel minimaalse võimaliku impetentsi saavutamiseks tuleb kaabli varje ühendada metallraami või otse korpuse külge. Parima varje ühenduse saavutamiseks on oluline jälgida, et varje ning seadme korpuse ühendus oleks jäik, samuti võiks varje ületada seadme gabariidid ning tänu sellele tervikliku varje. Üldises kasutuses leiab enim kasutust kaks varianti ehk "hobusesaba" ühendusviis ning varje kinnitamine metallklambri alla, mis on otseses ühenduses korpuse või metallsasiiga. Üheks lihtsaks kompromissiks varjestamiseks samaaegselt nii kõrge kui madalsageduse eest on ühendada varje üks ots madala induktiivsuse ja takistustega maandusesse ning teise otsa paralleelselt takisti ning kondensaator (vt Joonis 4.5). [29]



Joonis 4.5. Näide varjestamisest madal- ja kõrgsageduse eest. [29]

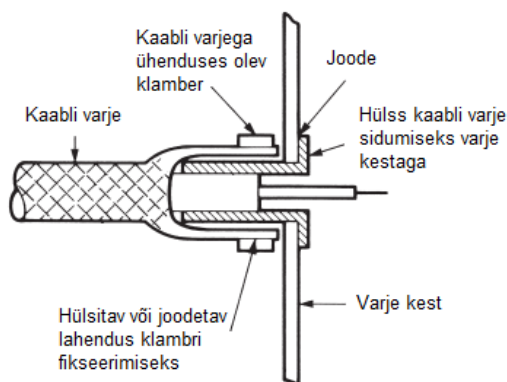
Hobusesaba kujulise ühendusviisi korral on varje toodud ühe juhtmega pistiku klemmile ning seejärel teiselpool pistiku maandatud (vt Joonis 4.6). Antud lahendus on üsna lihtne ning kergesti realiseeritav. Halvimal juhul võib olla siiski selline ühendusviis kõrgsagedusliku induktiivsuse tõttu üsna sarnane varje ühenduse puudumisele.



Joonis 4.6. Näide varje ühendamisest „Hobusesaba“ meetodil. [30]

Sellise ühendusviisi ekvivalentne pind-edastusimpedants suureneb sageduse tõustes üsna kiiresti. Tänu sellele väheneb varje mõju ning kõrgematel sagedustel muudab olukorra hindamise raskemaks omakorda tekkivad parasiitmahtuvusega impedantsid.

Hobusesaba ühendusviisi efektiivseks ulatuseks on varje lõpp-punkt ,läbi pistiku ja kuni raami või maandusplaadi küljes oleva ühenduspunktini. Varjestatud pistikute kestad tuleb alati ühendada nii, et nad on otseühenduses raamiga. [3] Hobusesaba meetodile paremaks alternatiiviks osutub varje 360° ühendus pistiku võimalikus läheduses varjekesta või kere külge. Sellisest ühendusviisist on toodud näide joonise 4.7 näol (vt. Joonis 4.7). [30]



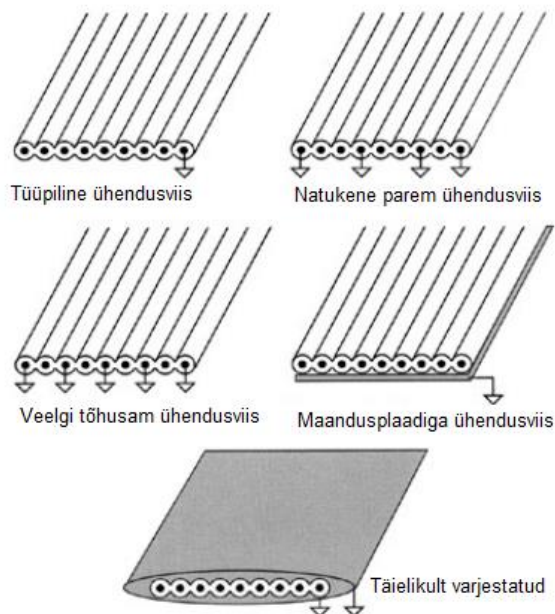
Joonis 4.7. Näide paremast alternatiivist „hobusesaba“ meetodile. [30]

4.3.1.4 Keerdpaar ühendus

Keerdpaar ühenduse puhul on suureks plussiks tema lihtsus nii magneetilise kui ka mahtvusliku häiringusidestamise vähendamiseks. Kuna juhe on keerutatud omavahel kokku, on kontuuride pindalad ligikaudu sama suured, tänu millele on hajutatud mahtvus ühtlaselt. Tänu sellele, et sidestuskontuuri pindala on nulli lähedane on ka madalsageduslikud häiringute magnetilised sidestused vähendatud. Heaks tavaks seejuures on hoida kokkukeerutamata ühendusjuhtmete pikkus minimaalne. Kui elektromagnetiline väli mõjutab kogu kaabli ühenduse pikkust on mõistlik kasutada rohkemate keerdude arvuga kaablit pikkusühiku kohta. [3]

4.3.1.5 Lintkaabel

Lintkaablit kasutatakse enim paralleelsel andmeedastusel. Juhul kui lintkaablis edastatakse kõrgsageduslike signaale ning kaabel liigub välja seadme varjestavast korpusest on lintkaabli täiendav varjestamine vajalik. Selle lihtsamaks realiseerimiseks on olemas ka juba koos varjega lintkaableid kui ka juhtmete all paikneva maandusplaadiga lintkaableid. Siiski ei ole enamjaolt lihtne lintkaabli varjet nõuetekohaselt kinnitada. Varje puudumisel lintkaabli puhul on kõige parem (odavam) lahendus paigutada maandusjuhe võimalikult kaabli keskmisesse soonde. Kui soonte arv ei ole piiratud on mõistlik kasutada eraldi maandusjuhete iga signaali jaoks – maandusjuhe on seega iga teine juhe. [30]



Joonis 4.8. Näited lintkaabli paremate EMC omaduste saavutamiseks. [31]

4.3.1.6 Feriitkoormusega kaabel

Kõige suurema osa kiirgusemisionist tekitavad kaabli varje üldkujulised voolud. Üheks heaks lahenduseks nende voolude vähendamiseks on paigutada kaabli ümber ferriit induktiivelement (vt Joonis 4.9). Ferriitelement paigutatakse tavaliselt kaabli ümber, võimalikult korpuse lähedale tänu millele induktiivsus suurendab kaabli takistust kõrgsageduslikule voolule, seejuures ilma normaalkujulist signaali muutmata. Alternatiiviks on ka kasutada kaablit painduva ferriitmaterjaliga varjestatud juhet. Nende kaablite puhul on siiski kehvaks asjaoluks nende hind ning kättesaadavus. Lisaks sellele on kaablit mõistlik kasutada ainult väga kõrgetel sagedustel. Näiteks sobib selline lahendus hästi siirdevoolude või elektrostaatiliste laengute juhtimiseks. [3]



Joonis 4.9. Feriitkoormuse kasutamine USB kaabli näitel. [30]

4.3.2 Filtreerimine ja häiringusummutus

Oluline teadmine müraga võitlemise puhul on see, et kunagi ei ole võimalik kõrvaldada täielikult juhtme kaudu seadmesse sisenevat või väljuvat müra. Seega ei ole filtreerimise eesmärk saada seade täielikult müravabaks vaid vähendada müra tasemeni, mis vastab seadme normidele või ei häiri ega mõjuta tema korrapärast toimimist. Filtreid võib olla erinevaid liike. Näiteks feriilementidega ja takistitega filtris on filtri eesmärgiks müra energia hajutamine ning neelamine. Seevastu kui filter on reaktiivsete omadustega, siis tema ülesandeks on peegeldada müra energia tagasi selle allikasse ning tänu sellele peab müra hajuma kuskil mujal süsteemis. Selline omadus filtri puhul muudab ta tavalistest filtritest erinevaks ehk filtri tähtsaks omaduseks on tõkkeriba võimalikult suur kadu. EMÜ puhul käsitletakse üldjuhul peaaegu alati madalpääs filtreerimist. [3]

4.3.2.1 Filtrite komponendid

EMI filtrite komponentide valimiseks on vaja mõista passiivsete komponentide käitumist kõrgetel sagedustel. Filtrite põhilisteks komponentideks on takisti, kondensaator ja induktiivpool. Valides filtrite komponente, tulenevalt rakendusest võib jaguneda näiteks filtri takisti kolmeks erinevaks klassiks, millel on omad eelised ning puudused. Takistite näol kasutatakse filtrites põhiliselt *wirewound* ehk traattakisteid, *Film type* takisteid ning süsinik komposiit materjalist takisteid. Induktiivpoolide puhul võib jagamise teha kaheks: magnetsüdamikuga ja ilma magnetsüdamikuta induktiivpoolid. Kondensaatorite puhul toimub jagunemine kolmeks: keraamilised kondensaatorid, elektrolüüt-kondensaatorid ja paber-kondensaatorid. Nii nagu iga toiteallikas ei ole ideaalne allikas, ei ole ka komponendid ideaalsed ning arvestama peab ka paratamatute parasiit-elementidega. [28]

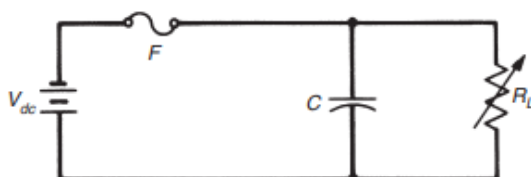
4.3.2.2 Filtrite tüübid

Filtrite tüübid jagunevad põhiliselt kaheks: *Common-mode* ehk üldkujulise signaali filter ja *differential-mode* ehk diferentsiaalkujulise signaali filter. *Common-mode* filtreid kasutatakse tavaliselt müra maha surumiseks kaablites lubades samal ajal diferentsiaal signaalil vabalt liikuda. *Common-mode* filtreid on tavaliselt keerukam disainida ning selle põhjuseks on see, et tavaliselt pole teada allika näivtakistus, koormustakistus ja filter ei tohi moonutada diferentsiaal signaali. *Common-mode* signaalide puhul on allikaks juhtmete poolt genereeritud müra ja koormus on tavaliselt mõni juhe, mis toimib justkui antenn, mille takistus pole teada ning varieerub vastavalt sagedusele. *Common-mode* filtrid paigutatakse tavaliselt võimalikult lähedale, kaabli sisenemis/väljumis kohale seadme korpuses. Diferentsiaal signaali filtrid tuleks seevastu võimalusel alati allikale võimalikult lähedale paigutada. [30]

Common-mode filtrid on tavaliselt madalpääs filtrid, mis koosnevad tavaliselt ühest kuni kolmest elemendist. Filtrite topoloogiad jagunevad kaheks, ehk üksikelement filtrid ja mitmikelement filtrid. Üksikelement filtrite puhul on tegemist üksiku jada elemendiga või ükisku jada šunt elemendiga (tavaliselt kondensaator). Mitmikelement filtrite puhul on kasutusel kolm põhilist topoloogiat. L-topoloogia, kus on kasutusel üks komponent ja üks šunt element. T-topoloogia, kus on kasutusel kaks komponenti jadamisi ning üks šunt element. π -topoloogia puhul on kasutusel kaks šunt elementi ja üks component jadamisi. Üksikelement filtrite eeliseks on nende lihtsus, mitmikelement filtrid seevastu on palju efektiivsemad ning tagavad parema sumbuvuse. [30]

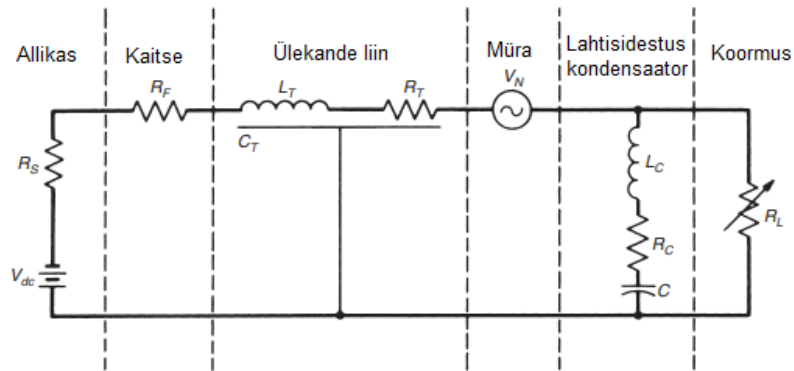
4.3.2.3 Sisend ja väljundfiltrid

Enamus elektroonika süsteemides on DC toite jagunemine seadmetele ühine. Sellest tulenevalt on oluline kujundada DC toiteahel selliselt, et sellest ei kujuneks välja põhilist häiringute levimise teed erinevate seadmestike vahel. Ideaalses olukorras on DC toiteallikas null takistusega vooluallikas – päriselus see nii aga ei ole. Tänu sellele kannavad and endas müra allikaid ühendatud seadmestike vahel ning igasugused ühendused (eriti kehvad ühendused) kaablite vahel suurendavad neid. Tänu sellele võib osutada toiteahela skeem väga erinevaks kui lisada algsele skeemile parasiitelemendid. Esimesel joonisel on kujutatud algset toiteahela skeemi, mille toiteallikaks on aku, kasutusel on kaitse mis on ühendatud koormuse ja mahtuvusega, mis on omavahel paralleelselt (vt. Joonis 4.10).



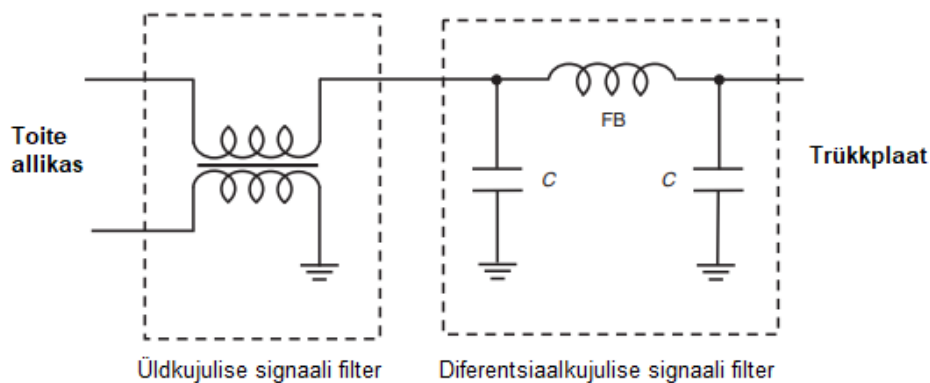
Joonis 4.10. Toiteallika esialgne skeem arvestamata parasiit elemente. [30]

Teisel joonisel on juurde lisatud parasiit elemendid (vt. Joonis 4.11).



Joonis 4.11. Toiteahela joonis mille puhul on arvesse võetud parasiit elemente. [30]

Sisend/väljundfilter peaks olema loomulik trükkplaadi disainimise osa ning üldjuhul võiks ta koosneda nii *common-mode* kui ka *differential-mode* osast (vt. Joonis 4.12).



Joonis 4.12. Näide toitefiltrist trükkplaadile. [30]

4.3.2.4 Siirdenähtuste summutamine

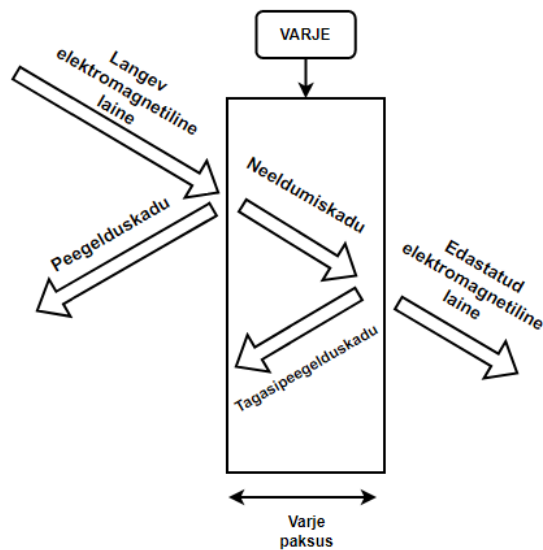
Signaali või toitejuhtmetes levivaid siirdenähtusi saab summutada mittelineaarsete elementidega. Näiteks on kõige sagedasemalt kasutatavad lahendused varistor, stabilisaatordiodid ja gaaslahendustoru. Siirdenähtuse summutamiseks peab seadet lülitama kaitstava kohaga paralleelselt. [3]

4.3.3 Varjestamine

Filtreerimine ja varjestamine on üksteist täiendavad meetmed. Filtreerimine kaotab oma eesmärgi, kui puudub filtreeritud voolude jaoks tagasivoolutee. Varjestuse eesmärgiks on tekitada tagasivoolutee ning lisaks sellele kaitsta sisemisi vooluahelaid ning juhtmeid sidestusvälja eest. Varjestuse üldiseks olemuseks on hästi juhtivate pindade paigutamine soovitud ahelate ning juhtmete ümber. Tänu juhtivuslikule kestile kriitiliste osade ümber väheneb elektromagnetilise välja mõju peegeldumise ja neeldumise toimele. Madalsagedusliku varjestuse vastu toimib hästi näiteks tavaline metallkest, kõrgsagedusliku (üle 30 MHz) varje materjaliks sobib hästi ka õhukene juhtiva pindkattega materjal. [3]

4.3.3.1 Peegeldumine ja neeldumine

Kui juhtivale seinale langeb elektromagnetiline laine, siis juhtivas seinas indutseeritakse vool. Osa voolust peegeldub juhtivalt seinalt siiski tagasi. Peegeldunud laine amplituudi mõjutab suuresti seinapeegelduskadu. Tänu varjeseina juhtivuse lõplikule omadusele tungib vool ka läbi seinaga, kus osa voolust jõuab seinavastasküljele, moodustades seal uue oma elektromagnetvälja (vt joonis 4.13). Seega varjestuse toime üheks näitajaks on langeva ja teiselt poolt väljuva laine suhe. Üldjuhul kehtib reegel, et mida paksem on sein, seda rohkem nõrgeneb teda läbiv vool. Neeldumiskadu mõjutab pinnaefekti sügavusvarjeseinas – elektromagnetiline omadus vahelduvvoolu korral, tänu millele vool kulgeb seinahüüses kihis pinna lähedal. [3]



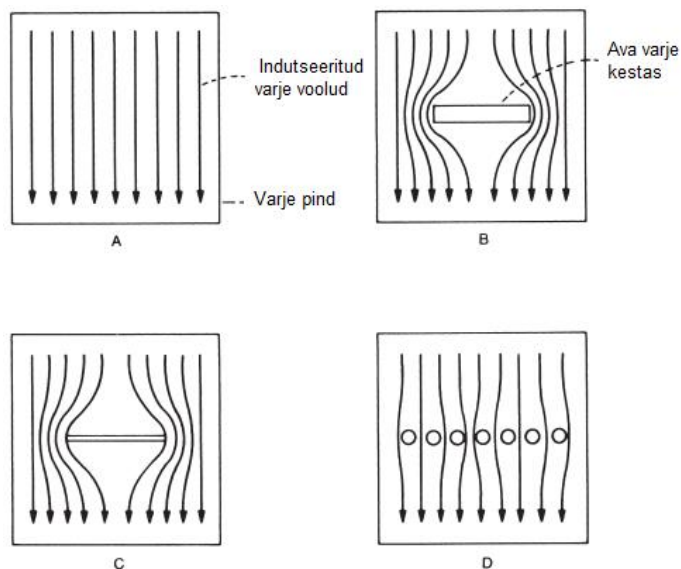
Joonis 4.13. Peegeldumine ja neeldumine varjeseinas. [28]

Peegelduskadu iseloomustab laineimpedantsi ja seinaimpedantsi suhe. Mida suurem on materjali juhtivus, seda suurem on tema elektrivälja peegelduskadu. Sageduste tõustes peegelduskadu väheneb kuna vähenevad elektrivälja kaod ning suurenevad magnetvälja kaod. Mida lähemal on allikas, seda suurem on elektrivälja impedants ning tänu sellele ka peegelduskadu. Kui allikas on kaugemal kui $\lambda/2\pi$ ei mõju vahemaa siseneva laine peegelduskaole. [28]

4.3.3.2 Avade mõju varje omadustele

Varjestamise efektiivsusele mõjub kõige enam varjes paiknevad vajalikud ning mittevajalikud avad ja ebaühtlused. Seadmete juhtimiseks, ventileerimiseks, hooldamiseks ning indikaatorite jälgimiseks on tihitpeale vajalikud lisaavad seadme korpuses. Avade puhul on ka nende kuju oluline – pikk ja kitsas pilu on halvim, ruut,

kuusnurk paremad ning ring neist kõige parem. Lisaks sellele mõjuvad ka juhtivate detailide omavahelised ühenduste ebaühtlused lekkena ehk avana. Tänu sellele ei ole praktikas tihitpeale võimalik saavutada materjalist ning väljaimpedantsist tulenevat suurimat sumbuvus. [19] Avade vältimatuse korral aitab sumbuvus parandada ka ava sügavuse (paksuse) lisamine, kui seade seda võimaldab. Seejuures peab varje sisse/välja ulatuv sügavus jääma pikem varje ava läbimõõdust. [30]



Joonis 4.14. Varje voolu liikumine varjepinnas, avade korral. [30]

Teoorias leiab mitmeid võimalusi avdest tuleneva varje mõju vähenemise arvutusteks. Kõige lihtsam võimalus kujundusvariantide hindamisel on meetod, kus arvestatakse, et varje efektiivsus on võrdeline ava kõige suurema mõõtmega ning sageduse suhtega. Antud olukorras arvestatakse, et nullväärtus on $\lambda/2L$ ning sellest tulenevalt (VE - varje efektiivsus) $VE=20\log(\lambda/2\pi)$. Selle meetodi puhul oleneb sumbuvus varjestavast materjalist ning väiksem ava tekitab väiksema languse. Pilukujulise ava korral tuleb arvestada ka parandusteguriga. Antud meetod ei ole siiski täpne viis reaalse sumbuvuse arvutamiseks. [28]

4.3.3.3 Võrk ja käre

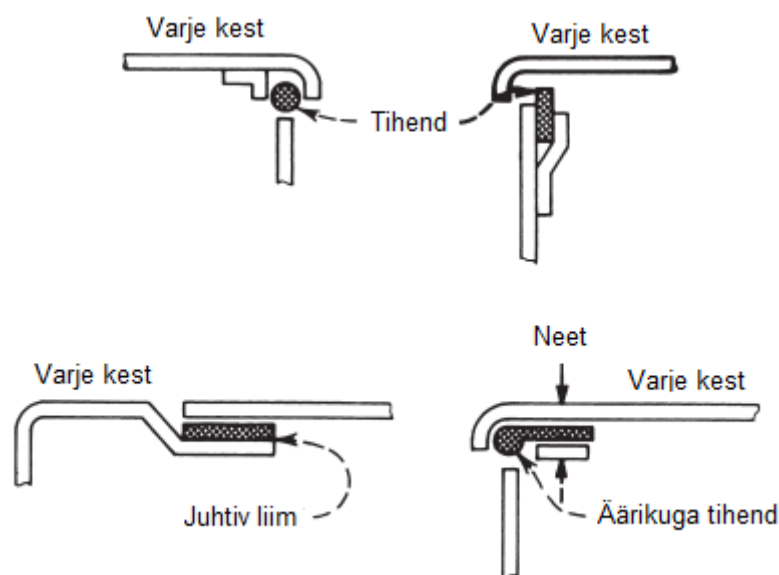
Kõige parem viis avade katmiseks on juhtivast materjalist võrk või paneel. Seejuures on võrgu puhul oluline, et mida rohkem väiksemaid avasid on võrgul, seda parem on ta võrreldes väheste ja suurte avadega võrguga. Üheks teisiks heaks meetodiks varjestuse parandamisel on võtta kasutusel kärepaneel. Kärepaneeli miinusteks on kaal. Käre puhul on üksiku ava suurus palju väiksem kui varje paksus. Käre puhul on iga ava suurus väiksem kui pool lainepikkust võimaliku kõige kõrgema välditava sageduse jaoks. Tänu sellele toimib käre alla lõikesaguduse lainejuhina. Käre

kasutamise puhul on oluline, et seda ei tohi kasutada juhtmete läbiviimiseks seadme kestadest. [3]

4.3.3.4 Varjeelementide liitekohad

Varjekestadete realiseerimine ühe kestana on pea võimatu olukord ning tavaliselt on vaja teha varjestuskest mitmest osast. Sellest tulenevalt on tavaline olukord, kus kahe paneeli ühenduskoha juhtivus on kehvem kui ülejäänud varje kestal. Enamasti on põhjusteks pindade kokkupuutel ebaühtlus, anodeeritud kate või ka korrusioon. Kõik mainitud põhjused mõjuvad varje puhul isoleeritud kihina. Tänu sellele väheneb varje efektiivsus umbes sarnaselt avade mõjule varje kestadest. Seejuures on kõige halvem variant pikk ja kitsas pilu kestadest vahel (vt. Joonis 4.14). Eriti kehv on olukord siis, kui see pilu on risti elektrivälja vektoriga. Antud olukorra lihtsaimaks lahendamiseks on mõistlik jagada pikk pilu kaheks lühemaks osaks, tänu millele paranevad varjestuse omadused märgatavalt. [3]

Varjestamise efektiivsust saab parandada, kui tekitada projekteerimise käigus kestadest ühenduskohtadele ülekate. Oluliselt parandab seejuures ka efektiivsus kui paneelide omavaheline kaugus on võimalikult minimaalne. [19] Olukordadeks kus vahekauguse minimaliseerimine ei ole võimalik on olemas erinevate tootjate poolt pakutavad juhtivad tihendid (vt. Joonis 4.15). Selliseid tihendeid on saadaval nii punutud traatvõrena kui ka elastsete lintidena. Nende efektiivsus sõltub seejuures nende korrektsest kasutusest ning varjestuse materjali ning kesta omavahelisest sobivusest (ja ka ühendusest). [3]



Joonis 4.15. Einavad näited varjekestadest tihendamisest. [30]

5. FEST21 TUDENGIVORMELI ELEKTRISÜSTEEMI KIRJELDUS

Enne kui asun kirjeldama FEST21 tudengivormeli elektrisüsteemi, on oluline ära mainida Formula Student võistlussarja reegleid. Võistlussarja reeglid pärinevad Sakasamaal korraldatavast võistlusest FSG, mille reegleid järgivad enamjaolt kõik Euroopa Formula Student võistlussarja korraldajad. FSG reeglid seavad nii vormeli kui ka vormeli elektrisüsteemi disainimisele teatavad piirangud ohutuses ja üldises konseptsioonis. Põhilised piirangud ja nõudmised elektrivormeli elektrisüsteemi projekteerimisel on toodud välja kogu reeglite komplektis T11 ja EV1-8, mille seast tootsin välja mõne olulisema reegli elektrivormeli projekteerimisel:

- EV 2.2.1 TS võimsus (TS) akupaki väljundis ei tohi ületada 80 kW.
- EV 4.1.1 Maksimaalne lubatud pinge kahe ühenduse vahel on 600 V DC ja mootori kontrolleri/inverteri madal sisemine võimsuse kontroll signaal 630V DC.
- T 11.1.2 Maksimaalne lubatud pinge mis võib tekkida kahe elektrilise kontakti vahel LVS puhul on 60 V DC ja 25 V AC RMS. [1]

FEST21 elektrivormeli lihtsustatud elektrisüsteemi plokk skeem on toodud lisa 2 all (vt lisa 2).

5.1 FEST21 akupaki ja elektroonika sektsiooni kirjeldus

FEST21 elektrisüsteem on jagatud kahte ossa. Kõrgepinge, mis on FEST21 vormeli puhul maksimaalselt 600 V DC ja madalpinge, mis on 24 V DC. Vormeli toiteallikaks on tiimi siseselt disainitud akupakk. Akupakist liigub kõrgepinge edasi akupaki elektroonika sektsiooni, kus on paigutatud kõik akuhaldusega seotud seadmed ning toimub kõrgepinge muundamine vastavalt kõrgepingest madalpingeks. Akupakist väljub kaks pistikut kogu ülejäänud süsteemi jaoks – ühes vastavalt madalpinge 24 V ja teises kõrgepinge 600 V.

5.1.1 Akupakk

Akupakk on disainitud ja projekteeritud tiimisiselt vastavalt FSG reeglitele ning tavadele. Akupakk koosneb kuuest jadamisi ühendatud moodulist, mis annab maksimaalse pinge 600 V DC. Akupakis kasutatakse kokku 288 Melasta tootja LiPo elementi, mis on ühendatud konfiguratsiooniga 144 jadamisi, kaks rööbiti (144S2P).

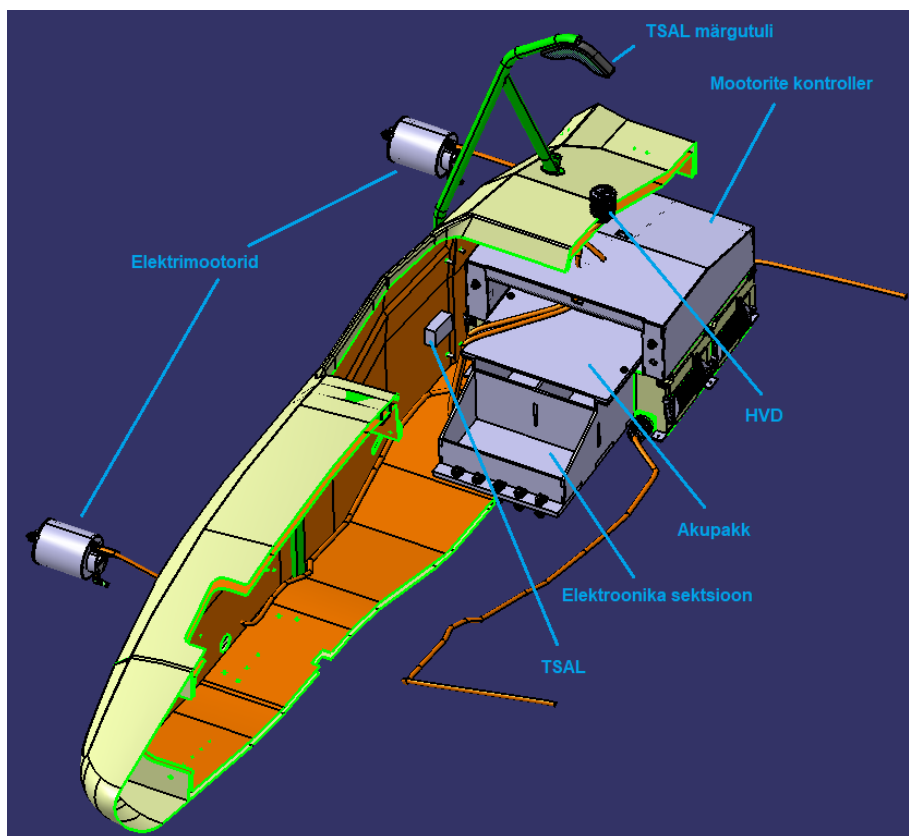
Ühe elemendi mahtuvus on 6800 mAh ehk kogu akupaki mahutavuseks on 7200 Wh. Elementide mahutavus on valitud vastavalt sellele, et energiat jääks akupakki peale kestvussõitu, üle veel ühe ringi jagu. Akupakk on vormeli puhul kõige raskem osa - sellest tulenevalt on oluline projekteerida akupakk võimalikult kerge, kuid töökindel ning ohutu.

5.1.2 Elektroonika sektsioon

Elektroonika sektsioon on ühtne osa akupakiga. Elektroonika sektsioon jaguneb omakorda kolmeks: kõrgepinge komponendid, nii kõrgepinge kui ka madalpinge komponendid ja ainult madalpinge komponendid. Kõrgepinge komponentide alla kuuluvad vastavalt IVT, AIL, DC/DC eellaadija (precharge), põhikaitse ja releed. Nii kõrgepinge kui ka madalpinge komponentide hulka kuuluvad: IMD, RMS ja kõrgepinge DC/DC muundur. Madalpinge komponentide alla kuuluvad: AMS ülem (master), AMS alamad (slaves), ohutus (safety) ja madalpinge DC/DC muundur. Nende trükkplaatide eesmärk on tagada akupaki ohutus ehk kõrgepinge lülitus, elementide temperatuuri ja pinge mõõtmine ning kõrgepinge muundamine madalpingeks. Elektroonika sektsiooni põhiprobleemiks on seejuures ruumi puudus – tänu sellele on enamus trükkplaatide ning seadmed pakitud üksteisele väga lähestikku.

5.2 FEST21 kõrgpinge elektrisüsteemi kirjeldus

Kõrgepinge elektrisüsteem, mis jääb väljaspoole akupakki, koosneb mootoritest ja mootorite kontrollierist. Mootorite kontrollier koosneb omakorda mitmest erinevast trükkplaadist. Kontrollieris on lisaks alalisvoolu muundavatele kõrgpinge trükkplaatidele (inverteritele) ka madalpinge trükkplaadid, mille ülesanneteks on loogika lülitused ning mootorist ja inverterist kogutavate andmete töötlemine. Kõrgepinge elektrisüsteemi hulka võib arvata ka TSAL trükkplaadi, mille ülesandeks on mõõta kõrgepinge klemmidelt pinget ning vastavalt sellele juhtida analoogloogika abil reeglitest tulenevat turvakaare ülalosas asuvat TSAL märgutuld. Märgutulel on kolm erinevat olekut, mis kirjeldavad vormeli elektrisüsteemi olekut ning annavad ümbritsevatele inimestele märku, kui kõrgepinge ahel on vormelis aktiveeritud. Lisaks sellele on kõrgepinge osana ka andmelugeja, mis antakse võistlustel korraldajate poolt ning on kohustuslik kõigil meeskondadel paigaldada nõuetele vastavalt vormelisse. Andmelugeja ülesandeks on koguda infot kõrgepingesüsteemis toimuva kohta, et valideerida meeskondade kõrgepinge ahela vastavust reeglitele. Andmekoguja on paigutatud FEST21 vormeli puhul mootorite kontrollieriga samasse korpusesse ning on ülioluline paigaldada vormelis nii, et andmed ei läheks tänu EMI mõjule kaduma või ei oleks seadme töö võistluste vältel häiritud.



Joonis 5.1. FEST21 kõrgepinge elektrisüsteemi paigutus vormelil.

5.2.1 Mootorite kontrolleri

Inverter ehk vaheldi on loodud täitma ülesannet, et muuta alalisvool kindla sageduse ja väärtusega vahelduvvooluks. Inverterites kasutatakse kontrollitavaid pooljuhtseadmeid nagu näiteks transistore, GTO türistore ja SCR-e. DC toitevoolu allikas on inverterite puhul tavaliselt akupakk, mis on võimeline toitma inverterit mootorite koormamisel ja vastupidi ka mootorite regeneratiivsel pidurdamisel akupakki laadima. Vaheldid on tavaliselt disainitud andma väljundiks ühe faasilist signaali kui ka kolmefaasilist signaali. Üldjuhul vajavad suurema võimsusega mootorid juhtimiseks kolme faasi signaali ning väiksemad 100-200 W koormused ühe faasilist väljundsignaali. [7]

FEST21 kasutab vaheldina AMK tootja inverterit, mis on Saksamaa firma toodang. AMK on spetsialiseerunud elektriajamite, tööstusautomaatika ja juhtimisseadmete tootmisele. AMK firma on välja kasvanud perekonna ettevõttest ning nende peakontor asub Saksamaal. Lisaks tavatoodetele valmistab AMK spetsiaalselt Formula Student võistlussarjale AMK Racing Kit-i, mis koosneb mootoritest, inverterist, tarkvarast ja tehnilisest toest. [4]

FEST21 mootorite juhtimine toimub läbi seadepunktide edastamise. AMK kontrolleri tööpõhimõte koosneb PID kontrolleri seadepunktide edastamiseks. Seadepunktide edastamist kontrollib ECU läbi CAN bus liini. Saadud seadepunktid teisendab inverter väljundina ümber vooludeks ning edastab need mootoritele. Mootorite juhtimiseks läbi AMK inverteri on kaks erinevat võimalust. Esimeseks võimaluseks on mootorite juhtimine mootori pöörlemiskiiruse järgi. Teiseks võimaluseks mootorite juhtimisel on pöördemomendi juhtimine. Eelis pöörlemiskiiruse juhtimisel pöördemomendi ees on nii pöördemomendi kui ka pöörlemiskiiruse piiramine. Lisaks sellele on AMK kontrolleri olemas ka PI kontrolleri näol välja nõrgestamise võimalus ajamitele. Välja nõrgestamise režiimi aktiveerimise eeliseks on võimalik kõrgem ajami pöörlemiskiirus ja tänu sellele ka suurem võimsus. [5]

5.2.2 Mootor

Mootorina kasutab FEST21 neli AMK mootorit. Mootoriks on sünkroone püsिमagnetitega servomootor DD5-14-10-POW-18600-B5. [5] Mootorid on paigutatud elektrivormelil väljaspoole kere, eraldi ratta käändmikutesse. AMK mootori põhilised parameetrid on toodud allolevas tabelis (vt Tabel 5.1).

Tabel 5.1. AMK mootori DD5-14-10-POW-18600-B5 parameetrid [6]

Maksimaalne pöördemoment	21 Nm
Nominaalne pöördemoment	9.8 Nm
Maksimaalne pöörlemiskiirus	20000 rpm
Nominaal ping	350 V
Maksimaalne vool (rms)	105 A
Pooluste arv	10

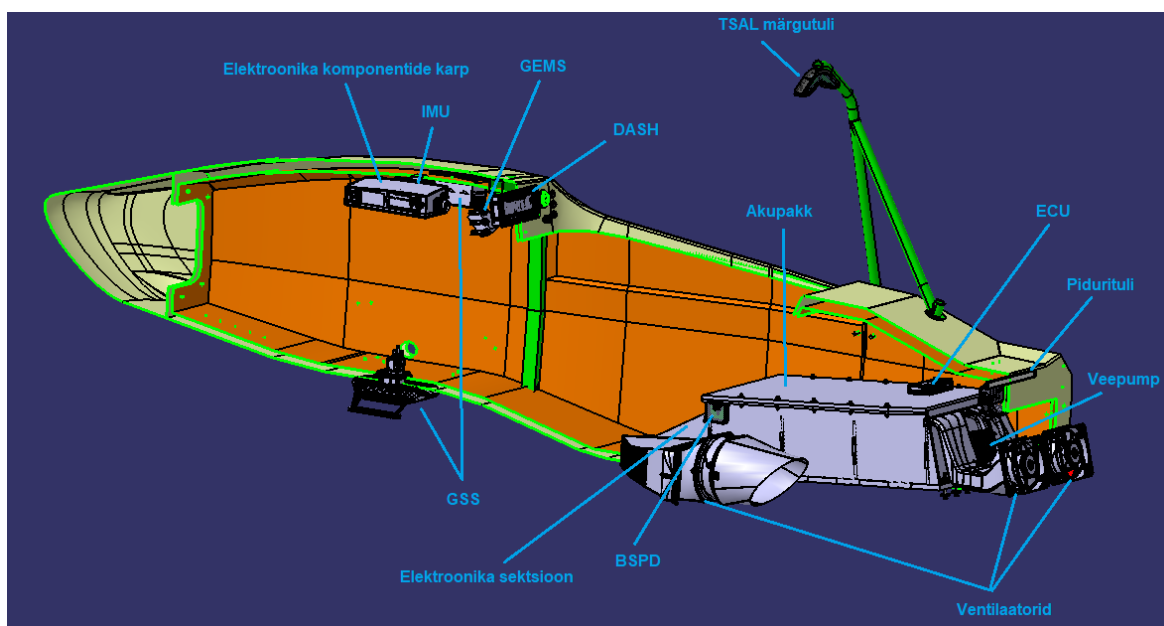
Sünkroonsel püsिमagnetitega servomootoril on staatormähis kolme faasiline. Staatormähise toitmine toimub läbi vaheldi ehk inverteri, mis omakorda saab signaali rootori asendi andurist ehk enkoodrist. Maksimaalse pöördemomendi tagamiseks hoitakse staatori ja rootori väljade vaheline ruuminurk konstantne, üldjuhul 90°. Püsिमagnetid võib kinnitada nii rootori pinnale kui ka rootori sisse, vastavatesse süvenditesse. Püsिमagnetite süvistamine rootorisse võimaldab saada õhupilus suuremaid väljatugevusi. Tänu sellele paraneb ka ajami töökindlus, moment, võimsus, välja jaotus pooluste pinnal ning väheneb momendi müra ja pulsatsioon. [8]

Oma olemuselt on sünkroone püsिमagnetitega servomootor pöördkonstruktsiooniga mootor – ergutusvälja tekitamisel kasutatavad püsिमagnetid on viidud staatorilt rootorile ja selleks, et ei oleks vaja juhtida voolu pöörlevast osast paigalseisvasse, on

viidud kommuteeriv mähis vastupidiselt rootorilt staatorile. Liigpinge eest kommutaatoris kaitseb vastav elektri skeem. Sünkroonse püsिमagnetitega servomootori staatorväli pöörleb rootorväljaga sünkroonis. Erinevuseks sünkroonmasinaga on see, et staatorivoolu sagedus ja masina pöörlemiskiirus ei ole võrdsed. [8]

5.3 FEST21 madalpinge elektrisüsteemi kirjeldus

Madalpinge elektrisüsteem koosneb põhiliselt paljudest erinevate funktsioonidega trükkplaatidest, ventilaatoritest, veepumbast, anduritest ning muudest reeglitest tulenevatest vajalikest elementidest. Põhiliselt paiknevad trükkplaadid vormeli nina pool monokokk-kere laes elektroonika komponentide karpis või väljaspool karpri eraldi kestades. Veepump asub vormeli tagaosas ning ventilaatorid väljaspool vormeli monokokki aerodünaamika elementide peal. Elektroonika komponentide karpri kuuluvad DASH led, telemetria, sensorika ja raadioside trükkplaadid.



Joonis 5.2. FEST21 elektrivormeli madalpinge seadmete paigutus.

Madalpinge elektrisüsteem vormelis kasutab andmete edastamiseks ning seadmete omavaheliseks suhtluseks CAN bus 2.0 andmeedastus liine. CAN bus liin on elektrooniline andmeedastus liin, mille andmeedastuse, juhtmestuse ning kuidas on sõnumid koostatud määrab ära standard ISO 11898. [24] CAN liini kaudu toimub suhtlus kõigis seadmetes, mille vahel on vajalik andmevahetus. CAN liini juhtmestusena on vormelis kasutusel kolmesooneline juhe, mida katab varje. Varje on maandatud ainult ühest punktist, isoleeritud maandusest ehk elektroonika sektsioonist

AMS trükkplaadile võimalikult lähedalt. Lisaks sellele on kasutusel ka ethernet liides kontrolleri seadistuseks, mida sõidu ajal kasutada vaja ei ole. Maakiiruse mõõtmise sensor ehk GSS kasutab trükkplaatide omavaheliseks suhtluseks varjestatud I²C liidest. Lisaks sellele on varjestatud tundlikemate analoog andurite signaalid. Toitejuhtmed ning mõningad signaalid on jäetud varjestamata.

5.4 FEST21 elektromagnetilise ühilduvusega seotud probleemid

FEST21 puhul ei esinenud hooaja vältel suuremaid probleeme elektromagnetilise ühilduvusega. Selle üheks peamiseks põhjuseks võib olla eelnev korralikult läbi mõeldud juhtmestus ehk tundlikemate signaalide varjestamine, maandamine ning kõrgepinge ja madalpinge võimalikult suur lahus hoidmine. Üheks teiseks oluliseks põhjuseks võib olla varjestatud trükkplaatide kestad. Siiski selle kohta tiimi sisesed teadmised piirduvad ainult algteadmistega, varjestamise ja maandamise headest tavadest. Väiksemate probleemidena hooaja jooksul on täheldatud väiksemaid tippväärtuseid andmekoguja logides. Siiski pole need mõjutanud suuremal määral teiste seadmete tööd. Testimis perioodil esines probleeme ka GSS maasensori trükkplaadi ning arvuti vahelist andmete häirimist peale mootorite kontrolleri sisselülitamist. Selle probleemi lahendas tundliku I²C juhtme varjestamine.

Põhiprobleem elektromagnetilise ühilduvusega seisneb teadmatuses. Teadmatus muudab elektroonikud ettevaatlikuks ning lahendused, mis võiksid muuta elektrivormeli dünaamikat paremaks ei julgeta läbi viia kuna puudub kindlustunne elektroonika seadmete edasise töökindluse ning korrapärase toimimise osas. Samuti aitaks mõõtesignaalide müra vähendamine kaasa juhtimissüsteemi täpsusele, mis omakorda aitaks kaasa vormeli üldisele võimekusele. Teadlikkus elektromagnetilise ühilduvuse kohta, selle mõõtmine ning oskus häiringutega võitlemise kohta annab tiimile tulevikus vabamad käed kiirema ja töökindlama vormeli projekteerimisel ning elektromagnetilise ühilduvusega seotud probleemide ennetamisel.

6. FEST21 TUDENGIVORMELI ELEKTROMAGNETILISE ÜHILDUVUSE MÕÕTMISED

FEST21 tudengivormeli puhul on tegemist üsna kompleksse süsteemiga. Elektroonikat ja seadmeid on palju ning lisaks sellele on nende paigutus ka üsna lähestiku paiknev – see on paratamatu reeglitest paika pandud disaini osa. Tulenevalt sellest kuuluvad elektrisüsteemi seadmed, milleta elektrivormel ei ole võimeline liikuma ning seadmetest, mis panevad vormeli kiiresti liikuma või koguvad kiireks liikumiseks vajalike andmeid. Lisaks sellele on ka vormelil hulk reeglitest tulenevaid seadmeid ohutuse tagamiseks. Tulenevalt sellest oleks esmane prioriteet sooritada mõõtmised seadmetel, tänu mille mitte toimimisel ei ole vormel võimeline paigalt liikuma või mille häirimise korral vormel läheb vastuollu projekteerimisel kehtestatud võistluse reeglitega. Kuna ka selliseid seadmeid on üsna palju, otsustasime uurimis valdkonda kitsendada ja keskenduda mõõtmiste puhul esmalt FSTT isearendatud trükkplaatide elektromagnetilise ühilduvuse uurimisele.

6.1 Mõõteaparatuuri ja objekti kirjeldus

Antud lõputöö praktilise osa sooritamiseks on võimalus kasutada TTÜ NRG-127 laboris paiknevaid elektromagnetilise ühilduvuse seadmeid. Töö sooritatakse standardi EN 61000-4-20 [15] põhjal. Standard EN 61000-4-3 sisaldab üldise kajavaba kambri kirjeldust ning häiringukindluse mõõtmiseid ristlaine kabris. [14] Standard EN 61000-4-20 seevastu sisaldab põhjalikumalt kirjeldust, TEM kambrite põhilisi karakteristikuid ja limiite TEM lainejuhtidele, nimetab testimis mahu, välja korratavuse, TEM režiimi puhtuse ja sagedusvahemikud. Tulenevalt standardist on vaja selleks koostada katsetusplaan, mis sisaldab seadmeid testi sooritamiseks, testitava seadme grupeering ning sellega seotud seadmed, keskkonna tingimused, kriteeriumid häiringutele/immuunsusele antud seadme standardist, mille hulka ta kuulub, soovitusel EMÜ saavutamiseks ning pildid või joonised testitavast seadmestikust. [15]

Sõidukitele kehtib standard EN 55012 ning nende sees olevale seadmestikule EN 55025, elektrisõidukitele seevastu aga EN 55036. Antud mõõtmiste korral ei ole võetud arvesse standardeid EN 55012, EN 55025 ja EN 55036 ja kõik eelvastavuskatsed ning katsed on läbi viidud standardi EN 61000-4-20 põhjal. Ristlaineekambris sooritatakse trükkplaatide kiirguslikud emisiooni mõõtmised, tehakse parendusi ning võrreldakse saadud tulemusi omavahel. Antud katsetuste eesmärgiks ei ole teha vastavushindamist trükkplaatidele vaid saada tulemused standardi EN 61000-4-20 põhjal 10 meetri kaugusele teisendatud väärtustele ja sama katset ei ole

korratud kolm korda. Tulenevalt mõõte tulemustest ning analüüsist antakse lõputöö viimases osas soovitusi, kuidas tagada võimalikult häiringuvaba elektrisüsteem tulevastel elektrivormelitel.

6.1.1 Mõõteaparatuur

GTEM cell on kõrgesageduslik versioon TEM cell ristlaine kambrist, mida kasutatakse EMÜ mõõtmiste läbiviimiseks. GTEM cell leiutati 1984. aastal ASEA Brown Boweri Ltd. (ABB) Poolt Šveitsis. GTEM kamber on oma olemuselt kitseneva kujuga kamber, mille ühes otsas on üks port ja lairibaline ühendus. See ots koosneb 50 oomise takistusega maandusplaadist madalsageduste jaoks ja püramiidneelduritest kõrgete sageduste jaoks. Püramiidneeldurid on paigaldatud sfääris nii, et püramiidide neelduri otsad on suunaga GTEM kambri kitsama otsa suunas. [16]

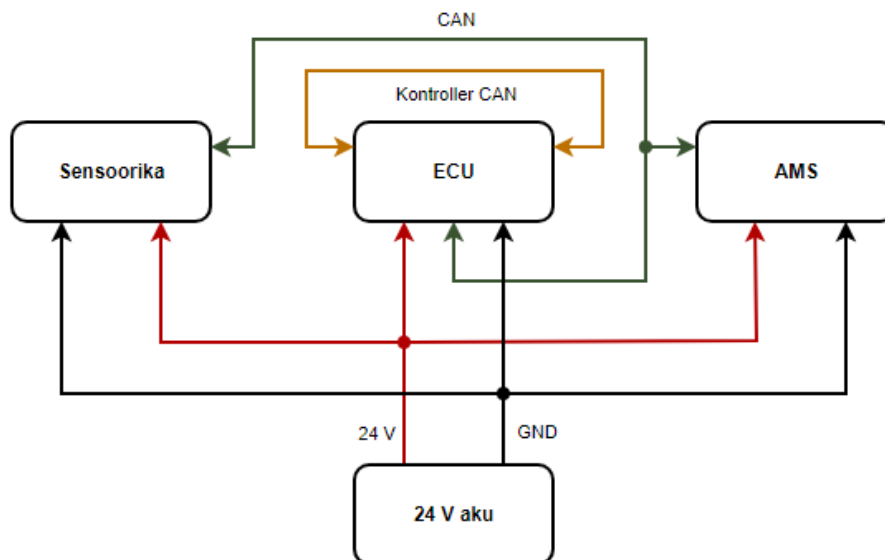
TTÜ NRG-127 laboris on kasutusel EN 61000-4-20 standardile vastav kamber GTEM cell 750 tootjalt Frankonia, mille maksimaalseks testitava seadmestiku võimalikeks mõõtudeks on 25x25x25 cm. Antud ristlaine kambri mõõdetav sagedusvahemik on 0.01 MHz – 20 GHz. [21] Andmete analüüsimiseks on kasutusel spektrianalüsaator tootjalt Rohde & Schwarz, mille sagedusvahemik jääb 9 kHz kuni 6 GHz vahele. [22] Täiendavalt on probleemide põhjustajate välja selgitamiseks või analüüsimiseks olemas ka lähivälja proovikute komplekt, mis on spektri analüsaatoriga samalt tootjalt ja mille sagedusvahemik on 9 kHz – 1 GHz. [23] Lähivälja proovikute komplekt koosneb elektrilise välja lähiproovikust ning magnetilise lähivälja proovikust, mis tuleb omakorda ühendada spektrianalüsaatoriga.

6.1.2 Mõõteobjekti kirjeldus

Mõõteobjektiks on valitud kolm FSTT isearendatud trükkplaati. Nendeks trükkplaatideks sai valitud ECU, ehk vormeli keskkontrolleri ülesannet täitev trükkplaat. AMS ehk akuhaldussüsteemi *master* trükkplaat ning kolmandaks seadmeks valitud sensorika trükkplaat, mille ülesandeks on vormeli esiotsas olevate andurite info kogumine ja kogutud info edastamine läbi CAN bus liini ECU-le.

Katse läbiviimiseks sai tehtud katsetuste tarbeks ühekordne juhtmestus, mis koosnes toitejuhtmetest, maandusest ning CAN bus liinist trükkplaatide vaheliseks suhtluseks. Lisaks sellele sai ühendatud kontrollerisse mineva CAN liini vahele sild CAN suhtluse implementeerimiseks kontrolleriga. Võimalikult reaalse olukorra tekitamiseks sai varem mõõdetud CAN liini koormuse põhjal tekitatud sarnase koormusega andmete vahetuse koormus, mis esineb reaalsetes olukordades. Lisaks CAN suhtlusele sai

koodiga muudetud ka PWM sageduse pulsilaius modulatsioon vastavaks ventilaatori maksimaalsele pulsilaiusmodulatsioonile – seejuures päris ventilaatorit külge ei ühendatud. Trükkplaatide toiteks sai ristlaine kambrisse paigaldatud 24 V aku, mille toite ning maandusjuhe sai punutud keerdpaar juhtmena.



Joonis 6.1. Mõõteobjekti plokk skeem.

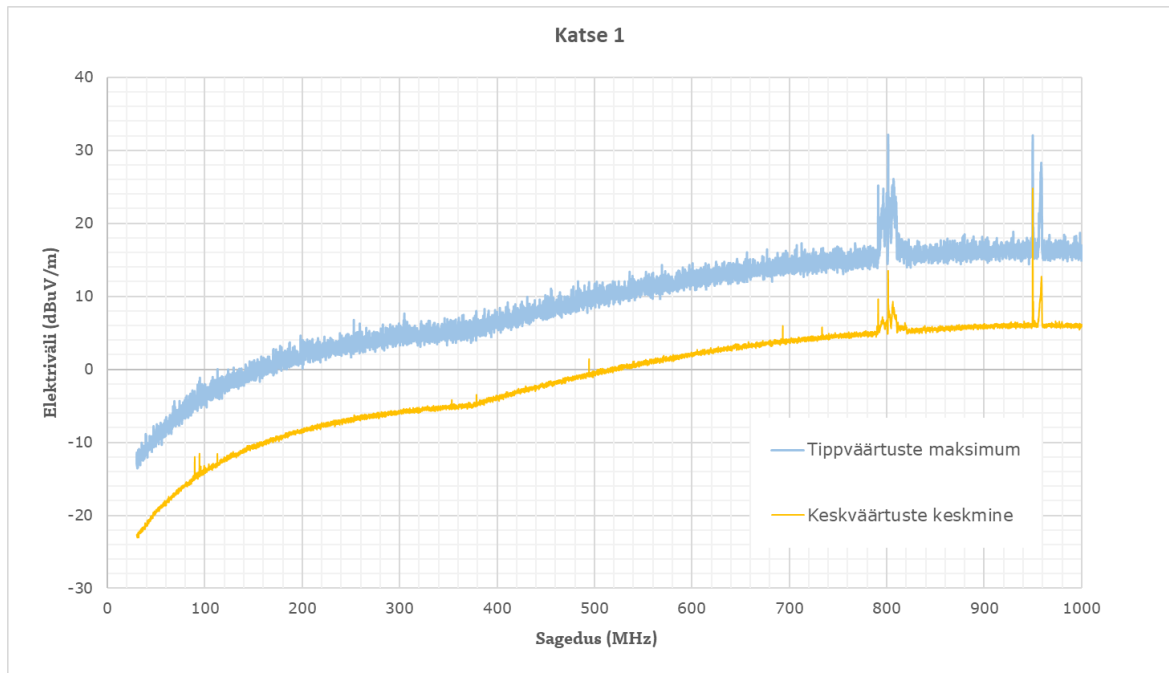
Katsetuste käigus sai tehtud mitu erinevat mõõtmist. Iga mõõtmisele eelnes parendus või muutus mõõdetavas seadmestikus. Katsetatud sai nelja erinevat meetodit, esmane mõõtmine toimus tühjas kambris ilma seadmestikuta. Muutuste järel asetati seadmestik kambris võimalikult eelnevale paigutusele sarnaselt.

1. Tühja kambri mõõtmine
2. Seadmestik ilma CAN liini varjestusega ning ilma trükkplaatide korpusteta
3. Seadmestik CAN liini varjega ühendatud ühes punktis (AMS) isoleeritud CAN maandusega (ka kontrolleri CAN varjestus on ühendatud CAN varjestusega)
4. Seadmestik CAN liini varjega ühendatud ühes punktis (AMS) üldise maandusega ning ECU alumiiniumist korpust, mis on ühendatud üldmaandusega.

6.2 Mõõtetulemused ja analüüs

6.2.1 Katse 1

Katse 1 sooritati tühja kambri mõõtmisena, saamaks referents tulemus (vt joonis 6.2). Iga mõõtmise puhul kasutati häiringute tuvastamiseks 60 skaneeringut, mille tulemused salvestati. Mõõdeti skaneeringute suurimat väärtust ehk tippväärtuse maksimumi ja keskvaartuste keskmist väärtust.

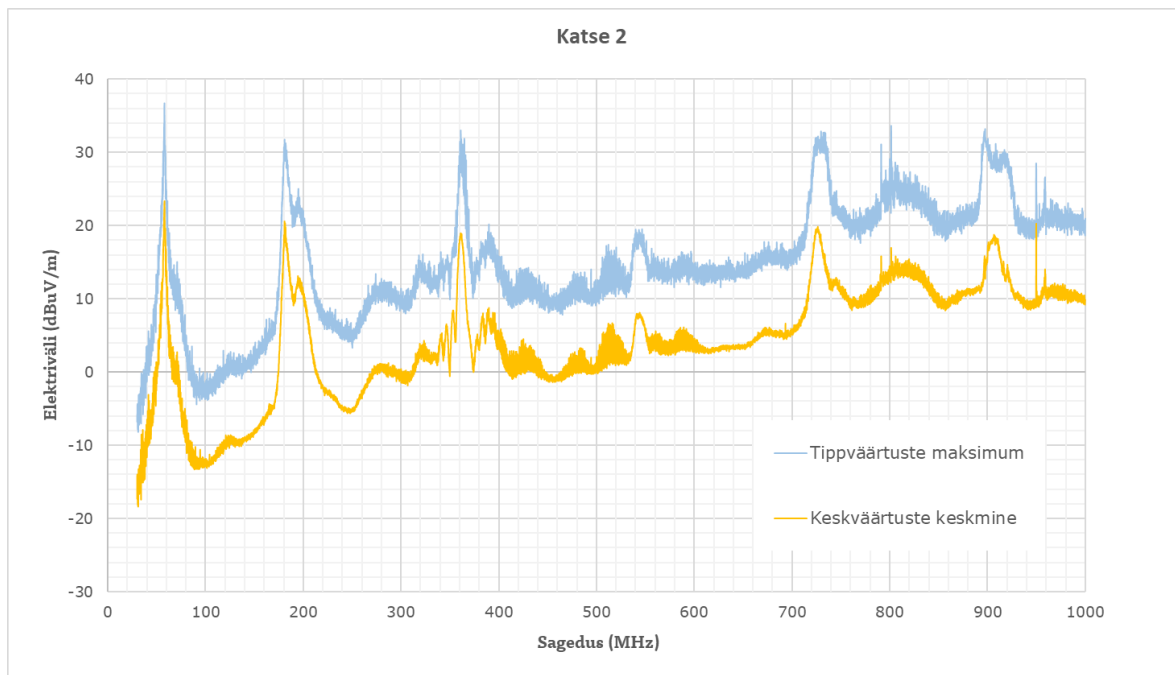


Joonis 6.2. Referents mõõtetulemus.

Referents mõõtetulemus on oluline teha selleks, et saada tulemused tühjas ristlaine kambris. Kõik katsed mõõdeti sagedusvahemikus vastavalt standardile EN 61000-4-20, mis määrab mõõtevahemiku 30 – 1000 MHz. [15] Antud graafikult võib välja lugeda, et teatud sageduste korral on tühjas kambris tippväärtused, mis võivad tuleneda kambri ebaideaalsusest ehk näiteks varje ebapiisavusest.

6.2.2 Katse 2

Katse 2 puhul asetati katsetatav seadmestik (vt joonis 6.1) ristlaine kambri keskmesse, tehti foto (vt lisa 3.1) paigutusest ning sooritati mõõtmine (vt joonis 6.3). Katse koosnes mõõteobjekti kirjelduses toodud seadmestikust mille puhul olid trükkplaadid ilma varjestava kestata ning CAN suhtlusliin ühendatud ilma varjestuse maanduseta. Samuti oli lisatud CAN liini sild kontrolleri mõeldud pistikute vahele, et implementeerida suhtlust ECU ja mootorite kontrolleri vahel.

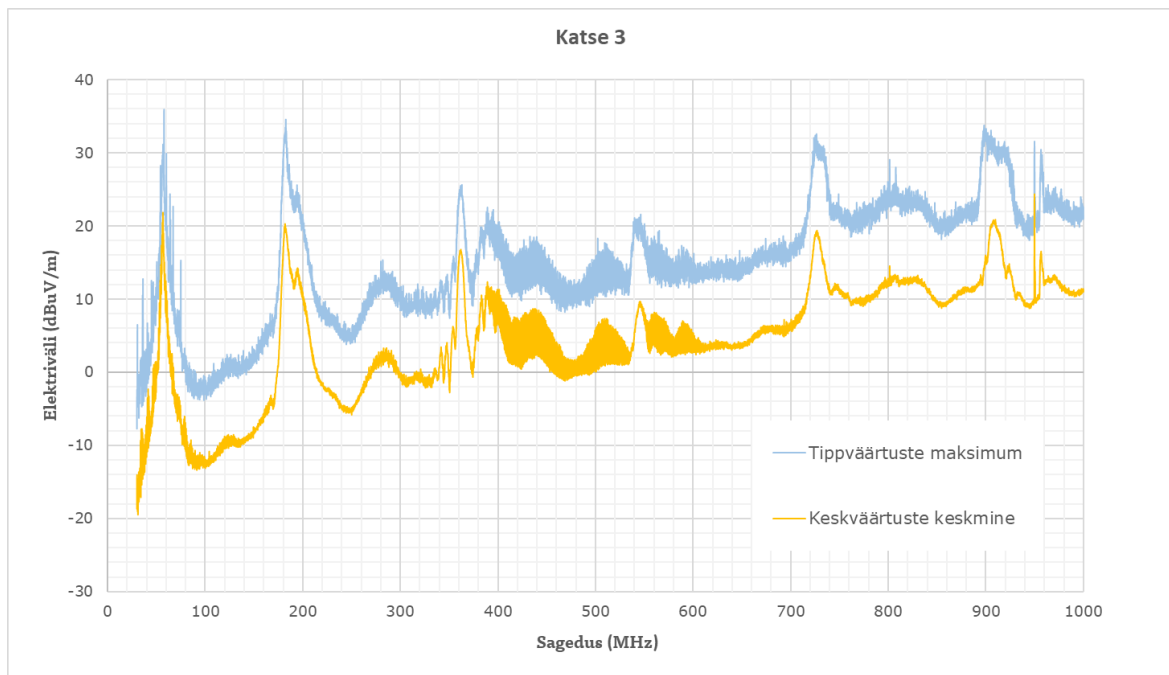


Joonis 6.3. Katse 2 mõõtetulemus.

Katse 2 mõõtetulemusest võib selgelt välja lugeda 6 suuremat tippväärtust. Esimene suurim tippväärtus, mille sageduseks on 58 MHz ja elektrivälja tugevuseks maksimaalselt 37 dBuV/m jäi esmastel seadmestiku katsetustel arusaamatuks tippväärtuseks. Teine tippväärtus sagedusega 180 MHz ja maksimaalse elektrivälja tugevusega 32 dBuV/m tuleneb nii ECU, sensorika ja AMS trükkplaatidel kasutatavatest CAN integraalskeemide ostsillaatori LC ahelast. Kolmas tippväärtus sagedusega 360 MHz ja maksimaalse elektrivälja tugevusega 33 dBuV/m on CAN integraalskeemide DC pinge alaldi kahekordse ostsillaatori LC ahela väärtus. Neljas tipuväärtus sagedusel 540 MHz (maksimaalne elektrivälgi 20 dBuV/m) ja viies tipuväärtus 720 MHz (maksimaalse elektriväljaga 34 dBuV/m) on antud CAN integraalskeemide harmoonilised tipuväärtused. [26] Sarnaselt esimesele tippväärtuse olemusele jäi ka esimese seadmestiku katse ajal arusaamatuks viimase tippväärtuse olemus.

6.2.3 Katse 3

Katse 3 erines katse 2-st CAN varjestuse ühendamisega AMS trükkplaadi pistiku läheduses CAN maandusega, mis on trükkplaadil isoleeritud maandus. Antud lahendus on hetkel kasutusel FEST21 vormelil. Terve CAN liini varjestamiseks sai veetud lisa juhe üldisest CAN liini varjest eraldi seisva kontrolleri mõeldud CAN liini varje jaoks. Selliste muutuste tegemiseks tuli eemaldada kambri trükkplaatide küljes olev juhtmestik. Mõõte täpsuse või samaväärse tulemuse saamiseks üritati jätta trükkplaatide asukohad identseks esialgse katsega 2 (vt lisa 3.2). Sooritati kolmas mõõtmine ning saadi tulemused (vt joonis 6.4).

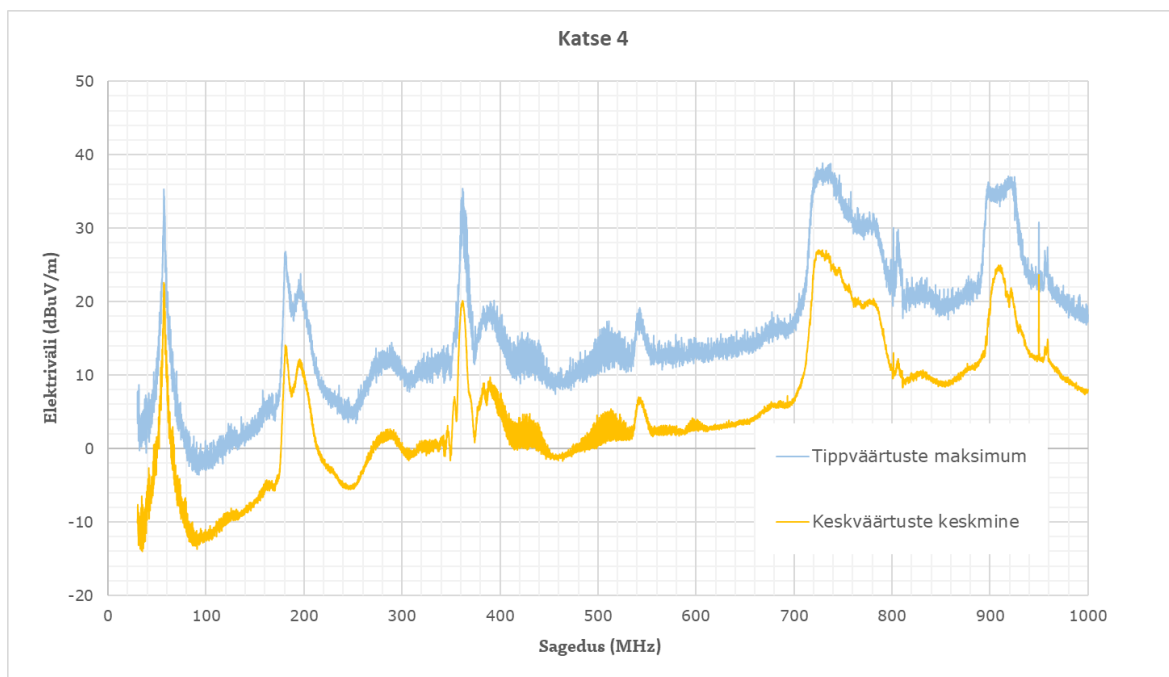


Joonis 6.4. Katse 3 mõõtetulemus.

Katse 3 mõõtetulemusest võib näha suuremat muutust kolmanda tippväärtuse puhul ning sagedusvahemikus 400 – 540 MHz esinevat müra. Kolmanda tippväärtuse puhul on näha elektrivälja langust -8 dBuV/m. Katse 2 ja katse 3 on omavahel üsna sarnased tulemused. Mõningad väiksed tippväärtuste erinevused võivad tuleneda ka juhtmestuse või trükkplaatide asukoha erinevusest.

6.2.4 Katse 4

Katse 4 puhul kasutati parendusmeetodina ECU korpuse varjestamist alumiiniumist kestaga. Alumiiniumist kest koosnes kahes osast, mis oli omavahel ühendatud poltidega ning ainsate avadena korpuses on pistiku avad. Korpus ühendati CAN liini varjestusega ning varjestus omakorda AMS trükkplaadi lähedal üldmaandusega ehk aku miinus klemmiga (vt lisa 3.3). Seejärel asetati seadmeistik ristlaine kambrisse ning sooritati mõõtmised, mille tulemusena saadi graafik (vt joonis 6.5).



Joonis 6.5. Katse 4 mõõtetulemus.

Katse 4 puhul on graafik eelnevatest selgelt erinev. Erinevus seisneb igas tippväärtuses peale esimese. Teise tippväärtuse puhul on toimunud elektrivälja langus graafikul pea 10 dBuV/m võrra võrreldes kolmanda katsega. Kolmas tippväärtus seevastu on teinud 10 dBuV/m suuruse tõusu. Neljanda tippväärtuse puhul on märgata kerget paranemist. Eelviimase tippväärtuse puhul on märgata nii elektrivälja tõusu kui ka tippväärtuse sagedusvahemiku korralikku laienemist. Eelviimase tippväärtuse tõus on võrreldes katse 3-ga +6 dBuV/m. Viimase tippväärtuse puhul on tõus ligikaudu 4 dBuV/m. Müra esinemine katse 3 korral sagedusvahemikus 400 – 540 MHz on ECU korpuse varjestamisega paranenud. Millest toimusid kolmanda, viienda ja kuuenda tippväärtuse tõusud on nende mõõtmiste põhjal raske öelda, kuid põhjus võib seisneda mahtuvuslikus sidestuse suurenemises. Samuti on ka viienda ja kuuenda tippväärtuse iseloomu muutus raskesti seletatav ning selle põhjalikumaks uurimiseks tuleks sooritada korduskatsed.

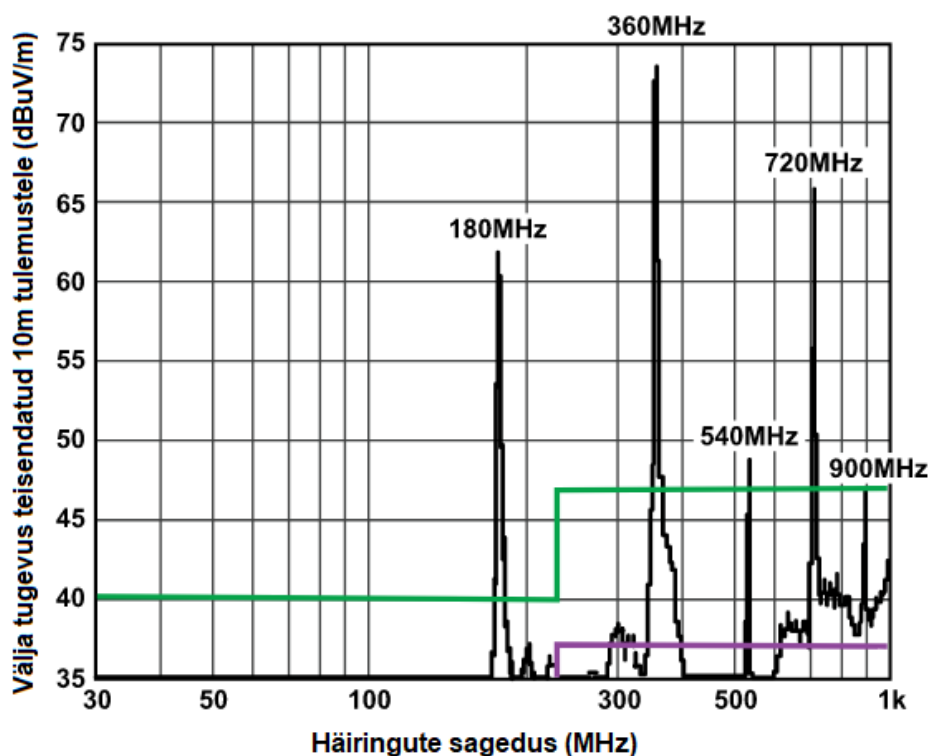
6.2.5 Mõõtetulemuste täiendav analüüs

Kuna kõikide katsete puhul oli esimene tippväärtus suhteliselt sarnane iga katse korral ning kindlat põhjustajat selleks tuvastada ei õnnestunud, sooritasime mõõtmised elektrivälja kui ka magnetvälja lähiproovikutega trükkplaatide mõõtmiseks ning põhjustajate valideerimiseks. Lähivälja proovikutega esimese tippväärtuse päritolu tuvastada ei õnnestunud. Esimese tippväärtuse olemuse selgitamiseks sai tehtud täiendavad katse-eksitus meetodil põhinevad mõõtmised, mille korral sai katsetatud ükshaaval erinevaid trükkplaatide ning eemaldatud ka CAN suhtlusliinid. Kõikide katsete

puhul oli olemas 58 MHz sageduslik tippväärtus. Sellest võib järeldada, et tippväärtuse tekitajaks olid antud olukorras toitejuhtmed, mis toimisid justkui kiirgavad antennid kuna trükkplaatide disainis ei ole kasutatud toiteahelate sisendites/väljundites EMI filtreid.

Kahjuks ei õnnestunud laboris tehtud kiiranalüüsi käigus kindlaks määrata viimase tippväärtuse olemust, kuid hilisema CAN integraalskeemi andmelede lugedes ilmnes, et kas tootja poolt tehtud mõõtmistes oli olemas tipuväärtus 900 MHz. Tulenevalt sellest võib eeldada, et antud tipuväärtus võib olla CAN integraalskeemi harmooniline. Antud sageduse olemust ei ole tootja andmelehes välja toodud, kuid tootjapoolsetel häiringute mõõtmistel on 900 MHz tippväärtus siiski graafikul olemas.

Võrreldes tootja ja TTÜ laboris tehtud EMC mõõtmiste tulemusena võib öelda, et antud graafikud on üsna sarnased suuremate tipuväärtuste sageduse poolest. Tänu sellele on suuremate tippväärtuste olemused kindlalt andmelehe põhjal kinnitatavad (vt. Joonis 6.6). Jälgides tootja poolseid soovitusi CAN integraalskeemidega trükkplaatidele, on võimalik parandada trükkplaadi elektromagnetilist ühilduvust veelgi.



Joonis 6.6. Tootja poolt tehtud CAN integraalskeemi häiringute mõõtmine trükkplaadil 5 V toite ja 90% koormuse korral. [26]

6.3 Ettepanekud muudatusteks FEST21 elektrisüsteemis

Ettepanekuid muudatusteks FEST21 elektrisüsteemis teooria põhjal võib välja tuua olulistena peatükkidena trükkplaatide disainimis algetappidel maanduste ning liideste kujundamine vastavalt parema EMÜ saavutamiseks. Väga oluline on teha vahet madal ja kõrgesageduslike signaalidel ning vastavalt sellele kasutada korrektset maandamist või vajadusel ka filtreerimist. Võimalusel tuleks läbi mõelda kestade parem sidumine varjega kuna enamus ühendusi FEST21 vormeli peal on tehtud „hobusesaba“ lahendusena, mis ei ole just kõige paremate varjestavate omadusega. Antud muudatused eeldaks siiski laiemapõhjalist seadme kestade reformi, et oleks võimalik teha paremad varje ühendused vastavat kestade vahetus läheduses. Kestade projekteerimise algetappidel tuleks kindlasti arvesse võtta avade ning pilude mõju varje kesta üldise varje omadustele.

Praktiliste mõõtmiste põhjal võib tuua välja mõõtetulemustest tulenevat probleemi 58 MHz tipuväärtuse puhul. Antud tipuväärtus tuleneb tõenäoliselt toitejuhtmetest, nimelt puuduvad trükkplaatide toiteskeemidel EMI filtrid ning tänu sellele on toitejuhtmed süsteemis justkui antennid, mis kiirgavad häiringuid. Toitejuhtmed kulgevad vormelis pea igale poole ning on juhtmepuu harus täpselt teadmata suuna ning kujuga. Antud probleemi lahendamaks disainimis faasis tehtud lihtne toitefilter trükkplaadile vähendamaks EMI mõju kogu vormeli elektrisüsteemile.

KOKKUVÕTE

Lõputööl oli kolm olulist eesmärki. Esimeseks eesmärgiks koguda ja talletada informatsiooni elektromagnetilise ühilduvuse kohta ning tänu sellele suurendada tiimisest teadlikkust antud valdkonnas. Lisaks sellele analüüsida ka FEST21 elektrisüsteemi elektromagnetilist ühilduvust. Teiseks oluliseks eesmärgiks sai võetud ülesanne, teha esmakordsed EMÜ mõõtmised vormeli elektroonika seadmestikus. Kolmandaks eesmärgi püstituseks oli teoreetilise ning praktiliste tulemuste võrdlemine ning soovitude andmine tulevaste elektrivormelite parema elektromagnetilise ühilduvuse saavutamiseks.

Lõputöö sissejuhatuses tutvustati Formula Student võistlussarja, ajalugu ja meeskonda. Esimese kahes sissejuhatavas peatükis anti teoreetiline ülevaade EMÜ häiringutest ning teises peatükis EMÜ häiringute allikatest. Kolmas oluline peatükk andis ülevaade EMÜ standardite kohta nii Euroopas kui ka mujal maailmas. Lisaks sellele anti ülevaade ka standardite päritolust ning nende jaotuslikust poolest. Neljas peatükk keskendus EMI ennetamise, vähendamise ning vastu võitlemisele juba tootearenduse algetapidest kuni valmis tooteni välja.

Töö teises pooles, ehk viies peatükis mõtestati lahti vormeli elektrisüsteemile ning nende alamsüsteemid kui ka seadmed, mis oli oluline peatükk enne mõõteobjekti valikut ning katsetuste tegemist, saamaks aimu võimalikest esinevatest EMI probleemidest elektrivormelis. Lisaks sellele mainiti viiendas peatükis ka Formula Student võistlussarjast tulenevaid reegleid ning piiranguid vormeli elektrisüsteemi disainimisel. Kuuendas peatükis püstitati mõõteobjekti kirjeldus koos põhjendustega ning mõõteseadmestikuga. Elektromagnetilise ühilduvuse katsed sooritati TTÜ EMÜ laboris NRG-127 olevas kõrgsageduslikus rist-elektromagnetlaine kambris. Kokku tehti võrdlevaid mõõtmisi neli, millest üks oli tühja kambri referentstulemus, ning järgnevad seadmestiku katsetused. Katsete vahel analüüsiti saadud tulemusi ning tehti vastavalt sellele kiireid käepäraseid parandusi. Tulenevalt sellest anti kuuendas peatükis ülevaade mõõtetulemustest ning analüüsiti saadud andmeid, mille põhjal tehti soovitusi tulevaste elektrivormelite EMÜ parandamiseks.

Katsetuste käigus ilmnenuid häiringute valideerimiseks seadmestikul kasutati elektri- ja magnetvälja lähiproovikuid koos spektrianalüsaatoriga. Suureks abiks andmete analüüsimisel oli CAN integraalskeemide tootja poolt koostatud andmeleht EMI häiringute parandamiseks. Tänu andmelehele said esmased kahtlused laboris, hilisema analüüsi käigus kinnitust. Siiski esines ka mõõtmiste puhul kergeid ebaloogilisusi või arusaamatusi ning tänu sellele vajab antud valdkond täpsemat uurimist ning ka korduskatseid.

Antud lõputöö raames said esmased eesmärgid täidetud ning mingid tulemused ning teadmised kinnitatud. Tänu esmastele tulemustele on FSTT meeskonnal olemas arusaam võimalikest probleemide tekitajatest ning lahendustest. Kindlasti ei ole uurimus elektrivormeli EMÜ valdkonnas läbi ning vajaks põhjalikumat uurimist. Tulevikus oleks kindlasti vaja teha näiteks hetkel liiga keerulise ettevõtmisena tundunud mootorite kontrolleri (inverteri) ja mootorite elektromagnetilise ühilduvuse uurimise. See eeldaks pikemat ettevalmistust ning ka mõne võimekama seadme kasutamist, kui seda võimaldab TTÜ labor NRG-127.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. FSG, "Formula Student Rules 2020", 2020. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf [Kasutatud:01.02.2022]
2. Jaan Järvik, Adolf J. Schwab, Aleksandr A. Vorševski. Elektromagnetiline Ühilduvus I. TTÜ elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituut, Tallinn, 2008. [Raamat] [Kasutatud: 01.02.2022]
3. Jaan Järvik, Valeri I. Jakovlev, Jevgeni M. Vinogradov, Nikolai V. Korovkin, Tim Williams. Elektromagnetiline Ühilduvus II. TTÜ elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituut, Tallinn, 2008. [Raamat] [Kasutatud: 15.02.2022]
4. AMK, "AMK more drive", 2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://amk-group.com/en/content/about_us [Kasutatud: 10.02.2022]
5. AMK, "AMK RACING KIT 4 wheel drive "Formula Student Electric"", 2020. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://amk-group.com/amk-dokucd/dokucd/FSE/en/content/resources/pdf-dateien/pdk_205481_kw26-s5-fse-4q_en_.pdf [Kasutatud: 12.02.2022]
6. AMK, "Motor-Datenblatt motor data sheet", 27.11.2018. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://amk-group.com/amkdokucd/dokucd/FSE/en/content/resources/pdfdateien/fse/r25/motor_data_sheet_a2370dd_dd5.pdf [Kasutatud: 12.02.2022]
7. Valery Vodovozov, Dmitry Vinnikov. Electronics Systems of Motor Drive. TTÜ, Tallinn, 2008 [Raamat] [Kasutatud: 18.02.2022]
8. Kuno Janson, Ants Kallaste. Elektrimasinate Alused. TTÜ, Tallinn, 2017 [Raamat] [Kasutatud: 20.02.2022]
9. Formula SAE, "History of Formula SAE", [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72> [Kasutatud: 12.03.2022]
10. European Commission, "Electromagnetic Compatibility (EMC) Directive", 29.03.2014 [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://ec.europa.eu/growth/sectors/electrical-and-electronic-engineering-industries-eei/electromagnetic-compatibility-emc-directive_en [Kasutatud: 21.03.2022]
11. Academy of EMC, "EMC Standards", 2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.academyofemc.com/emc-standards> [Kasutatud: 22.03.2022]
12. EUR-Lex, "Directive 2014/30/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility (recast) Text with EEA relevance",

- 2014 [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-ET/TXT/?from=EN&uri=CELEX%3A32014L0030> [Kasutatud 25.03.2022]
13. IEC, "Basic EMC publications", 2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.iec.ch/basic-emc-publications> [Kasutatud: 25.03.2022]
 14. Eesti Standardimis ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN IEC 61000-4-3:2020", 31.12.2020. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iec-61000-4-3-2020> [Kasutatud: 28.03.2022]
 15. Eesti Standardimis ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 61000-4-20:2010", 05.01.2011. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-61000-4-20-2010> [Kasutatud: 28.03.2022]
 16. Angela Nothofer, Martin Alexander, Didier Bozec, Andy Marvin, Les McCormack, "The Use of GTEM cells for EMC measurements", York EMC Services Ltd., 2003. Loetud aadressil: https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg65_gtem [Kasutatud: 30.03.2022]
 17. Emcstandards, "Design Techniques for EMC Part 5: PCB design and layout" [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.emcstandards.co.uk/files/design_techniques_for_emc_1999_part_5_pcb_layout_1.pdf [Kasutatud: 03.04.2022]
 18. Hong Zhao, Guofeng Li, Ninghui Wang, Shunli Zheng, Lijun Yu, "Research and Application of Electromagnetic Compatibility Technology", Academy Publisher 2012. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <http://www.jcomputers.us/vol7/jcp0709-20.pdf> [Kasutatud: 03.04.2022]
 19. Learn EMC, "Practical EM Shielding", 2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://learnemc.com/practical-em-shielding> [Kasutatud 04.04.2022]
 20. T.C.Lun, "Designing for Board Level Electromagnetic Compatibility", Freescale Semiconductor, 2005. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2321.pdf> [Kasutatud: 04.04.2022]
 21. Frankonia, "GTEM Cells", [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <http://frankonia-solutions.com/wp-content/uploads/2017/10/GTEM.pdf> [Kasutatud 14.04.2022]
 22. R&S, "R&S ZVL Vector Network Analyzer operating manual", [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/z/zvl_1/ZVL_Operating_en_09.pdf [Kasutatud: 14.04.2022]
 23. R&S, "R&S HZ-14 Probe Set for E and H Near-Field Measurements operating manual", [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://cdn.rohde->

- schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/h/hz14/HZ-14_e_1-1.pdf [Kasutatud 14.04.2022]
24. Kvaser, "The CAN Bus Protocol Tutorial", 2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.kvaser.com/can-protocol-tutorial/> [Kasutatud: 17.04.2022]
25. Ivo Palu, Triin Kangro, Tanel Sarnet, Jako Kilter, Andrus Reinson, Rain Maripuu, "Kaabelvõrgud ja nende mõjud ülekandevõrgu talitusele", Tallinn, 2015. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: https://www.elering.ee/sites/default/files/attachments/Kaabelv%C3%B5rgud%20ja%20nende%20m%C3%B5jud_l%C3%B5pparuanne_Lep15070%20-%20web%20-%20F.pdf [Kasutatud: 23.04.2022]
26. Mark Centrell, "Recommendations for Control of Radiated Emissions with *isoPower* Devices", Analog Devices. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.analog.com/en/app-notes/an-0971.html?doc=ADM3053.pdf> [Kasutatud: 24.04.2022]
27. Holtek, "Anti-electromagnetic Noise Interference Software Strategies", 25.12.2019. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.holtek.com/documents/10179/116745/an0530en.pdf> [Kasutatud: 25.04.2022]
28. Academy of EMC, "Electromagnetic Compatibility Knowledge Base", 2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base> [Kasutatud: 25.04.2022]
29. Academy of EMC, "EMC Design Guidelines", 2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.academyofemc.com/emc-design-guidelines> [Kasutatud: 25.04.2022]
30. Henry W. Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering. A JOHN WILEY & SONS INC., 2009. [Raamat]. [Kasutatud 26.04.2022]
31. Mark I. Montrose, Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance. Montrose Compliance Services, Inc, New York, 2000. [Raamat]. [Kasutatud: 28.04.2022]
32. Formula Student Team Tallinn, "Arhiiv", [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.formulastudent.ee/arhiiv/#1605618540820-9545c60e-e25e> [Kasutatud: 05.05.2022]

LISAD

Lisa 1 Seadme standardi leidmise plokk skeem [11]

Lisa 2 FEST21 lihtsustatud elektrisüsteemi plokk skeem

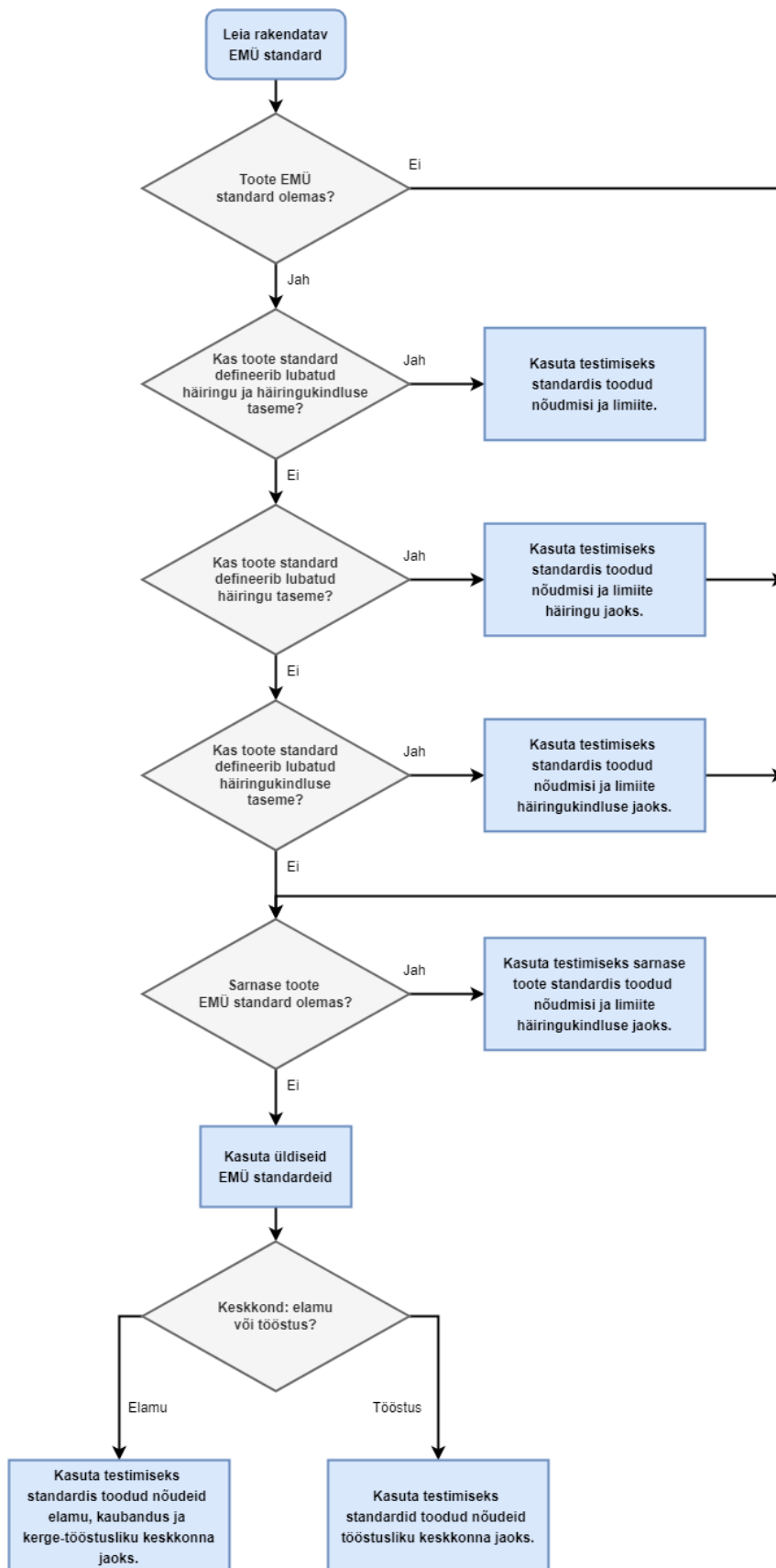
Lisa 3 Katsetatav seadmeistik rist-elektromagnetlaine kambris

L3.1 Katse 2

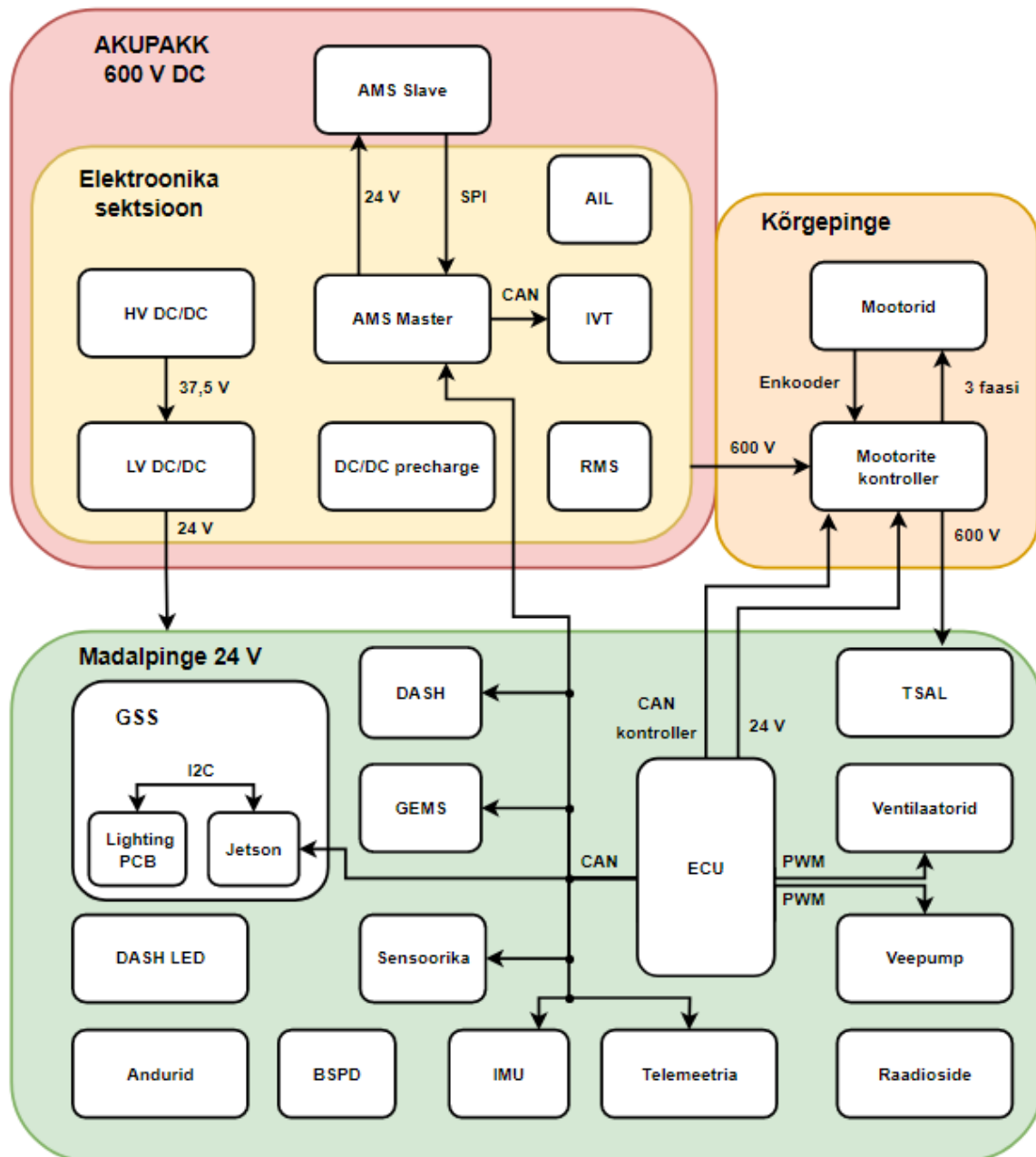
L3.2 Katse 3

L3.3 Katse 4

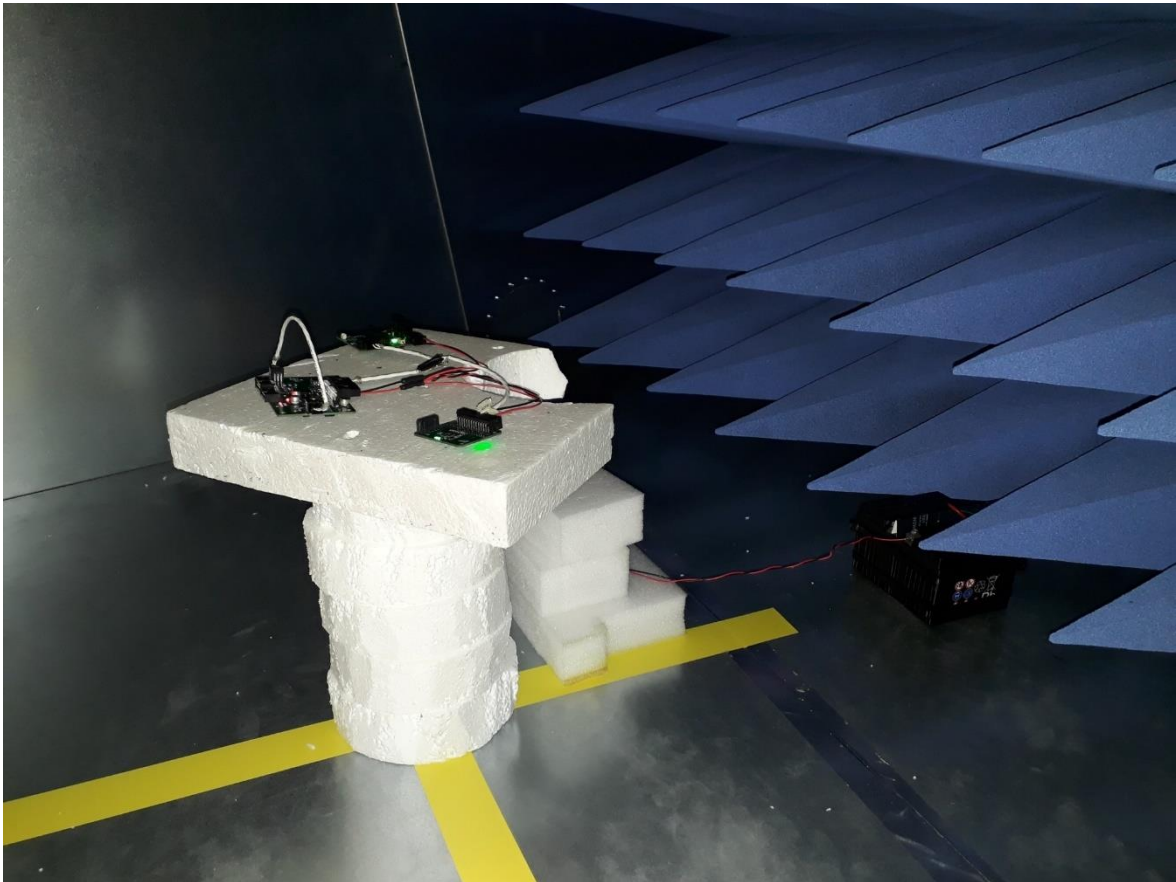
Lisa 1 Seadme standardi leidmise plokskeem [11]



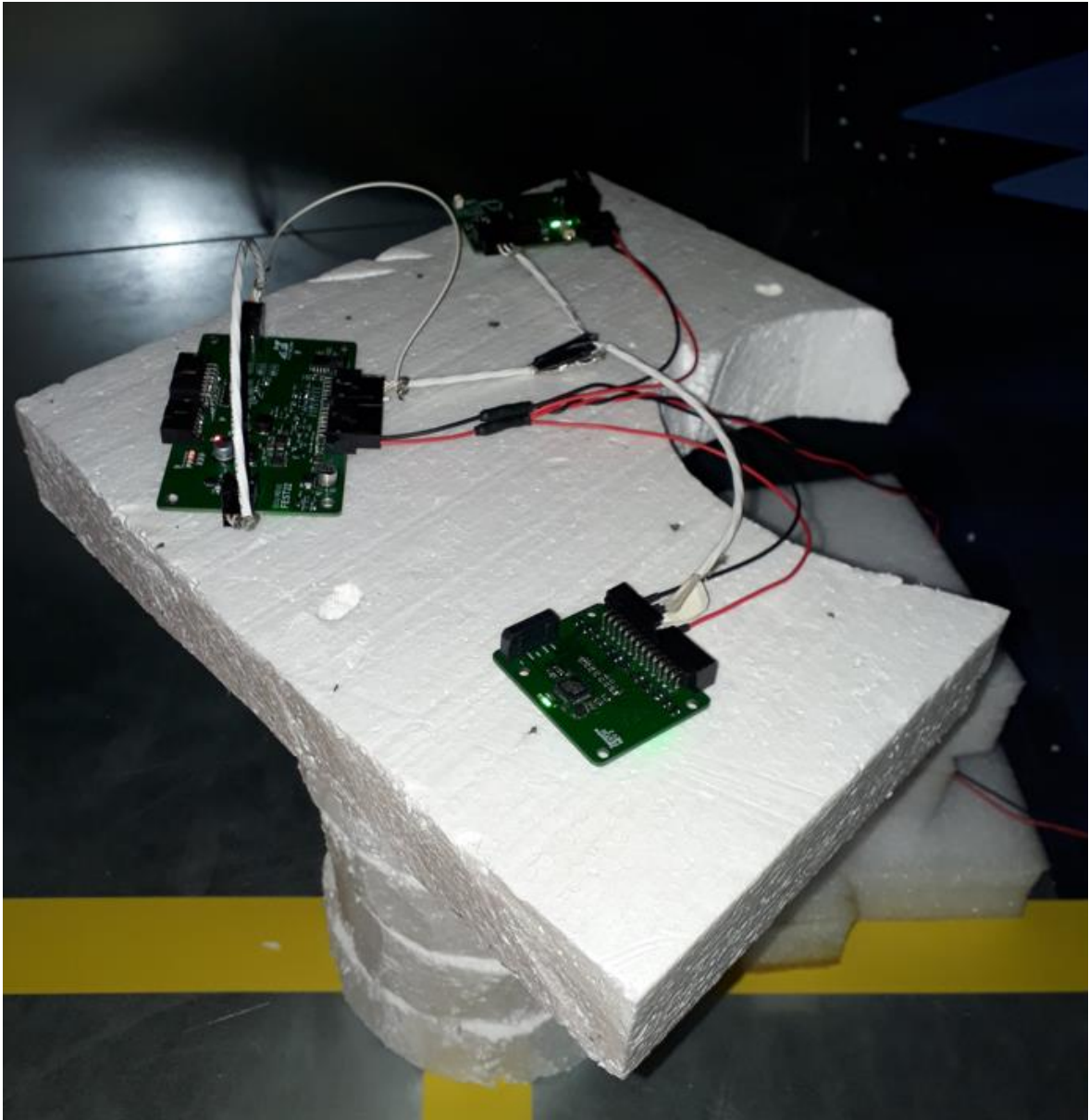
Lisa 2 FEST21 lihtsustatud elektrisüsteemi plokkiskeem



Lisa 3 Katsetatav seadmestik ristlaine kambris
L3.1 Katse 2



L3.2 Katse 3



L3.3 Katse 4

