



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**PÄIKESELEKTRIJAAAMADE TOITEMUUNDURITE  
HÄIRINGUPARAMEETRITE SÕLTUVUS  
TALITLUSTINGIMUSTEST**

**SOLAR POWER PLANT POWER CONVERTERS  
DISTURBANCE PARAMETERS RELATIONS TO  
OPERATING CONDITIONS**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Märt Kuld

Üliõpilaskood: 206427EAAB

Juhendaja: Lauri Kütt, kaasprofessor

Tallinn 2024

(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 tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Märt Kuld,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „PÄIKESEELEKTRIJAAMADE TOITEMUUNDURITE HÄIRINGUPARAMEETRITE SÕLTUVUS TALITLUSTINGIMUSTEST“, mille juhendaja on Lauri Kütt,

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.

21.05.2024

---

<sup>1</sup> 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 tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Märt Kuld

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Päikeseelektrijaamade toitemuundurite häiringuparameetrite sõltuvus talitlustingimustest

*Kuupäev:*  
21.05.2024

56 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* kaasprofessor Lauri Kütt

*Töö konsultant (konsultandid):* Kamran Daniel

*Sisu kirjeldus:*

Antud lõputöö eesmärk oli päikesepaneelidega koduse elektrijaama ühendamiseks ette nähtud vaheldi analüüsimine häiringute emissiooni seisukohast. Selle juures on eesmärgiks leida seosed ja tingimuslikud parameetrid, mis iseloomustaksid vaheldi tööst tingitud müra- ja moonutuste taset tegelikus võrgus töötamisel.

Lõputöö raames on esitatud katseteks sobilik tegelik katseskeem ning valitud ja põhjendatud selles olevate seadmete valiku kriteeriume ja funktsioone. Katseskeemi koosseisus on nii päikeseenergia vaheldite alalis- kui ka vahelduvvooluahelate juhtivuslike häiringute mõõteseadmed ja vajalikud abikomponendid. Antud katseskeemiga viidi läbi ka seeria mõõtmisi, ning esitatud on ka ülevaade nii vooluharmonikute emissiooni taseme kui ka kõrgsageduslike häiringute emissioonitasemetest.

Lisaks varieeriti katsetatava seadme talitlussuursusi, millega selgitati täiendavates tööpunktidest esinevad tegelikud häiringuemissioonitasemed. Nii madalsageduslike kui ka kõrgsageduslike (9 kHz kuni 30 MHz) tulemuste juures täheldati, et tugevamad muutused esinesid vaheldi alalisvoolu sisendpinge muutmisel.

*Märksõnad:* elektrilised häiringud, vaheldi, elektromagnetiline ühilduvus, elektrienergia kvaliteet, bakalaureusetöö

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Märt Kuld	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Solar power plant power converters disturbance parameters relations to operating conditions	
<i>Date:</i> 21.05.2024	<i>56 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> kaasprofessor Lauri Kütt	
<i>Consultant(s):</i> Kamran Daniel	
<i>Abstract:</i> <p>The aim of this thesis was to analyse the inverter intended for connecting a home power station with solar panels from the perspective of disturbance emission. The objective is to identify the relationships and conditional parameters that characterize the level of noise and distortions caused by the inverter when operating in the actual grid.</p> <p>Within the framework of this thesis, an actual test scheme suitable for the testing is presented. The functions of the equipment is selected and presented. The test circuit includes measuring devices for the conductive disturbances of the direct current and alternating current circuits of the solar energy converters and the necessary auxiliary components. A series of measurements were also carried out with this experimental setup, and an overview of the emission levels of current harmonics and the emission levels of high-frequency disturbances is also presented.</p> <p>In addition, the operating parameters of the device under test were varied, which presented the actual interference emission levels at additional operating points. For both low-frequency and high-frequency (9 kHz to 30 MHz) results, it was observed that more significant changes to outcome occurred when varying the DC input voltage.</p>	
<i>Keywords:</i> electrical disturbances, inverter, electromagnetic compatibility, electric power quality, photovoltaic systems, bachelor Thesis.	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Fotogalvaanilise allika mikrovaheldi elektromagnetiline ja elektriline häiring elektrivõrgus**

Lõputöö teema inglise keeles: **Electromagnetic interference and electrical output noise analysis of prepared photogalvanic inverter**

Üliõpilane: **Märt Kuld, 206427EAAB**

Eriala:

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Lauri Kütt, vanemlektor**

Lõputöö kaasjuhendaja:  
(ettevõtte, amet ja kontakt) 2023/2024 2023/2024 Kevad

Lõputöö ülesande kehtivusaeg:

Lõputöö esitamise tähtaeg: **21.05.2024**

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

## **1. Teema põhjendus**

Päikeseenergiast elektrivõrku energia jõudmiseks tuleb eelnevalt muundada energiat läbi mitme etapi. Oluline seade selle energia muundamise juures on vaheldi. Efektiivse päikeseenergia muundamise jaoks vajame efektiivseid vaheldeid, mis ei häiriks oma tööga elektrisüsteemis teisi seadmeid ja säilitaks nõutud talitlustingimused erinevate iseloomudega koormuste korral terve elutsükli jooksul.

## **2. Töö eesmärk**

Päikesepaneelidega ühendamiseks ette nähtud väikese võimsusega vaheldist emiteeritud elektrilise müra ja vooluharmonikute täpsem analüüsimine. Eesmärk on leida sõltuvus- ja tingimuslikud parameetrid, mis iseloomustaksid mikrovaheldi tööst tingitud mürataset ja moonutuste taset.

## **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

Milline on mikrovaheldi väljundis olev voolu lainekuju erineva võimsusega ja erinevat tüüpi tarvitite rakendamisel?

Kuidas mõjutavad vaheldi töös esinevad juhtsignaalide toimed, tasemed, sagedused jms vaheldi väljundsuurustega seotud iseloomulikke parameetreid?

Milliseid sageduskomponente esineb vaheldiga seotud suurustes sagedusesituses vaates, kuidas nende uurimisega saab kirjeldada seadme elektromagnetilisi häiringuid?

## **4. Lähteandmed**

Vaheldi paigaldamisel kasutatakse tootja poolt pakutud alus-skeemi (viide).

EVS-EN normdokumendid

## **5. Uurimismeetodid**

Vaheldi elektromagnetiliste parameetrite mõõtmine. Mõõtetulemuste töötlemine ja analüüs tabelarvutustarkvaras. Teadusartiklites ning standardites välja toodud teoreetilise taustaga katseseadme tulemustega võrdlus.

## **6. Graafiline osa**

Jooniste, tabelid, skeemid on nii töö põhisosas kui ka lisades.

## **7. Töö struktuur**

1. Sissejuhatus
2. Päikeseenergia muundurite topoloogilised lahendused
3. Katseplatvormi valik ja spetsifikatsioon
4. Katseseadme esialgsete parameetrite mõõtmine
5. Võrgu häiringute stimulatsiooni kavandamine
6. Talitluse analüüs võrgu häiringute olukorras
7. Katsetulemuste tulemused ja järeldused

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Lõputöö teoreetilise materjali kogumiseks kasutatakse peamiselt käsiraamatuid, mikrovaheldite tootjate ja nendes olevate komponentide tootjate poolt antud rakenduslikku lähteinfot, teadusartikleid.

- Elektromagnetiline ühilduvus. I / Jaan Järvik, Adolf J. Schwab, Aleksandr A. Vorševski
- EVS-EN IEC 61000-6-3:2021. Elektromagnetiline ühilduvus. Osa 6-3: Erialased põhistandardid. Emissioonistandard seadmetele olmekeskkondades.
- EVS-EN 62920:2017/A1:2021. Fotoelektrilised genereerimissüsteemid. Elektriliste muunduriseadmete elektromagnetilise ühilduvuse nõuded ja katsetusmeetodid.



## **9. Lõputöö konsultandid**

Lõputöö raames konsulteeriti peamiselt toite kvaliteedi analüüside juures Kamran Danieliga ning juhtivuslike emissioonide mõõtmisel konsulteeriti Martin Parkeri ja Marek Jarkovoiga.

## **10. Töö etapid ja ajakava**

Lõputöö aluslahenduse kirjeldus detsember 2023

Parameetrite mõõtmise kirjeldus ja katseskeem – märts 2024

Mõõtmiste sooritamine – märts 2024

Analüüs ja tulemuste vormistamine – mai 2024

Valmis lõputöö esitamine - 21.05.2024

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
EESSÕNA .....	13
Lühendite ja tähiste loetelu .....	14
1 SISSEJUHATUS.....	15
1.1 Üldist .....	15
1.2 Lõputöö raames lahendatavad ülesanded.....	16
1.3 Lõputöö struktuur .....	16
2 KATSETUSTE PLANEERIMINE.....	18
2.1 Katse seadistuse kavandamine .....	18
2.2 Katsetel peamised muudetavad parameetrid ja nende mõju .....	19
2.3 Katsetatava seadme elektriliste häiringute kirjeldus .....	21
2.3.1 Kiirguslik häiring .....	21
2.3.2 Juhtivuslik häiring .....	21
2.4 Vaheldi elektriliste häiringute piirnõuded esitavad standardid .....	22
2.4.1 IEC 61000-3-2 nõuded voluharmonikutele .....	23
2.4.2 EN 62920 nõuded häiringu emissioonitasemetele.....	23
2.4.3 Kõrgsagedus-pingehäiringute esitus .....	27
2.5 Normdokumentide alused katsetusteks.....	27
3 Katseseadmete valik ja katsetingimuste kirjeldus .....	30
3.1 Üldine katseskeem laboris.....	30
3.2 Katsetatav seade (päikeseenergia vaheldi).....	30
3.3 Katseahela seadmete nõuded ja kirjeldus .....	32
3.3.1 Vahelduvvoolu toiteplokk .....	32
3.3.2 Isolatsioonitrafo .....	32
3.3.3 Vahelduvvoolu madalpääs-toitefilter.....	33
3.3.4 Takistuslik koormus .....	33
3.3.5 Alalisvoolu ahela impedantsi normeeriv võrk (AVTV) .....	35
3.4 Elektrivõrgu vahelduvvoolu ühendus katseseadmetele ja maandus .....	37
3.4.1 Mõõteahelate kirjeldus voluharmonikute mõõtmiseks .....	37
3.5 Kõrgsagedushäiringute mõõtevastuvõtja .....	38
3.6 Katseväärtused ja mõõdetavad parameetrid.....	39
3.6.1 Katseseeria 1 kirjeldus ja parameetrid.....	39
3.6.2 Katseseeria 2 kirjeldus ja parameetrid.....	39

3.7	Katseskeemi ülesseadmine juhtivuslike häiringute emissiooni mõõtmiseks ...	40
4	Katsetuste läbiviimine ja katsetuselumused mõõtmine .....	41
4.1	Juhtivuslike emissioonide mõõteahela ülekandeteguri arvutus .....	41
4.2	Mõõtmistele eelnevad juhtivuslike häiringutasemete mõõtmised .....	42
5	Tulemused .....	43
5.1	Madalsageduslike häiringute mõõtetulemused .....	43
5.1.1	Vooluharmonikud .....	43
5.2	Kõrgsageduslike häiringute mõõtetulemused .....	45
5.2.1	Vahelduvvoolu-elektrivõrgu väljundi mõõtetulemused .....	45
5.2.2	Alalisvoolusisendi mõõtetulemused .....	48
6	Mõõtetulemuste hinnang .....	51
6.1	Madalsageduslike häiringusuuruste tulemuste hinnang .....	51
6.2	Kõrgsageduslike tulemuste hinnang .....	51
	KOKKUVÕTE .....	52
	Kasutatud kirjandus .....	53
	LISAD .....	55

## EESSÕNA

Antud lõputöö teema on valitud koostöös koostaja ja juhendajaga. Lõputöö teema kujunes koostaja huvist toitemuundurite ja elektromagnetilise ühilduvuse vastu. Lõputöö teema sõnastamisele aitas kaasa juhendaja Lauri Kütt, keda sooviksin tänada lõputöö koostamisel ja antud erialasse suunamisel.

Soovin veel tänada Kamran Danieli näpunäidete eest toite kvaliteedi analüüsimisel ja mõõtmistel. Minu tänusõnad kuuluvad ka suuresti Martin Parkerile ja Marek Jarkovoile, kes mulle Tallinna Tehnikaülikooli elektromagnet ühilduvus labori tegevustes ja mõõtmistes aitasid ning rohkelt konsultatsioone pakkusid.

Tänuavaldust väärivad ka Ants Kallaste, Andrii Chub, Indrek Roasto ja Tarmo Korõtko, kes antud töös kasutatavaid olulisi katseskeemi seadmeid kasutamiseks võimaldasid.

Viimaste tänusõnadega soovin tänada Martin Jaanust, kes mind õlikooli õpingutel aitas ja huvitavate ülikooliõpingutega tekitas huvi elektroonika valdkonda.

## Lühendite ja tähiste loetelu

AV – Alalisvool (ingl. k *Direct current - DC*)

AVTV – alalisvoolu tehisvõrk (ingl. k *Direct current current line impedance stabilization network*)

EM – Elektromagnetiline (ingl. k *Electromagnetic*)

EMI – Elektromagnetilised häiringud (ingl. k *Electromagnetic interference*)

EMÜ – Elektromagnetiline ühilduvus (ingl. k *Electromagnetic compability*)

ESR – kondensaatori ekvivalentne jadatakistus (ingl. k *Equivalent series resistance*)

LVD – Madalpinge direktiiv (ingl. k *Low voltage directive*)

MPPT – maksimaalse võimsuspunkti jälgimine (ingl. k *Maximum power point tracking*)

PV – Fotogalvaaniline (ingl. k *Photovoltaic*)

VV – Vahelduvvool (ingl. k *Alternating current - AC*)

VVTV – vahelduvvoolu tehisvõrk (ingl. k *Alternating current line impedance stabilization network*)

# 1 SISSEJUHATUS

## 1.1 Üldist

Keskkonnasäästlik ja minimaalse süsinikujäljega energia tootmine on Euroopa Liidu üks võtme-eesmärke [1] [2]. Seetõttu vajadus taastuenergia rakendamiseks elektrienergia tootmiseks on väga suur. Näiteks eesmärk 2050. aastaks saavutada kliimaneutraalsus tähistab jaotusvõrgus oluliselt suurenevat vajadust päikeseenergiasüsteemide töökindlaks ühendamiseks. Selleks on ühed olulisimad komponendid vaheldid, millega muundada fotogalvaanilise elemendi poolt toodetud alalisvoolul elektrienergia vahelduvvooluks, mida saab elektrivõrgu kaudu kanda nii tööstustele kui ka majapidamises rakendamiseks.

Vaheldite juures on kriitiline, et need oleksid töökindlad ja turvalised nii inimestele kui ka teistele seadmetele. Selle tõttu tuleb arvestada vaheldi kujundamisel tema elektromagnetilise sidestusega ja võimaliku mõjuga elektrivõrgule. Näiteks võivad vaheldid olla allikateks elektromagnetnähtustele, millega vaheldi võib elektrivõrgus põhjustada rikkeid või töökindluse kadu. Et seda vältida, peavad seadme poolt emiteeritud elektromagnetilised suurused olema teisi läheduses paiknevaid elektriseadmeid häirivast tasemest madalama intensiivsusega. Elektromagnetilise sidestuse puhul on samavõrd oluline, et vaheldid oleks immuunsed teiste seadmete poolt põhjustatud häiringutele. EL tasemel on elektromagnetilise ühilduvuse kriteeriumid käsitletud läbi direktiivi [3]. See elektromagnetilise ühilduvuse direktiiv hõlmab endas kõiki elektrilisi seadmeid, sh elektrivõrkudega või elektrienergiaga talitlevaid seadmeid. Lisaks käsitleb EMÜ direktiiv, kui immuunne peab olema elektriline seade teiste seadmete poolt emiteeritud häiringutele.

Antud lõputöö eesmärk on päikesepaneelidega koduse elektrienergia ühendamiseks ette nähtud vaheldi analüüsimine häiringute emissiooni seisukohast. Selle juures on eesmärgiks leida seosed ja tingimuslikud parameetrid, mis iseloomustaksid vaheldi tööst tingitud müra- ja moonutuste taset tegelikus võrgus töötamisel. Siin lõputöös katsetatakse vaheldit seepärast töös erineval vahelduvpinge tasemel. Fotogalvaaniliste süsteemide toitemuundurite EMÜ kriteeriumidele vastavuse hindamiseks käsitleb antud lõputöö EVS-EN 62920:2017+A11+A1:2021 [4] standardi nõudeid ja sellega kaasnevaid katsetusmeetodeid, mis on sisse seatud vaheldite talitluse seisukohast.

Antud lõputöö motivatsioon on suunatud autoripoolsest huvist jõuelektroonikas kasutatavate vaheldite vastu ning lõputööga käsitleda aktuaalseid probleeme toiteseadmete võrku liitmise juures.

## 1.2 Lõputöö raames lahendatavad ülesanded

Lõputöö teostamisel on eesmärgiks analüüsida kaubandusliku päikeseenergia-vaheldi talitlust erinevatel võrgu- ja sisendparameetrite kombinatsioonidel, millega anda ülevaade katsetusseadistuste täpsustamisest ja katsetusparameetrite valikust. Eesmärk oli selgitada, kui suures ulatuses muutuvad vaheldi väljundparameetrid (vahelduvvoolu-lainekuju) ja juhtivuslikud kõrgsagedushäiringud seoses talitlussuuruste varieerimisega.

Lõputöö raames kuuluvad lahendamisele järgnevad ülesanded ja selle alamosad.

- Katseskeemi üldise plaani koostamine ja normdokumentides esitatud alusele tugineva katsetusteks sobilike seadmete valik
- Seadmete ühendamine katseskeemis ja nende seadistamine katsetusteks sobilike parameetritega
- Valitud vaheldi mõõtmine katsetusseadistuses vaheldi väljund-vahelduvvoolu lainekuju ja juhtivuslike kõrgsagedushäiringute osas
- Vaheldi häiringute tasemete võrdlus normdokumentides oleva piirsuurusega
- Järelduste tegemine vaheldi töötingimuste kohta katsetuste läbiviimiseks.

Katsetuste ülesseadmist piiritlesid katsetatava vaheldi võimsuse vahemik 2,2 kW talitlusel 50 Hz töösagedusega madalpingevõrgus ja ühefaasilise vahelduvvooluahelaga katseskeem. Tingimused andis ette juhendaja ja katseteks kasutatava elektromagnetilise ühilduvuse labori juht.

## 1.3 Lõputöö struktuur

Käesolev lõputöö esitab vaheldi katsetamise ülesseadmise ja katset läbiviimise töö kirjelduse ja tulemuste ülevaate ja analüüsi. Lõputöös on kajastatud juhtivuslike madalsagedushäiringute ja kõrgsageduslike juhtivuslike häiringute katsete läbiviimise üksikasjad.

- Madalsageduslike häiringunähtuste raamistikus vaadeldakse vaheldi töösagedusvahemikus 100 Hz ... 2 kHz esinevaid häiringuemissioone;
- Kõrgsageduslike häiringunähtuste raamistikus vaadeldakse sagedusvahemikus 9 kHz kuni 150 kHz ja 150 kHz kuni 30 MHz esinevate häiringuemissioonide mõõtmist.

Lõputöö peatükk 2 osa kirjeldab normdokumentidest leitavaid aluseid ja katsetel vaadeldava vaheldi töö seisukohast olulisi detaile. See peatükk esitab üldised alused edasiseks tööks ja tingimused lõputöö ülesandeks olevate mõõtmiste edukaks sooritamiseks.

Peatükk 3 kirjeldab katseahela seadmete nõudeid ning nende valikut. See peatükk annab ülevaate ootustest katseahela seadmetele ning milliste parameetrite järgi said antud töös valitud katseahela seadmed valitud.

Peatükk 4 osa kirjeldab katsetulemuste mõõtmisi ja selle juures katseseadmete füüsilist paigutust. Seal osas toodi ka välja vajalike häiringu parameetrite andmete töötluse osasid.

Peatükis 5 on välja toodud katsetulemused koos nendele kehtestatud piirnormidega, mis erinevad antud töös kasutatavad standardid nõuavad.

Peatükis 6 on välja toodud antud töös tehtud mõõtetulemuste ja katseskeemi põhjal tehtud järeldused ja analüüs.



## **2 KATSETUSTE PLANEERIMINE**

### **2.1 Katse seadistuse kavandamine**

Katsete peamine eesmärk on hinnata päikesepargi jaoks mõeldud vaheldi jätkusuutlikkust. Välja töötamise järel katsetatakse vaheldeid standardiseeritud spetsiifilistel normaaltingimustel laboris. Seetõttu puudub sageli täielik ülevaade, kas laboris mõõdetud parameetrid muudavad seadme mitte-standardiseeritud väliskeskkonna parameetrite juures töötades immuunseks teiste seadmete häiringutele ja samal ajal vaheldi talitus ei häiriks teiste samas võrgus talitlevate elektriseadmete tööd. Käesoleva töö sisuks olevates katsetes muudetakse erinevaid võrgu iseloomulikke talitusparameetreid, et hinnata, kas vaheldi vastab standardis toodud nõuetele ka erinevate reaalseste võrgu talitlussuuruste korral.

Katsete puhul on oluline tagada katsete korratavus. Katsete korratavuse huvides on kasutatud standardist leitud juhiseid. Katse käigus jälgitakse muudetavaid parameetreid vastavad standardis esitatud piiridele ning katseid teostatakse vastavalt, et katsete juures muudetavad parameetrid vastaksid olmepiirkondade elektrivõrgu aktuaalsetele tingimustele. Standardid, mille järgi katseid teostatakse, on fotoelektriliste genereerimissüsteemide EMÜ direktiivi vastavuse [3] hindamiseks ja on sobilikud mikrovaheldi hindamiseks [4].

Oluline on katsete puhul ka, et muudetavad parameetrid oleksid päriselt aktuaalsed ja reaalselt esinevad. Peamiseks juhendmaterjaliks on üldine jaotusvõrkudes rakendatav toitevõrgu parameetrite lubatud vahemik, mis vastab töökindluse tagava toitepinge nõuetele. Avalikes jaotusvõrkudes reguleerib normdokument [5] EN 50160 pingekvaliteedi suuruseid, sh oodatavat pingetaset. Üldiseid tingimusi elektrivõrgu elektromagnetkeskkonna kujundamiseks loetleb detailsemalt näiteks dokument [6].

## 2.2 Katsetel peamised muudetavad parameetrid ja nende mõju

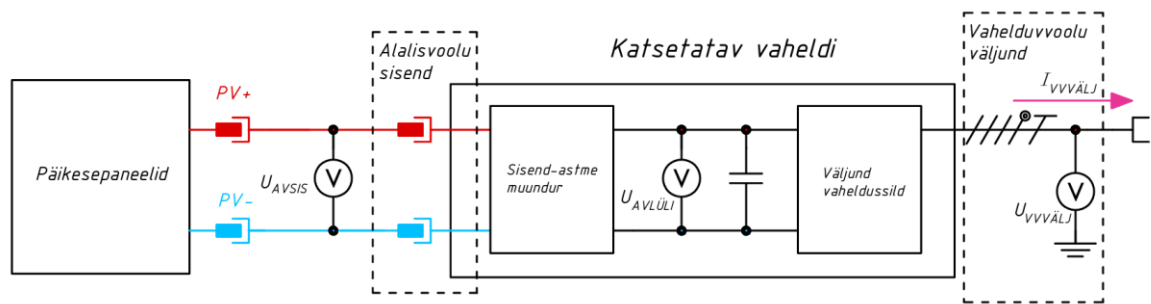
Katse juures valiti muudetavaid parameetreid aktuaalsuse ning nende hinnatava mõju järgi katseseadmele. Katsete juures seati eesmärgiks seetõttu alltoodud parameetrite muutumise mõju uurimine. Katsete kavandamise aluseks oli väikese võimsusega vaheldi kasutamine, mille eeldatav struktuurskeem on esitatud alloleval joonisel (vt Joonis 2.1).

**Sisend-astme alalispingemuundur** - eesmärk on muundada fotogalvaanilisest allikast väljuva alalisvoolu elektrienergia vaheldi töö jaoks sobiliku alalisvoolulüli pinget tasemele. Alalisvoolu pingemuundur võib kasutada erinevat tüüpi topoloogilisi skeeme (näiteks pinget tõstev muundur või pinget langetav muundur). Alalisvoolumuunduri väljundiks on muunduris olev alalisvoolulüli.

**Väljundvaheldi** - kasutab alalispingemuunduri väljundis oleva alalisvoolulüli elektrienergiat ja muundab selle vahelduvvooluks nõutud pinget ja sageduse tasemel. Selles topoloogilises osas toimub peamiselt pinget muundus läbi pinget lülituste kindlatel moduleeritud ajavahemikel (enamasti läbi pulsilaiusmoduleerimise).

**Juhtimisahel** - vastutab antud muundurite talitluse juhtimise eest. Juhtimisahel sisaldab endas tavaliselt mikrokontrollerit, signaaliprotsessorit ja palju teisi erinevaid elektroonikakomponente, et juhtida muunduri komponentide tööd läbi erinevate algoritmide. Algoritmide võivad olla üles ehitatud erinevate vaheldi töö jaoks vajalike protsesside läbi viimiseks (näiteks vaheldi parameetrite jälgimine ning juhtimine, andmeside ja MPPT (maksimaalse võimsuspunkti jälgimine)).

**Kommunikatsiooni liidestus** - eesmärk hallata vaheldi tööd ja jälgida olulisi talitusparameetreid läbi andmesidekanalite. Andmesideühenduse tagamiseks kasutatakse peamiselt kasutatakse vaheldiga kommunikatsiooniks Ethernet kaabelisidet ning IEEE 802.11 traadita andmeside standardit (rahvakeeli tuntud ka kui Wi-Fi).



Joonis 2.1. Katsetatava vaheldi olulised ühendused ja katsetustel kirjeldatavad pinged struktuuris.

- **Vaheldi alalisvoolu-sisendi pingetase**

Päikesepaneelide ühendamiseks kasutatava vaheldid on ette nähtud tööks laias alalis-sisendpinge vahemikus. Alalis-sisendpinge päikesepaneelidelt võib olla muutuva tasemega vastavalt langeva päikesekiirguse intensiivsusele ja ka temperatuurile. Täiendavalt on vaheldi esimene aste töös selliselt, et tagaks päikesepaneeli koormamise maksimaalses paneeli võimsuspunktis. Maksimaalse võimsuspunkti jälgimissüsteem ja selle erinevad algoritmid töötavad vaheldi esimeses astmes ja muundavad alalispinge stabiilseks alalisvoolulülil olevaks pingetasemeks.

Alalisvoolusisendi tegelik sisendpinge võib olla alalisvoolulüli pingetaseme kujundajaks. Et vaheldi vahelduvvoolu-toitevõrgu poolne vaheldi sildmuundur töötab erineva talitluspingega, võib selline aspekt kujundada nii alalisvoolusisendi kõrgsagedus-mürataseme kui ka vahelduvvooluväljundi kõrgsagedus-mürataseme ja vahelduvvooluväljundi madalsagedusliku häiringutaseme (so vooluharmonike intensiivsuse).

Katsetel oli eesmärgiks muuta alalis-sisendpinge taset selliselt, et teha vähemalt 4 katsetust erinevatel alalispingetasemetel.

- **Vaheldi vahelduvvooluvõrgu pingetase**

Alalisvoolulüli ühendus on tugevalt seotud päikesepaneelide poolt antava sisendvooluga. Vaheldi töös mõjutab nii alalisvoolulüli pingetase ja voolutugevus tugevalt jõuelektroonika talitlust elektrienergia salvestavate komponentide (peamiselt kondensaatorite) parameetritest tulenevalt. Vaheldi poolt vahelduvvoolu väljundvõimsuse andmine, sõltuvalt alalisvoolulüli talitluses, tekitavad lülitamised voolu ja pinge siirdeprotsesse, mis on erineva intensiivsuse ja ulatusega, nt lülitluspingete hüpped.

Vaheldi väljundis oleva vahelduvvoolukuju sõltub väga otseselt nii kommuteerivate pingete tasemetest (alalisvoolulüli pingetase) kui ka väljundpingetasemest. Näiteks 10% madalal jaotusvõrgu pingetasemel peab väljundvoolu tugevus olema 10% kõrgem, et saavutada samasuur väljundvõimsus.

Neid lülituse tagajärjel tekkivaid lülitusprotsesse üritatakse vaheldi järel siluda L ja C ahelatel põhinevate filtrite abil, kuid filtrite töö ei pruugi olla küllaldane ja võib olla ebapiisav, kui häiringute intensiivsus kasvab. See omakorda aga võib põhjustada suuremaid voolumoonutusi ja pinge kõrgsagedushäiringuid.

Vaheldi vahelduvvooluvõrgu väljundi pingetaset muudetakse selliselt, et teha vähemalt 4 katset erinevatel oodatavatel madalpinge-jaotusvõrgu tasemel.

## **2.3 Katsetatava seadme elektriliste häiringute kirjeldus**

Elektromagnetilisi häiringuid saab jaotada nende levimise viisi alusel kaheks: kiirguslik ja juhtivuslik häiring. Elektriseadmeid võivad häirida mõlemad häiringuliigid, ning töökindluse seisukohast on oluline, et need häiringud oleks küllalt madalal tasemel.

### **2.3.1 Kiirguslik häiring**

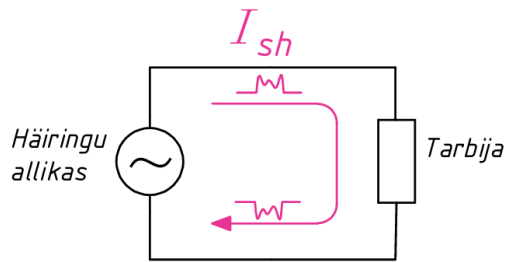
Kiirguslik häiring on elektri- ja magnetvälja poolt kantud häiring elektriseadmes. Selle levitee on läbi õhu ja kiirgusliku häiringu levimiseks ei ole vaja juhtmeühendust. Kiirguslikud häiringud võivad olla põhjustatud juhtmetes levivatest suurustest. Siin lõputöös kiirguslikke häiringuid ei vaadelda.

### **2.3.2 Juhtivuslik häiring**

Juhtivuslikud emissioonid on elektroonikaseadmete poolt tekitatud soovimatud elektromagnetilised signaalid, mis levivad elektriseadmete vahel läbi sidestuse (elektriline ühendus näiteks toitejuhe või elektriline sidekaabel). Juhtivusliku emissiooni põhjusteks võivad olla näiteks lülitamistalitlusega kaasnev EM-müra või signaalide lainekujus kaasatud harmoonikud. Juhtivuslike häiringute kerkimist soodustab näiteks koormuse ning toiteallika või toitevõrgu kõrgsageduslike impedantside mittesobivuse ja elektri seadme halb maandus [7]. Juhtivuslikke häiringuid vaadeldakse 2 erineva põhitopoloogia alusel.

### **Asümmeetrilised häiringud**

Asümmeetrilised häiringud on juhtivuslikud häiringud, mis tekivad häiringu tekitaja ja tarbija vahel vähemalt kahel sidestatud juhtmel. Asümmeetrilise häiringu leviku näide koos elektriliste sidestustega on toodud all joonisel vt Joonis 2.2. [7]

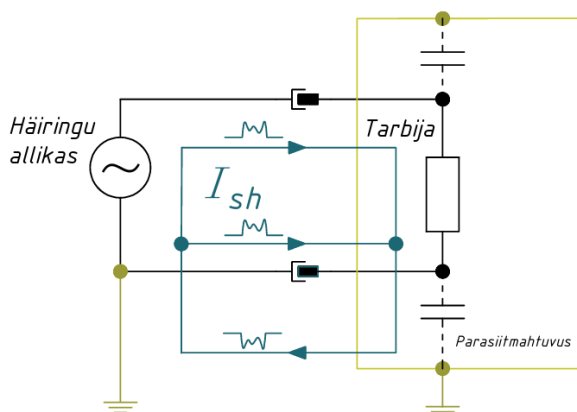


Joonis 2.2. Asümmeetriline häiring elektriskeemis.

Päikeseenergia vaheldite katsetamisel on alalisvooluahelates ette nähtud asümmeetriliste häiringute tasemete mõõtmine vastavalt normdokumendile IEC 62920 [4].

### Sümmeetrilised häiringud

Sümmeetrilised häiringud on juhtivuslikud häiringud, mis tekivad sidestatud juhtide ja maandatud ühenduste vahel. Sümmeetrilise häiringu leviku näide koos elektriliste sidestustega on toodud all joonisel vt Joonis 2.3.



Joonis 2.3. Sümmeetriline elektriskeemis ja selle seos parasiitmahtuvusega.

Katsetataval seadmel kuulub mõõtmisele vastavalt IEC 62920 [4] vahelduvvooluahela tehisevõrku kasutades sümmeetriline juhtivuslik häiring. Samuti kuulub mõõtmisele alalisvoolupoolel sümmeetriline häiringusuurus.

## 2.4 Vaheldi elektriliste häiringute piirnõuded esitavad standardid

Vaheldid peavad vastama erinevatele EMÜ normdokumentide tingimustele, et vältida nende poolt põhjustatud häiringuid ning et vaheldi ei segaks oma tööga teiste elektri või raadioseadmete normaalitalitlust. Standardeid ja nõudeid elektrilistele häiringu tasemetele, mis on seatud mikrovaheldile on väga erinevaid, need võivad erineda nii

riigiti kui ka sõltuvalt keskkonnast, kus vaheldi töötab. Üldise ülevaate annab näiteks IEC 61000-2-5 tehniline dokument [6].

#### 2.4.1 IEC 61000-3-2 nõuded vooluharmonikutele

IEC 61000-3-2 esitab piirtasemed iga individuaalse vooluharmoniku tasemele. Piire on seatud mitmele eri seadmegrupile erinevalt. Päikeseenergia vahelditele on täpsustatud IEC 62920 [4] standardis, et vaheldi peab vastama IEC 61000-3-2 grupp A tasemetele.

IEC 61000-3-2 piirtasemed on toodud nii paaris- kui ka paaritutele vooluharmonikutele. Antud töö keskendub ainult voolu paaritute järku harmoonilistele komponentidele. IEC 61000-3-2 grupp A seadmetele määratud vooluharmonikute piirnormid on toodud allolevas tabelis vt Tabel 2.1.

Tabel 2.1. IEC 61000-3-2 grupp A seadmetele määratud vooluharmonikute piirnormid

Harmonilise järk $n$	Suurim lubatud harmonilise vool A
<b>Paaritud harmoonilised</b>	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \frac{15}{n}$
<b>Paarisharmonilised</b>	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \frac{8}{n}$

#### 2.4.2 EN 62920 nõuded häiringu emissioonitasemetele

Kõrgsageduslikele häiringu emissioonidele vaheldi vahelduvvoolu ühendusel on piirangud seadnud standard EN 62920:2017+A11+A1:2021. Alltoodud joonisel 2.4 on toodud piirnormid mitte-olme kasutuseks ette nähtud klass A fotoelektrilistele vahelditele sagedusribal 150 kHz – 30 MHz. Antud tabelis on jaotatud seadmed ära võimsuse järgi erinevatesse võimsusastmetesse: madal-, kesk- ja kõrgvõimsusega vaheldid. Nende emissioonidele on määratud piirangud nii kvaasitipp-väärtuste kui ka keskmistel väärtuste tasemetel. Antud töös käsitletakse ja analüüsitakse ainult keskmiste väärtuste tulemusi. [4]

Standardis on ka toodud välja olmeseadmete klassi (IEC 62920 klass B) piirnormid sagedusvahemikul 150 kHz – 30 MHz. Joonisel 2.5 on toodud eelmainitud olmeseadete häiringu emissiooni piirnormid sagedusvahemikul 150 kHz – 30 MHz.

Tulemuste peatükis on 150 kHz – 30 MHz kõrgsageduslikele häiringu emissiooni joonistele kantud allkirjeldatud visualiseeritud piirjooned.

- **62920 KLASS B** piirjoon tähistab olmeseadmetele ette nähtud piirtasemeid vt Tabel 2.3 vahelduvvooluvõrgu sidendi kohta ja vt Tabel 2.5 alalistoitseidendi kohta
- **62920 KLASS A KÕRG** piirjoon tähistab mitte-olmeseadmetele ette nähtud piirtasemeid, kus vaheldi võimsus ületab 75 kVA, vt Tabel 2.2. vahelduvvooluvõrgu sidendi kohta ja vt Tabel 2.4 alalistoitseidendi kohta
- **62920 KLASS A KESK** piirjoon tähistab mitte-olmeseadmetele ette nähtud piirtasemeid, kus vaheldi võimsus ületab 20 kVA, vt Tabel 2.2. vahelduvvooluvõrgu sidendi kohta ja vt Tabel 2.4 alalistoitseidendi kohta
- **62920 KLASS A MADAL** piirjoon tähistab mitte-olmeseadmetele ette nähtud piirtasemeid, kus vaheldi võimsus on alla 20 kVA, vt Tabel 2.2. vahelduvvooluvõrgu sidendi kohta ja vt Tabel 2.4 alalistoitseidendi kohta
- **EN 61000-6-3** piirjoon tähistab 9- 150 kHz piirtaset, vt .

Tabel 2.2. Standardis IEC 62920 toodud vahelduvvoolu ühenduse häiringu emissioonide piirnormid mitte-olme seadmetele sagedusel 150 kHz kuni 30 MHz. [4]

Sagedusvahemik MHz	Nimivõimsus $\leq 20$ kVA		Nimivõimsus $> 20$ kVA <sup>a</sup>		Suure võimsusega elektroonsed süsteemid ja vahendid, nimivõimsus $> 75$ kVA <sup>b</sup>	
	Kvaasitipp dB ( $\mu$ V)	Keskmine dB ( $\mu$ V)	Kvaasitipp dB ( $\mu$ V)	Keskmine dB ( $\mu$ V)	Kvaasitipp dB ( $\mu$ V)	Keskmine dB ( $\mu$ V)
0,15 kuni 0,50	79	66	100	90	130	120
0,50 kuni 5	73	60	86	76	125	115
5 kuni 30	73	60	90	80	115	105
			Kahaneb lineaarselt vastavalt sageduse logaritmile			
			73	60		

Tabel 2.3. Standardis IEC 62920 toodud vahelduvvoolu ühenduse häiringu emissioonide piirnormid olmeseadmetele sagedusel 150 kHz kuni 30 MHz. [4]

Sagedusvahemik MHz	Kvaasitipp dB ( $\mu$ V)	Keskmine dB ( $\mu$ V)
0,15 kuni 0,50	66 Kahaneb lineaarselt vastavalt sageduse logaritmile 56	56 Kahaneb lineaarselt vastavalt sageduse logaritmile 46
0,50 kuni 5	56	46
5 kuni 30	60	50
Üleminekusagedusel tuleb kasutada rangemat piirtaset.		

Antud standard käsitleb samuti vaheldile seatud häiringu emissiooni piirnorme alalisvoolu toitesisendi poolel. Standardis on piirnormid toodud alalisvoolu ühendusele nii olmeseadmete klassil kui mitte-olmeseadete klassil sagedusvahemikus 150 kHz kuni 30 MHz.

Mitte-olmeseadmetelt on sarnaselt vahelduvvoolu häiringu emissioonidele ka alalisvoolu häiringu emissioonidel jaotatud seadmed ära võimsuse järgi erinevatesse võimsusastmetesse: madal-, kesk- ja kõrgvõimsusega vaheldid. Tabel 2.4 esitab mitte-olmeseadmete ja Tabel 2.5 olmeseadmete alalisvoolu toitesisendi häiringu emissioonide piirnormid sagedusvahemikul 150 kHz kuni 30 MHz.

Tulemuste peatükis on 150 kHz – 30 MHz kõrgsageduslikele alalisvoolu häiringu emissiooni graafikutele kantud Tabel 2.6 ja Tabel 2.7 esitatud piirjooned.

Tabel 2.4 Standardis EN 62920 toodud alalisvoolu ühenduse häiringu emissioonide piirnormid olmeseadmetele sagedusel 150 kHz kuni 30 MHz [4].

Sagedusvahemik MHz	Kvaasitipp dB ( $\mu$ V)	Keskmine dB ( $\mu$ V)
0,15 kuni 0,50	84 Kahaneb lineaarselt vastavalt sageduse logaritmile 74	74 Kahaneb lineaarselt vastavalt sageduse logaritmile 64
0,50 kuni 30	74	63



Tabel 2.5 Standardis EN 62920 toodud alalisvoolu ühenduse häiringu emissioonide piirnormid mitte-olme seadmetele sagedusel 150 kHz kuni 30 MHz [4].

Sagedusvahemik MHz	Nimivõimsus ≤ 20 kVA		Nimivõimsus > 20 kVA kuni ≤ 75 kVA		Nimivõimsus > 75 kVA	
	Pinge piirtasemed		Pinge piirtasemed		Pinge piirtasemed	
	Kvaasitipp dB (μV)	Keskmine dB (μV)	Kvaasitipp dB (μV)	Keskmine dB (μV)	Kvaasitipp dB (μV)	Keskmine dB (μV)
0,15 kuni 5	97 kuni 89	84 kuni 76	116 kuni 106	106 kuni 96	132 kuni 122	122 kuni 112
5 kuni 30	89	76	106 kuni 89	96 kuni 76	122 kuni 105	112 kuni 92

EN 61000-6-3:2021 nõuded häiringu emissioonitasemetele kehtivas standardis [8] ei sõnasta tingimusi sagedusvahemiku 9 kHz ... 150 kHz emissioonitasemete kohta. IEC poolt on välja töötamisel antud standardi osa muudatus (61000-6-3/AMD1/FRAG2 ED3) [9], milles on antud ettepanek laiendada olmekeskonna seadmete häiringuemissioonide sagedusriba madalama sagedusriba kaasamiseks, vahemikus 9 kHz ... 150 kHz.

Tabel 2.6 61000-6-3/AMD1/FRAG2 ED3 esitatud ettepanek häiringu emissioonide piiramiseks vahemikus 9 kHz ... 150 kHz [9].

Sagedusvahemik, MHz	Kvaasitipp, dBμV	Keskmine*, dBμV
0,009 kuni 0,05	120,5 kuni 110	110,5 kuni 100
0,05 kuni 0,15	104 kuni 80	94 kuni 70
0,15 kuni 0,5	66 kuni 56	56 kuni 46
0,5 kuni 5	56	46
5 kuni 30	60	50

**\*Märkus.** Keskvaartuse tase on esitatud tuginedes muudes normdokumentides esitatud tasemetele. Näiteks Tabel 2.3 esitab nii kvaasitippväärtuse kui ka keskvaartuse piirsuurused. Viimane on kvaasitippväärtusest 10 dB madalamal tasemel. Sarnaselt on ka siin tabelis aluseks kvaasitipp-väärtused, mis on esitatud standardi ettepanekus [9] ja nendest tuletatud keskvaartused 10 dB madalamal intensiivsuse tasemel.

### 2.4.3 Kõrgsagedus-pingehäiringute esitus

Kõrgsageduslike juhtivuslike häiringute puhul hinnatakse nende taset läbi pingekomponendi intensiivsuse. Kõrgsagedushäiringute korral on kasutuses logaritmilisel alusel suuruste esitus, suhtühikuga dB. Näiteks suhtühiku  $U_B = 1 \mu\text{V}$  suhtes esitatav häiringupinge suurus kannab laiendatud tähistust  $\text{dB}\mu\text{V}$  ja see arvutatakse

$$U_H[\text{dB}\mu\text{V}] = 20 * \log \left( \frac{U_x}{U_B} \right) \quad (1.3)$$

kus

$U_H$  – Häiringu emissiooni pinge [ $\text{dB}\mu\text{V}$ ]

$U_x$  – Häiringu emissiooni pinge [V]

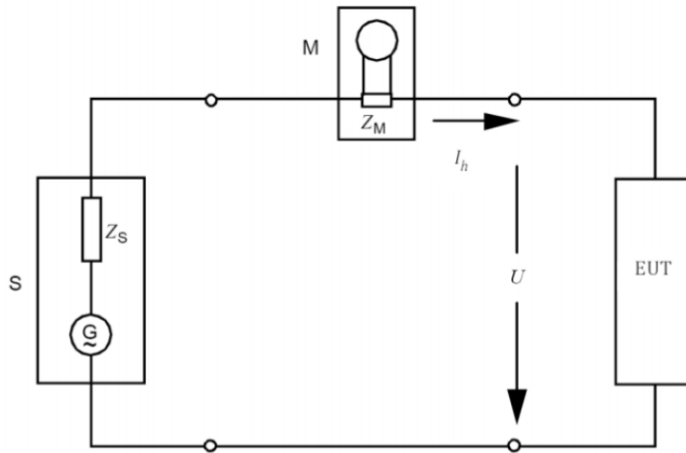
$U_B$  – Suhteline pinge baasväärtus  $1 \mu\text{V}$ .

## 2.5 Normdokumentide alused katsetusteks

Madalsageduslike häiringute katsetamiseks on juhised leitavad dokumendist IEC 61000-3-2 [10], mis sätestab vooluharmonoonikute tasemed kui 16 A nimivoolutugevusega seadmetele.

Oluline mikrovaheldi elektriliste häiringute testimise juures on katsete korratavus. Selle jaoks on kehtestatud ka standardid. IEC 62920 [4] käsitleb, millistel tingimustel tuleb teostada EMÜ katsetusi ja kontrolltoiminguid.

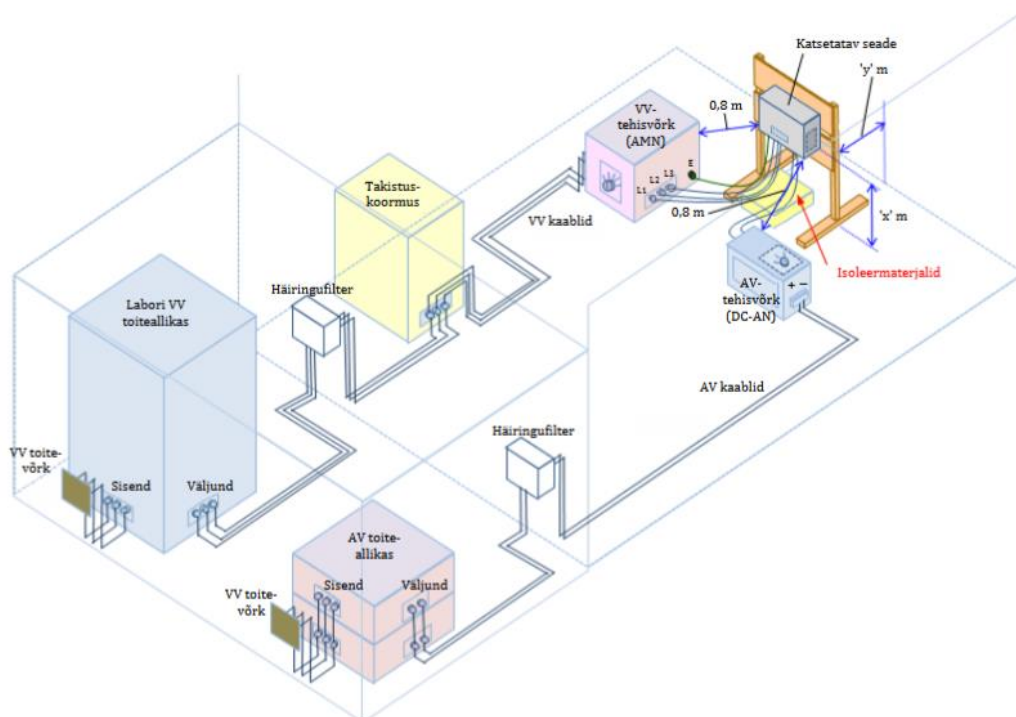
Alltoodud eskiisjoonis (Joonis 2.5) esitab kuvatõmmise antud standardil mikrovaheldi EMÜ juhtivuslike häiringute testimise jaoks. Antud juhisis ei sõnasta vajadust mõõteahela ümber ehitamiseks kui tingimused on tagatud voolutugevuse mõõtmiseks ja stabiilse ja madala moonutusteguriga pingekuju tagava VV-toiteallika kasutamisega ahela toitmine.



### Selgitused

S	Toiteallikas	Z <sub>M</sub>	Mõõteseadme sisend-näivtakistus
M	Mõõtesead	Z <sub>S</sub>	Toiteallika näiv-sisetakistus
EUT	Katsetatav seade	I <sub>h</sub>	Faasivoolu <i>h</i> -ndat järku harmooniline komponent
U	Katsepinge	G	Toiteallika tühijooksupinge

Joonis 2.4 Normdokumendi IEC 61000-3-2 katsetuskeem vooluharmonikute emissioonitasemete määramiseks [10].



Joonis 2.5 Juhtivuslike emissioonide testimine seina külge kinnitatavatel- ja mikrovahelditel [4].

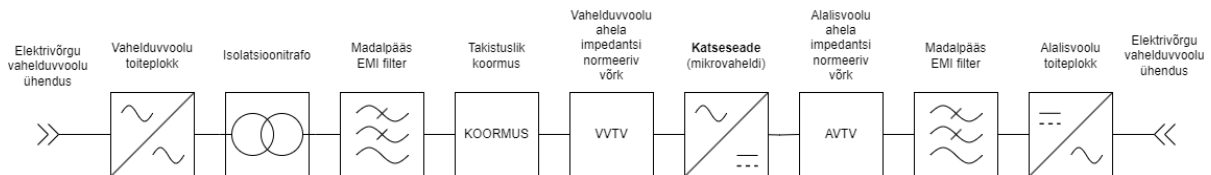
Joonis 2.5 on kujutatud, et võrgutoidet vaheldile tagab elektrivõrgu vahelduvvoolu ühendus läbi vahelduvvoolu toiteploki. See on ühendatud kõrgsagedusliku müra eemaldamiseks madalpääsfiltriga. Antud filtri väljund on ühendatud takistusliku koormusega, mis töötab võrgusagedusliku võimsuse jaoks koormusena, mis hajutab ka vaheldi poolt vahelduvvooluväljundisse toodetud võimsuse. Koormusesse on paralleelselt ühendatud ka vaheldi, kuid vaheldi kõrgsagedusliku mõju lahti sidestamiseks on see ühendatud koormusega jadamisi läbi VVTV-i (vahelduvvoolu tehivõrk - *Alternating current line impedance stabilization network / AMN – artificial mains network*). VVTV tagab vaheldi ühenduse koormuse ja toitevõrguga madalsageduslike suuruste (eriti võrgu talitlussagedus 50 Hz), kuid sidestab lahti kõrgsageduslike suuruste tee vahelduvvoolu-toiteallikasse.

Vaheldile tagab alalisvoolutoite toiteplokk, mis on toiteks ühendatud välise vahelduvvoolu elektrivõrguga. Alalisvoolu toiteploki väljund on ühendatud vaheldiga läbi filtri ja AVTV (alalisvoolu tehivõrk - *Direct current line impedance stabilization network*). Sarnaselt VVTV-le eraldab ka AVTV alalistoiteallika kõrgsagedussuurused vaheldi alalistoitesisendist ja tagab läbipääsu alalis-võimsussuurustele.

# 3 Katseseadmete valik ja katsetingimuste kirjeldus

## 3.1 Üldine katseskeem laboris

Joonis 3.1 esitab normatiivsele alusdokumentide soovitusel [4] [10] vastava skeemi järgi koostatud katseskeem vaheldi testimiseks.



Joonis 3.1. Vaheldi vooluharmonikute ja juhtivuslike kõrgsagedus-häiringute emissioonide katsetuste skeem.

Katsetusteks sobiliku tehnikavahendite valikul on otsustavaks TalTech laboris olemasolevate seadmete valik. Määravaks on TalTech Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektromagnetilise ühilduvuse labori sisseseade, kus on ka ette valmistatud katsetuskoht juhtivuslike kõrgsagedushäiringute mõõtmiseks.

Katsetel on üks olulisemaid rolle mõõte-tehisevõrgul. Selles seadmega on võimalik teostada kõrgsagedushäiringute normide kohane mõõtmine, sest tehisevõrk kujutab endast laiaribalist normitud näivtakistusega koormust. Katseskeemis on kasutusel kaks tehisevõrku: vahelduvvooluahelate tehisevõrk (VTV) ja alalisvooluahelate tehisevõrk (AVTV). Madalal sagedusel töötab tehisevõrk väga väikese impedantsiga ahela lülina ja ei mõjuta võrgusagedusel ahela tööd. Kõrgsageduse läbipääsu tehisevõrk takistab ja sidestab kõrgsageduskomponendi üle 9 kHz sagedusel mõõteanalüsaatoriga mõõtmiseks.

## 3.2 Katsetatav seade (päikeseenergia vaheldi)

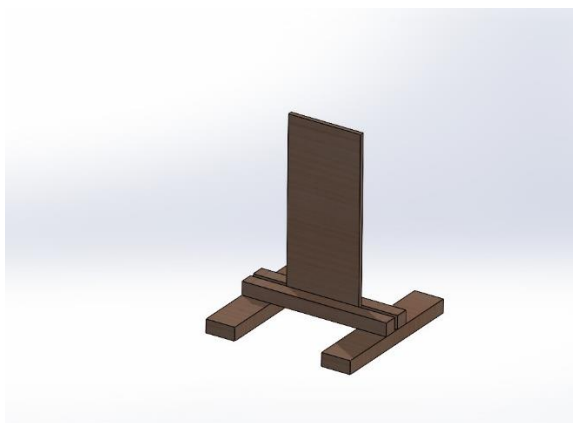
Vaheldi ehk siin lõputöös katsetatav seade, on mõeldud fotogalvaanilise allikaga ühendamiseks alalispoolel. Seadme eesmärk on muundada fotogalvaanilisest elemendist antav alalisvoolul elektrivõimsus elektrivõrgus sobivaks vahelduvvoolul üle antavaks võimsuseks. Vaheldi valiku kriteeriumiteks oli, et vaheldi oleks laia kasutusvaldkonna toode ja aktuaalne toode, ning jääks võimsuselt alla 3 kW, mis on labori seadmete ülempiir.

Valitud vaheldiks sai GROWATT MIC 2000TL-X vaheldi, mis on aktuaalne toode nii Eestis kui ka mujal maailmas. Selle ühefaasilise väljundiga vaheldi maksimaalne väljundvõimsus on 2000 W, ning väljundvool kuni 9,5 A. Antud toode ei olnud küll loetletud Elektrilevi elektritootja liitumiste kinnitatud mudelite nimistus, kuid sama toote perekonna suurema võimsusega tooted olid nimekirjas esindatud. Vaheldi parameetrite nimiväärtused on tootja poolt antud andmelehes ja on toodud all tabelis (vt Tabel 3.1). [11] [12].

Tabel 3.1 Vaheldi katsetes kasutatavad peamised iseloomulikud parameetrid. [11]

Maksimaalne VV väljundvõimsus, [W]	2000 W
Maksimaalse võimsuspunkti jälgimise sisendpingevahemik, [V]	50 V – 500 V
VV väljundpingevahemik, [V]	180 V – 280 V
VV väljundi toitesagedusvahemik, [Hz]	45 Hz – 55 Hz

Vaheldi madalsageduslike häiringute ja juhtivuslike kõrgsagedushäiringuemissioonide emissioonide mõõtmiseks tuli antud töös valmistada vaheldile mõõtmisteks sobiv rakis ja ette valmistada kaabelühendused. Rakise valmistamisel oli vajalik arvestada vaheldi mõõtmete ja EVS-EN 62920:2017+A11+A1:2021 standardis toodud rakise mõõtmetega ja mõõteasukoha juhistega [4]. Rakise peab olema valmistatud täielikult elektrilisest isoleermaterjalist ja täiendavate metallmaterjalide kasutamine ei ole lubatud. Rakise juures arvestati, et katsete teostamisel peab vaheldi madalaim osa maapinnast 40 cm kõrgusel ja vähemalt 80 cm kaugusel varjestatud seinast. Vaheldi rakise kolmemõõtmeline mudel on toodud all joonisel (vt Joonis 3.2).

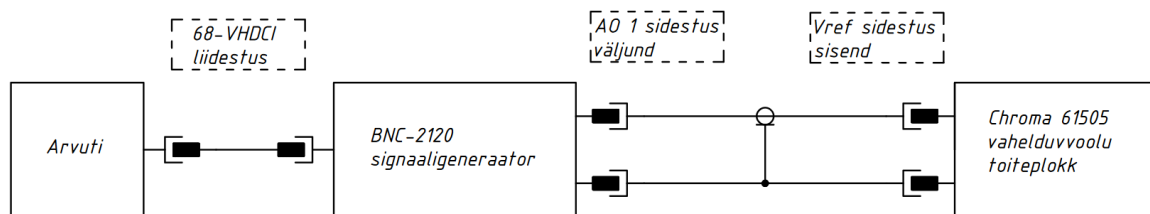


Joonis 3.2. Vaheldi rakise raalprojekteeritud mudel.

## 3.3 Katseahela seadmete nõuded ja kirjeldus

### 3.3.1 Vahelduvvoolu toiteplokk

Vahelduvvoolu toiteploki nõudeks oli, et selle väljundpinge oleks madala pingeharmonoonmoonutuste tasemega. Valitud toiteallikaks on Chroma 61505 vahelduvvoolu toiteplokk, mis genereeriks madala näivtakistusliku allikana väljundtoidet toiteallikast seest või väljast genereeritud lainekujule vastavalt. Toiteallikale saab pingelaine kuju tagada ka välisest allikast läbi koaksiaalkaabli ühenduse. Nimelt on toiteplokil BNC-tüüpi koaksiaal-sisend "Vref", mis on ühendatav näiteks välise signaaligeneraatoriga. Selle kaudu on võimalik ühendada koaksiaalkaabliga signaaligeneraatorina näiteks NI toodetud BNC 2120 tüüpi andmehõive mooduli ühendusmooduli analoogkanali väljundipistik. Vahelduvvoolu toiteploki üldised ühendused on esitatud all vt Joonis 3.3 labori seadistuses.



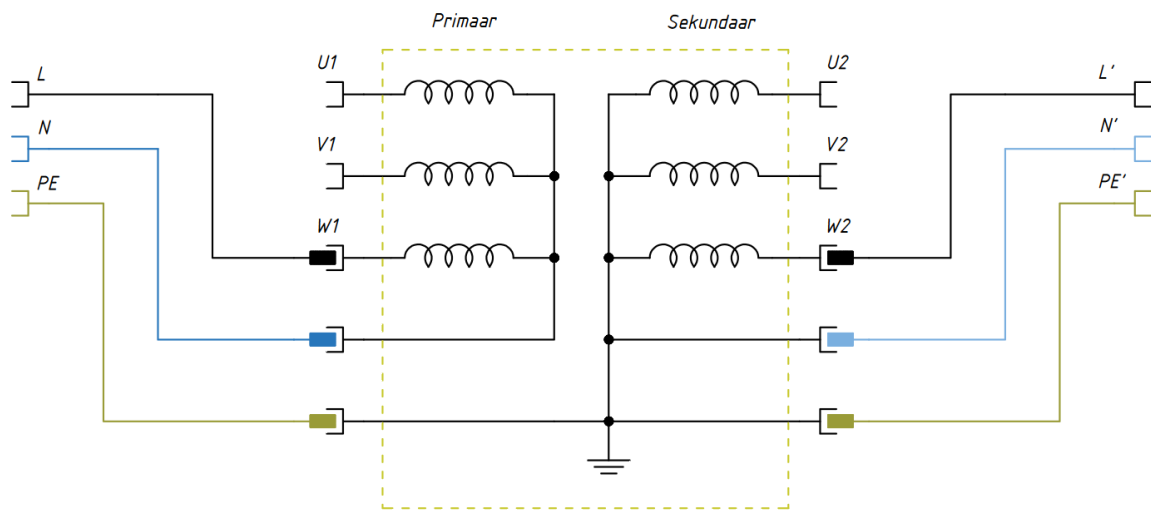
Joonis 3.3 Vahelduvvoolu toiteploki juhtimisahela liidestamine arvuti kaudu pingelaine kuju ette andmisega tööks.

Signaalpinge, mis on sidestatud vahelduvvoolu toiteploki BNC-2120 signaaligeneraatori väljundisse, antakse arvutis Matlab-i tarkvara funktsioonidele tuginedes ette signaaligeneraatorile antud töös paaritute sinusoid-harmonoonikute pingelaine ja faas, ning moduleeritud sinusoidi ajaline kestus [13]. Selline funktsionaalsus võimaldab katsetada vaheldeid mh keerulistes jaotusvõrgu oludes, kus esineb väga tugev pingelaine kuju moonutamine.

### 3.3.2 Isolatsioonitrafo

Isolatsioonitrafo on kaasatud katseskeemi, et tagada katsetatava vaheldi töö otsema ühendusega neutraaliga. Piirang tulenes mh vaheldist endast (vaheldi töötas ainult maandatud neutraali otseselt ja madala oomilises ühenduses). Katseskeemi on valitud 5 kVA võimsusega kolmesambaline kuivtrafo. Trafo Polylux TTX5 oli Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudil olemas eelnevast projektist. Trafo oli 3 - faasiline ning tootja poolt Yyn0 (täht-maandatud täht) ühendusviisiga, kuid antud töös kasutati trafot peale mõningaid muudatusi 1- faasilisel

lahendusel maandatud neutraaliga primaarpoolel. Trafo elektriline ühendus on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 3.4).



Joonis 3.4. 3- sambalise isolatsiooni trafo elektriline ühendusskeem katsetuskeemis.

Ühefaasilises ühenduses oli isolatsioonitrafo võimsus 1/3 ulatuses kasutatav. Seega jäi isolatsioonitrafo võimsuse läbilaskevõimeks umbes 1,6 kVA.

### 3.3.3 Vahelduvvoolu madalpääs-toitefilter

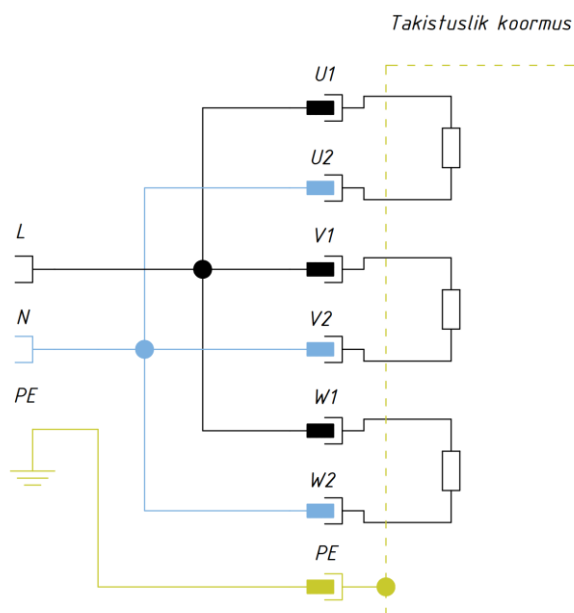
Vaheldi vahelduvvoolu-tehisevõrgu toitevõrgu poolsesse liidese ja isolatsioonitrafo vahele on standardis [4] soovitatud lisa EMI-filter. Filtri ülesanne on vähendada vahelduvvoolu toitevõrgust katsetatavasse seadmesse saabuvat EM-müra. Filtriks sai antud töös valitud Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi EMÜ laboris paikneva GTEMCELL-i ristlaine-elektromagnetkeskkonna filter. Filtri sellise valiku põhjuseks oli filtri väga hea oodatav toime. Tegemist oli labori personali poolt osutatud parima filtriga, mis laboris olemas oli ning see oli varustatud vahelduvvooluahelate ühendamiseks sobilike pesade ja pistikutega.

### 3.3.4 Takistuslik koormus

Vaheldi vahelduvvoolu väljundi koormamiseks sai valitud koormus, mis oleks sobilik tööks vaheldi väljundpingel EN50160 standardi põhiselt kui oleks tootja poolse võimsusega üle vaheldi nimivõimsuse. Selleks sai valitud Frizlen-i poolt toodetud BW20 koormus, mida rakendati skeemis kokku 2 tk. Tegemist on küll 3 – faasilise koormusega, kuid antud seadet saab ka edukalt kasutada 1 – faasilisteks lahendusteks muutes selle ühendusi vastavaks. Koormuse nimivõimsus on 3 kW. Koormusega sidestatud juhtmed on samuti parema kõrgsagedusliku sidestuse tagamiseks omavahel keerutatud. Koormuse võimsuse reguleerimiseks kasutatakse 6 – astmelist lülitit, mis 230 V juures



tõstab 1 – astme muutusega võimsust koormusel umbes 500 W. Katseskeemis kasutatava koormuse elektrilised ühendused on toodud all joonisel 1.6.



Joonis 3.5. Katseskeemis kasutatava takistusliku koormuse elektrilised ühendused.

Koormuse võimsuse valiku kriteerium oli järgmine. Katsetuskeemis olev vahelduvtoiteallikas Chroma oli võimeline tagama ainult väljundvõimsuse tootmise kuid mitte võimsuse vastuvõtu vaheldist. Stabiilsuse tagamiseks oli katseskeemis vajalik tagada pidev Chroma toiteallika koormamine.

Algse katseskeemi vahelduvvoolu-ühenduse võimsus ületas isolatsioonitrafo koormusvõimekuse ja antud isolatsioonitrafo ei olnud ühesambalise ühendusega võimeline toitma ühe koormusega fikseeritud võimsust (3 kW). Seetõttu oli tarvilik ühendada lisakoormus isolatsioonitrafo sisendi ja vahelduvvoolu toite vahele. See oli vajalik, et tagada vahelduvvoolu võimsus vaheldile nii kõige kõrgema kui kõige madalama lubatud vahelduvvoolu ühenduse pinge korral (koormuse astmeid oli tarvilik reguleerida, et vahelduvvoolu ühenduse võimsus oleks 207 V korral vähemalt vaheldi nimivõimsus ja 253 V korral oleksid koormused võimelised ohutult ja nimipiiride juures töötama ja mitte üle kuumenema).

### 3.3.4.1 Vahelduvvooluahela mõõte-tehisevõrk (VTV)

VTV sai valitud selliselt, et see oleks võimeline läbi andma vaheldi väljundvoolu, ja oleks antud töös käsitletud standardite mõõtmistöödeks sobilik. VTV-ks katseskeemil sai valitud Rhode & Schwarz-i HM6050-2. Antud seade on Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika katseseade juhtivuslike emissioonide mõõtmiseks. Antud katseseade võimaldab vahelduvvoolu väljundist maksimaalselt 16 A voolu

tarvitisse. Antud seade on ette nähtud katseseadme välise vahelduvvoolu ühenduse kaudu toitmiseks ja vahelduvvooluvõrgu kõrgsageduslike suuruste alla surumiseks [14]. Seade vastab standardite tingimustele sagedusvahemikus 9 kHz kuni 30 MHz, mis esitavad nõuded vahelduvvooluühenduste mõõtmiseks (CISPR 16-1-2 [15] seadmed ja CISPR 16-2-1 [16] meetoodika osas).

VVTV-I on kaks eristatavat vahelduvvooluühendust. Esimene on vahelduvvoolu võrgu poolne, millega ühendatakse katseteks Chroma toiteallikas. Teine on katsetatava seadme poolne. Sellest ühendusest mõõdetakse juhtivuslike kõrgsagedus-häiringupingete suurus, antud VVTV puhul mõõdetakse sümmeetrilist häiringut silmas pidades häiringupinge suurus faasijuhi ja neutraali vahel, ühekaupa. Mõõdetava ühenduse saab valida VVTV-I oleva lüliti abil.

### **3.3.5 Alalisvoolu ahela impedantsi normeeriv võrk (AVTV)**

AVTV sai valitud selliselt, et see sidestaks vaheldu alalisvoolu sisendi lahti AV-toiteallika kõrgsageduslikust mürast, ja et vaheldu sisendi kõrgsagedusmüra mõõtmistöödeks oleks antud töös käsitletud standardite kohaselt [4] [15] sobilik näivtakistus. AVTV-ks katseskeemil sai valitud EMCIS-i LN2 – 100T. Antud seade on Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika katseseade juhtivuslike emissioonide mõõtmiseks. Antud katseseade võimaldab alalisvoolu väljundist maksimaalselt 100 A voolu vaheldisse. Antud seade on katseseadme välise vahelduvvoolu ühenduse kõrgsageduslike (standardi kohaselt 9 kHz kuni 30 MHz) emissioonide mõõtmiseks 50  $\Omega$  sisendtakistusega mõõteanalüsaatorile vastavalt standardile [17] [18].

#### **3.3.5.1 Alalisvoolu ahela madalpääs-häiringufilter**

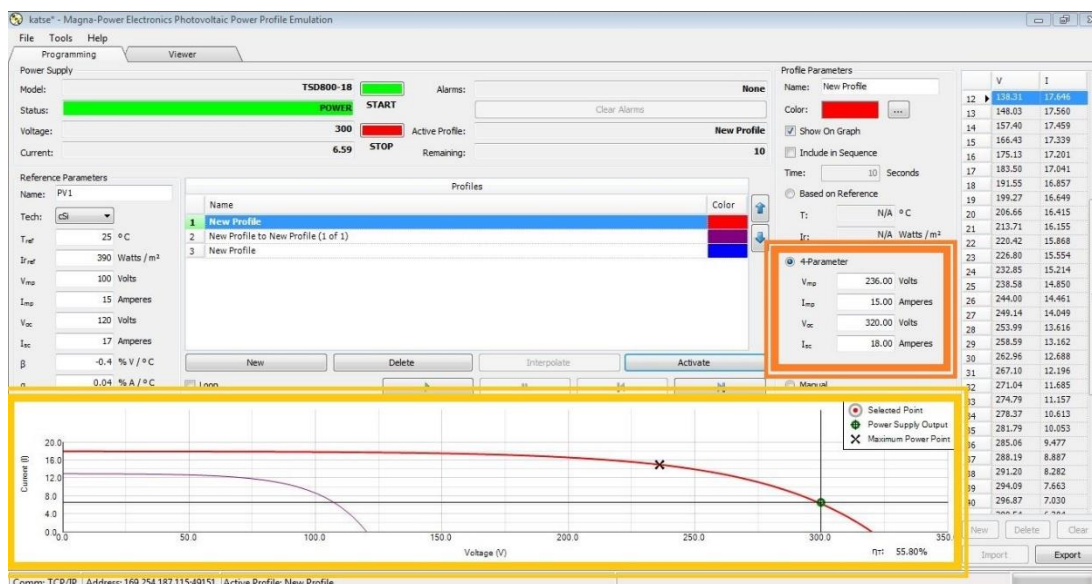
Alalisvoolutoiteallika järele ühendatud madalpääsfiltriks sai algselt kavandatud FN3288IT-25-33-C34-R60. Tegemist oli eeskätt 150 kHz ja kõrgematel sagedustel esinevate suuruste mahasurumiseks. Kuna antud filter ei suutnud katsete baastaseme mõõtmistel alalistoiteallika häiringuemissioone umbes 200 kHz juures piisavalt alla suruda võeti lisaks eeltoodud filtrile kasutusele jadaühenduses Strike Spica 40A, mis vähendas häiringutasemeid eeskätt alla 1 MHz sagedustel.

#### **3.3.5.2 Alalisvoolutoiteallikas**

Alalisvoolu toiteallikas on antud katsete juures ette nähtud imiteerima fotogalvaanilist allikat vaheldu jaoks, andes vaheldu alalisvoolusisendisse elektrienergiat sarnaselt päikesepaneelile. Katsete juures oli peamiseks alalisvoolu toiteallika valiku kriteeriumiks, et antud seade oleks võimeline väljastama vaheldu lubatud alalisvoolu sisendi ulatuse (50 – 500 V) ja vaheldu maksimaalse väljundvõimsuse (kuni 2,5 kW) järgi.

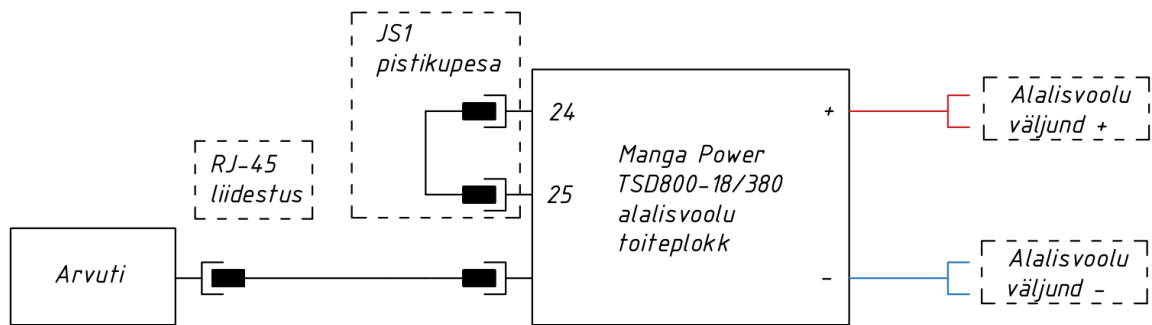
Alalisvoolu toiteplokiks sai valitud tootja Magna Power TSD800-18/380+HS+LXI mudel poolt. Antud mudel suudab maksimaalselt pakkuda 800 V alalispinge taset, ning on 15 kW nimivõimsusega. Antud toiteploki teeb eriliseks, et kindlate elektriliste ühenduste ja tarkvaraliste seadetega on võimalik seda panna jälgendama fotogalvaanilistele elementidele iseloomuliku pinge – voolu karakteristikuid. [19]

Alalisvoolu toiteploki pinget muudetakse Ethernet liidestusega arvutist. Arvuti kasutab Magna Power välja töötatud tarkvara, mille abil saab toiteploki ette määrata lühisvoolu, tühispinge, ning maksimaalse võimsuspunkti pinge ja voolu. Tarkvara interpoleerib andmete järgi vastava funktsiooni, mis sisestatud väärtusi ja päikesepaneeli pinge-voolu kuju arvestaks. Alltoodud joonisel (vt Joonis 3.6) on kuvatõmmis antud tarkvaraga töötamisest. [19]



Joonis 3.6. Alalisvoolu toiteploki juhtimistarkvara kuvatõmmis (oranžis kastis on toodud muudetud parameetrid ja kollases kastis tarkvara poolt sisestatud parameetrite järgi interpoleeritud voolu-pinge funktsioon).

Alltoodud joonis (vt Joonis 3.7) näitab antud töös kasutatavaid Magna Power alalisvoolu toiteploki elektrilisi ühendusi. Osad toiteallika funktsioonid on programmeeritavad füüsiliste ühenduste kaudu. Fotogalvaanilise mooduli imiteerimise karakteristikute aktiveerimiseks kasutatakse toiteallika pistikühenduse JS1 spetsiaalset ühendust.



Joonis 3.7 Alalisvoolu toiteploki elektriline ühendusskeem.

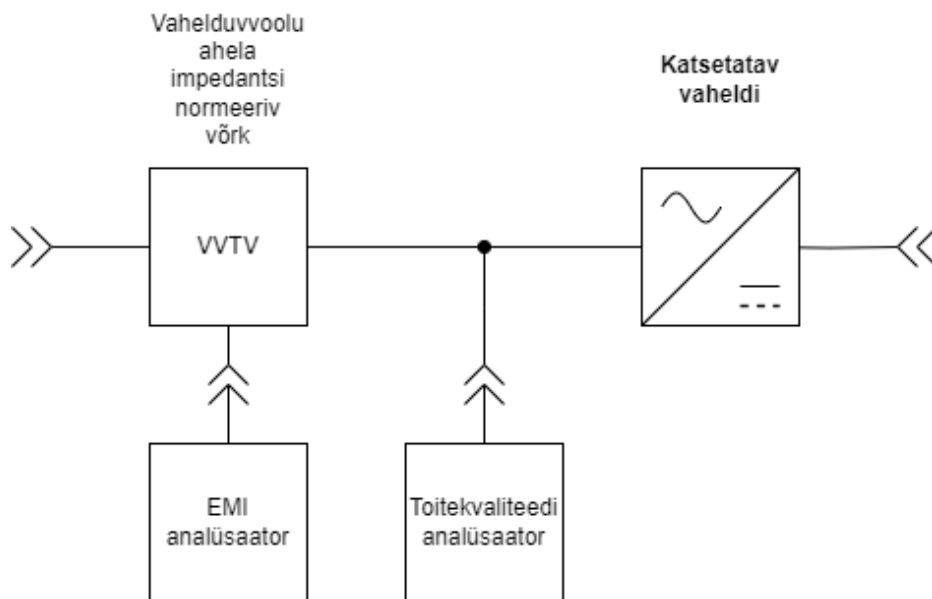
### 3.4 Elektrivõrgu vahelduvvoolu ühendus katseseadmetele ja maandus

Antud töös on katsed teostatud Tallinna Tehnikaülikooli energeetikamaja 1. korrusel paiknevas laboratooriumis NRG-127. Antud laboratoorium saab elektrienergia koos energeetikamajaga NRG-hoones paiknevast alajaamast ja ei ole katsete läbiviimiseks parim lahendus, sest antud võrku on ühendatud erinevat kontori-, valgustus jm tehnikat ja ka teisi katseseadmeid erinevate seal majas paiknevate laboratooriumite jaoks. Siiski on võrgupinged vastavad EN 50160 [5] normidele ja sobiv katseseadmete ja katses osalevate vahendite võrgutoiteks.

Maandusühenduseks rakendatakse NRG-hoone maanduspaigaldisega ühendatud süsteemi. NRG-127 laborisse on ühendatud toitekaabel eraldi maandusjuhiga, maandusjuht on hoone alajaamas ühendatud maanduslatiga. NRG-127 ruumis olevad elektriseadmed on maandatud samas ühenduses ja ühendatud NRG-127 kohaliku kilbi maanduslatiga. Kõik katses osalevad seadmed olid ühendatud maandamiseks kas ruumi maanduslatiga, või ruumis asuva juhtivuslike häiringute maandatud maatasandiga.

#### 3.4.1 Mõõteahelate kirjeldus vooluharmonike mõõtmiseks

Standardis IEC 62920 ei ole esitatud konkreetset juhust vooluharmonike mõõtesukoha valikuks mõõtekeskkonnas. Siin katseskeemis on valitud vooluharmonike mõõtmiseks asukoht võimalikult lähedal vaheldi väljundile. Selleks on vaheldi ja vaheldile järgneva VVTV ühenduskoht. Alloleval joonisel (vt Joonis 3.8) on toodud katseskeemi katseseadme väljundi madalsageduslike häiringute mõõtmise jaoks vajalike mõõteseadmete asukoht ja ühendus.



Joonis 3.8. Katsetatava vaheldi väljundi mõõtmiste ahelaosa.

Katsetatava vaheldi väljundis mõõdetakse madalsageduslikke (kuni 9 kHz) koormusvoolu harmoonmoonutusi toitevaliteedi analüsaatoriga PQ-Box 200-iga. Voolusuuruste mõõtmiseks on kasutuses voolu-ümbrisproovikud, pingesuuruste mõõtmiseks on kasutuses otseühenduses mõõtejuhtmed.

Toitevaliteedi mõõteanalüsaator PQ-Box 200 võimaldab mõõta korraga kuni 4 vahelduvvoolutugevuse suurust ja kuni 4 vahelduvpingesuurust.

### 3.5 Kõrgsagedushäiringute mõõtevastuvõtja

Katsetatavate kõrgsageduslike häiringute sagedusala (9 kHz kuni 30 MHz) juhtivuslike emissioonide analüüsiks kasutatakse spetsiaalset sagedusvalla analüüsi teostavat mõõteseadet. Elektromagnetiliste häiringute (EMI – electromagnetic interference) analüsaatoriks on katsete läbi viimisel rakendatud firma RHODE & SCHWARZ poolt toodetud ESR 7 tüüpi analüsaator. Antud mõõteseadet sai valitud kasutajafunktsioonide ja töökiiruse kaalutlustel. Kuigi laboris olid kasutatavad ka muud analüsaatorid, on antud analüsaator neist kiirem ja selle tulemuste salvestamise funktsioonid paindlikumad.

EMI-analüsaatoriga mõõdetakse häiringuid kõikide tehisevõrkude mõõtekonfiguratsioonide korral. Vajadusel vahetatakse mõõteanalüsaatorisse ühendatud tehisevõrku (AVTV või VTV) koaksiaal-ühenduskaabli ümber ühendamisega.

## **3.6 Katseväärtused ja mõõdetavad parameetrid**

Üldine katse planeerimise seisukoht oli sõnastatud peatükis „2.2 Katsetel peamised muudetavad parameetrid ja nende mõju“. Selleks on kavandatud 2 katseseeriat, esimene vaheldi alalispingesisendi pingetaseme reguleerimisega ja teine vahelduvvooluväljundile seatud võrgupinge taseme reguleerimisega.

### **3.6.1 Katseseeria 1 kirjeldus ja parameetrid**

Vaheldi alalisvoolu sisendpinged vaheldi mõõtmistel said valitud vastavalt vaheldi sisendpinge vahemikule 119 V, 230 V, 200 V, 296 V ja 400 V. Antud vaheldiga prooviti ka 500 V pinget, kuid alalisvoolu liiga kõrge pingega (madalal võimsuspunktil) polnud vaheldi võimeline töötama.

Vaheldi võrdlus-baas vahelduvvoolu väljundpingeks sai valitud vahelduvvoolu toiteallika poolt antud avalike võrkude 230 V nominaalpinge 50 Hz sagedusel.

Katseseeria juures mõõdeti toitekvaliteedi analüsaatoriga madalsageduslike häiringuid (vooluharmonikud) ja pinge ning voolu suurusi. Antud katseseerias mõõdeti AVTV-ga alalisvoolu ning VVTV-ga vahelduvvoolu kõrgsageduslike (9 kHz kuni 30 MHz) pinge häiringuid.

### **3.6.2 Katseseeria 2 kirjeldus ja parameetrid**

Vaheldi vahelduvvoolu väljundpinged vaheldi mõõtmisel said valitud vastavalt EN50160 standardile, mis lubab 230 V nimipinge kõrvalekalle kuni 10% tasemega. Valitud katsetuspinged seadistati tasemele 207 V, 219 V, 230 V, 242 V. [5] Antud vaheldiga prooviti ka 245 V - 253 V väljundpingeid, kuid vaheldi ei olnud sellisel pingetasemel püsivalt (vähemalt üle 15 minuti) nimivõimsusel töötama.

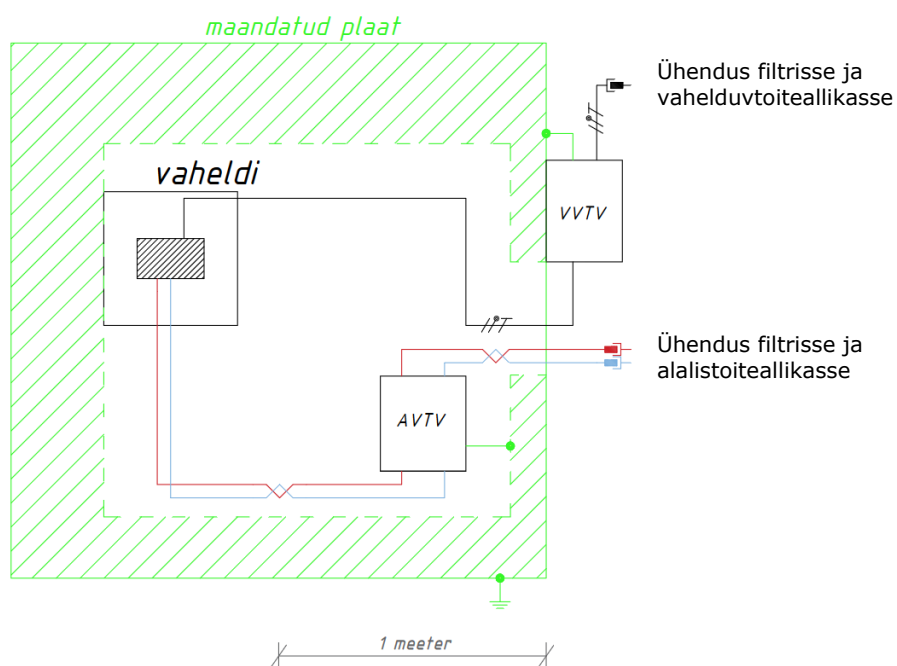
Vaheldi vahelduvvoolu pinget reguleeriti vahelduvvoolu toiteallika seadistusi muutes ning sagedus oli võrgu nimisagedus 50 Hz.

Katseseeria juures mõõdeti toitekvaliteedi analüsaatoriga madalsageduslike häiringuid (vooluharmonikud) ning pinge ja voolu suurusi. Antud katseseerias mõõdeti AVTV-ga alalisvoolu- ning VVTV-ga vahelduvvooluahela kõrgsageduslikke (9 kHz kuni 30 MHz) pingehäiringute tasemeid.

Mõlema katse juures jäi püsivaks katseskeemi paigutus, ühendused ja kahe koormuse takistus. Vaheldi tehisvõrgu vahelduvvoolu väljundis paikneva koormuse takistuseks mõõdeti 38  $\Omega$  ja isolatsiooni trafo sisendi juures paikneva koormusetakistuseks mõõdeti 58  $\Omega$ . Mõlemad takistuse mõõtmised teostati Keysight 34465A multimeetriga peale katsete teostamist võttes arvesse soojustakistusi.

### 3.7 Katseskeemi ülesseadmine juhtivuslike häiringute emissiooni mõõtmiseks

Juhtivuslike emissioonide mõõtmisel on katsete korratavuse jaoks oluline seadmete paigutus varjestatud alal. Sellest lähtuvalt said seadmed paigutatud võttes arvesse EVS-EN 62920:2017+A11+A1:2021 standardi [4] juhiseid. Alltoodud joonis (vt Joonis 3.9) näitab ära maandatud alustasandil seadmete paigutuse [4]. Antud katseskeemi paigalduse jäädvustused on lisatud antud töö Lisa 2.

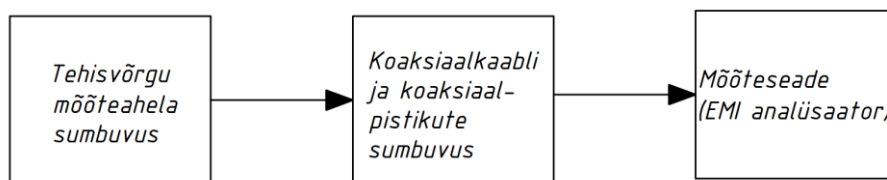


Joonis 3.9. Tehisvõrgu juhtivuslike häiringute emissioonide mõõtmise skeemi pealtvaade maandatud tasapinnal

## 4 Katsetuste läbiviimine ja katsetuselumused mõõtmise

### 4.1 Juhtivuslike emissioonide mõõteahela ülekandeteguri arvutus

Alltoodud joonis 2.2 näitab antud katseskeemi kõrgsagedusliku mõõteahela mõõtetulemuse kujunemise aluseks oleva ahela koosseisu. Selle ahela lülid määravad ülekandeteguri, millega tuleb töödelda EMI-analüsaatorist saadud tulemusi.



Joonis 4.1. Katseskeemi kõrgsagedusliku mõõteahela ülekandetegurid

Mõõteahela osapoolte ülesanded on:

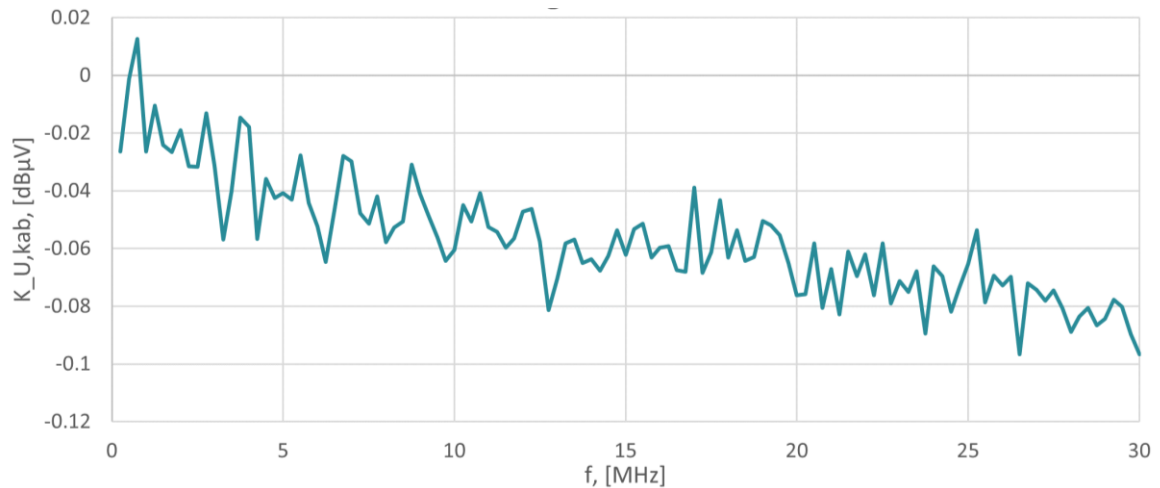
1. Pingehäiringu otsene mõõtja on tehisvõrk. Tehisvõrgu väljundpinge ja tegeliku häiringupinge ülekandetegur on leitud kalibreerimisel ja see on tähistatud muutujaga  $AF$ .
2. Mõõteahelas on tehisvõrgu ja analüsaatori vahel koaksiaalkaabel. Sellel kaablil on iseloomulik ülekandetegur, mis kirjeldab signaali kaablist läbiminekul esinevat kadu. Pingeülekanne on tähistatud muutujaga  $K_{U,kab}$ .
3. Mõõtetulemus esitatakse pingena, mille mõõdab mõõteanalüsaator oma sisendis. Mõõteanalüsaatori pingetulemuse muutuja on  $U_{MM}$ .

Arvutusel rakendatakse logaritmilisel alusel suuruste ja vastavate ühikute süsteemi. Mõõtetulemus on arvutatud rakendades järgmist seost:

$$U[dB\mu V] = U_{MM} + AF - K_{U,kab} \quad (2.1)$$

Kuna kaablitegurid olid alla 30 MHz juures antud katsete puhul väga madalad, ei võetud neid antud töös häiringu tulemustes arvesse. Kaabli ülekandetegur on näitena lisatud antud töö katsetes kasutatavast VVTV kaablist graafikul Joonis 4.2.





Joonis 4.3. Mõõtekaabli ülekandeteguri sõltuvus sagedusest.

## 4.2 Mõõtmistele eelnevad juhtivuslike häiringutasemete mõõtmised

Juhtivuslike häiringupingete mõõtmiseks on tarvilik esmalt hinnata, kas antud katseadistuses on elektriliste ühenduste ilma katsetatava seadmeta seadistuses mõõtes alla standardis toodud piir-nivoojoonte väärtuste. Selleks on tarvilik ühendata antud katseahelas lahti katsetatava vaheldi sisend ja väljund vastavalt AVTV ja VVTV ühendustest.

Seejärel pingestatakse AVTV ja VVTV sisend vastavalt alalisvoolu toiteploki ja vahelduvvoolu toiteallikaga. Teostatakse mõõtmised nii VVTV mõõteahelas kui AVTV mõõteahelas, ning jälgitakse, et mõõdetavatel sagedusvahemikel oleks emissioonide väärtused alla standardis toodud piirnormide tasemete koos vähemalt 10 dB varuga.

Katsetuste läbiviimisel on oluline täheldada, et vahelduvvoolu võrguühenduse häiringupingete tasemed on muutlikud suuresti sõltuvalt kellaajast. Nimelt on elektrivõrguga ühenduses märgatavalt rohkem suure võimsusega elektriseadmeid päevasel ajal. Seetõttu teostati katseid ka võimalikult suures ulatuses tööpäeva järgsel ajal.

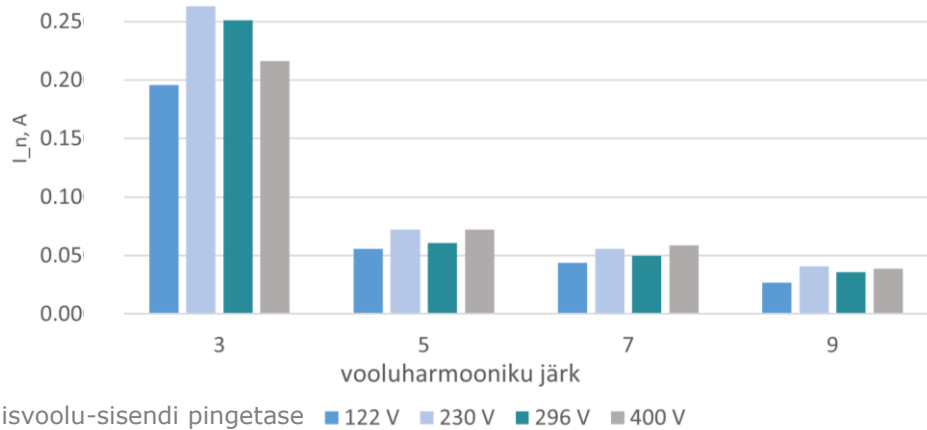
## 5 Tulemused

### 5.1 Madalsageduslike häiringute mõõtetulemused

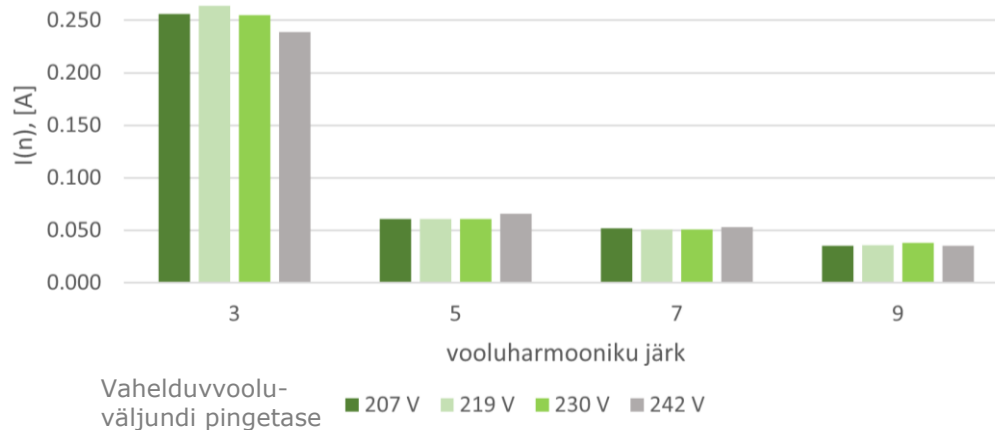
#### 5.1.1 Vooluharmonikud

Madalsageduslikest tulemustest analüüsi vooluharmonikuid, lähtudes standardile EVS-EN 61000-3-2:2014 [10]. Vooluharmonikud aitavad ka erinevalt pingeharmonikutest määrata paralleelühenduste korral emissioone emiteeriva allika (pinge on paralleelühenduste korral ahelates ühtlase väärtusega, aga vooluharmonikud on erinevates harudes sõltuvad antud haru emissioonidest). [10]

Katse 1 ning 2 katsetulemused esitasid, et vooluharmonikute väärtused olid tunduvalt madalamad standardis toodud klass A EVS-EN 61000-3-2:2014 lubatud normidest. (mõõtetulemuste tabel on esitaud Lisa 1) Esimese katseseeria erinevatele vaheldi alalisvoolu sisendpingete varieerimisel mõõdetud vooluharmonikute absoluutväärtustele on koostatud alltoodud tulpdiaagramm vt Joonis 5.1. Teise katseseeria erinevatele vaheldi vahelduvvoolu väljundpingete varieerimisel mõõdetud vooluharmonikute absoluutväärtustele on koostatud tulpdiaagramm vt Joonis 5.2 [10].



Joonis 5.1. Vooluharmonikute absoluutväärtuste sõltuvus vaheldi alalisvoolu-sisendi pingetasemest.



Joonis 5.2. Vooluharmonikute absoluutväärtuste sõltuvus vaheldi vahelduvvoolu väljundi pingetasemest.

EVS-EN 61000-3-2:2014 määratleb näiteks antud standardis liigitatud klass B seadmete jaoks (käsitleb olmekasutuseks elektriseadmeid) vooluharmonikute tasemete piirsuurused suhtelise suuruse alusel (protsentsurusena).

Vooluharmonikute taseme väärtustele vastavat suhtelist (protsentuaalset) väärtust on järgnevalt hinnatud alltoodud valemiga.

$$I_{n,H\%}[\%] = \frac{I_{n,H}}{I_{1,H}} * 100 \quad (3.1)$$

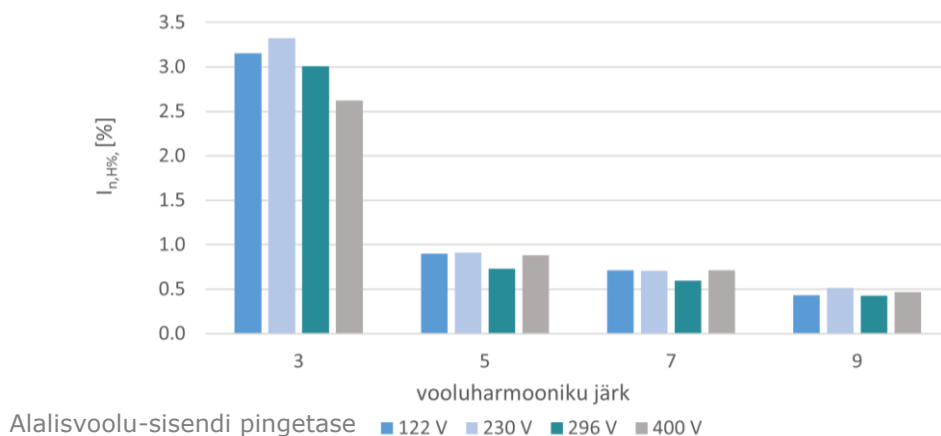
Kus

$I_{n,H\%}$  - harmoonilise voolu suhteline tase põhisagedusel voolutugevusest, [%]

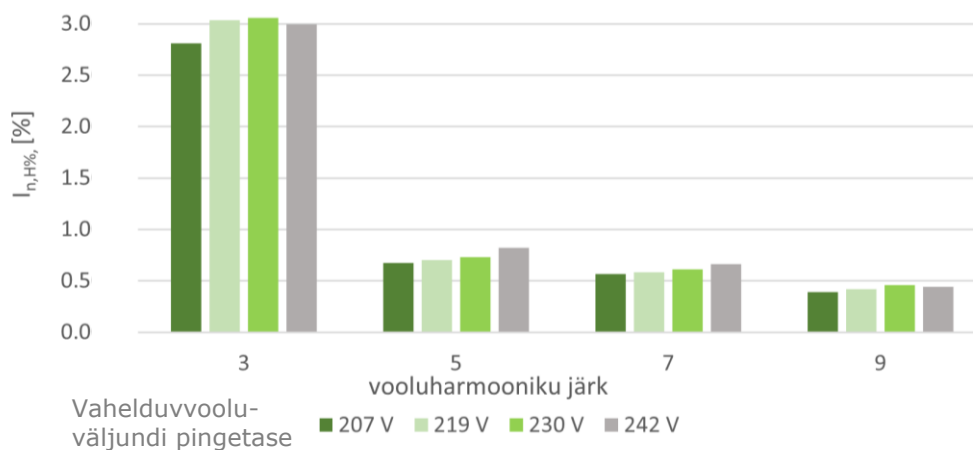
$I_{n,H}$  - n-järku harmoonilise komponendi voolutugevus, [A] (standard määratleb piirkonna  $2 \leq n \leq 39$ )

$I_{1,H}$  - põhisagedusliku harmoonilise komponendi voolutugevus, [A]

Katse 1. ning 2. katsetulemused osutasid, et vooluharmonikute väärtused olid madalamad standardis toodud klass A EVS-EN 61000-3-2:2014 [10] [4] lubatud normidest (mõõtetulemuste tabel on esitaud Lisa 1). Esimese katseseeria erinevatele vaheldi alalisvoolu sisendpingete vooluharmonikute suhtelistele väärtustele on koostatud tulpdiaagramm vt Joonis 5.3. Teise katseseeria erinevatele vaheldi vahelduvvoolu väljundpingete vooluharmonikute protsentuaalväärtustele on koostatud tulpdiaagramm vt Joonis 5.4 [10].



Joonis 5.3. Vooluharmonikute suhteliste tasemete sõltuvus vaheldi alalisvoolu sisendi pingetasemest.



Joonis 5.4. Vooluharmonikute suhteliste väärtuste sõltuvus vaheldi vahelduvvoolu väljundi pingetasemest.

## 5.2 Kõrgsageduslike häiringute mõõtetulemused

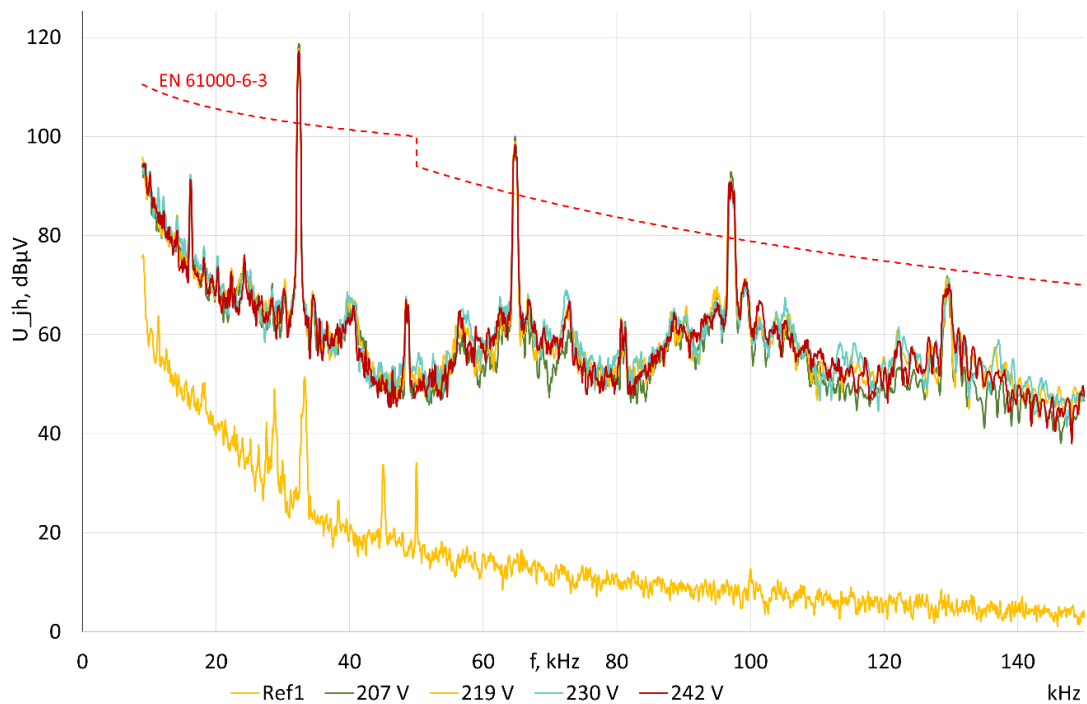
Alljärgnevalt on mõõtetulemused ja piirtasemed kajastatud graafikutel. Tulemuste graafikutel olevate piirtasemete info vt peatükk "2.4 Vaheldi elektriliste häiringute piirnõuded esitavad standardid".

### 5.2.1 Vahelduvvoolu-elektivõrgu väljundi mõõtetulemused

EMI-analüsaatoriga mõõdeti häiringutasemeid VVTV-I nii 9 kHz – 150 kHz kui ka 150 kHz – 30 MHz sagedusribadel. Alltoodud joonised 3.5 ja 3.6 näitavad juhtivuslike emissioone 9 kHz – 150 kHz sagedusribal nii vaheldi alalisvoolu sisendipinge kui vahelduvvoolu väljundipinge muutmisel.

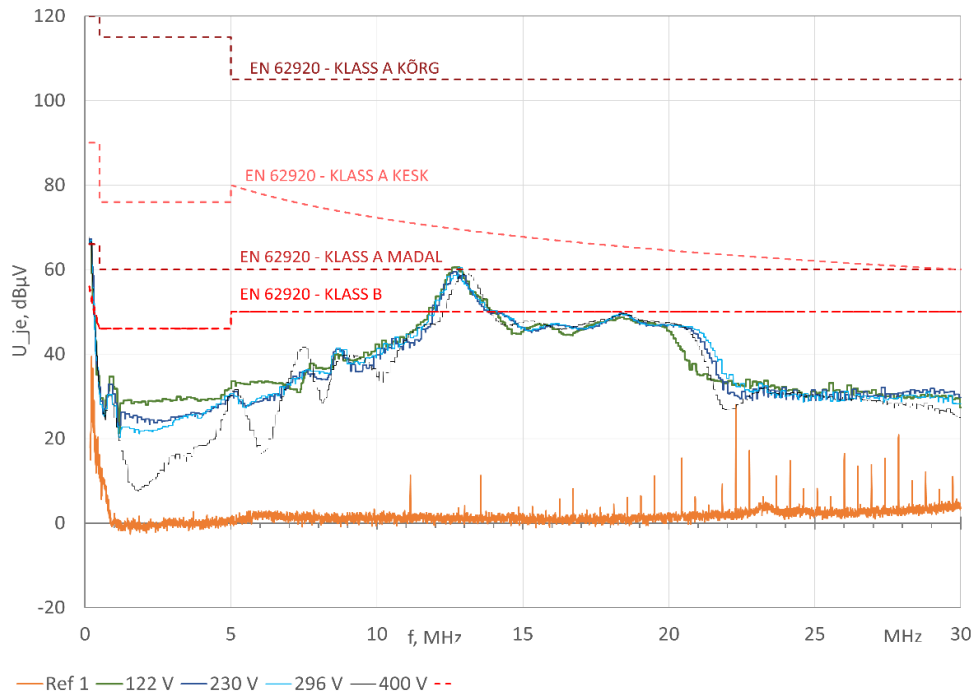


Joonis 5.5. Vaheldi 9 kHz – 150 kHz sagedusribas juhtivuslike emissioonide sõltuvus vaheldi alalisvoolu sisendpingest. Ref 1 tähistab häiringute baastaset ilma katsetatava vaheldita mõõtmisel.



Joonis 5.6. Vaheldi 9 kHz – 150 kHz sagedusribas juhtivuslike emissioonide sõltuvus vaheldi vahelduvvoolu väljundpingest. Ref 1 tähistab häiringute baastaset ilma katsetatava vaheldita mõõtmisel.

Alltoodud graafikud (Joonis 5.7 ja Joonis 5.8) kirjeldavad juhtivuslike häiringute emissioone 9 – 150 kHz sagedusribas nii vaheldi alalisvoolu sisendpinge kui vahelduvvoolu väljundpinge muutmisel. Piirtasemete info vt "2.4 Vaheldi elektriliste häiringute piirnõuded esitavad standardid".



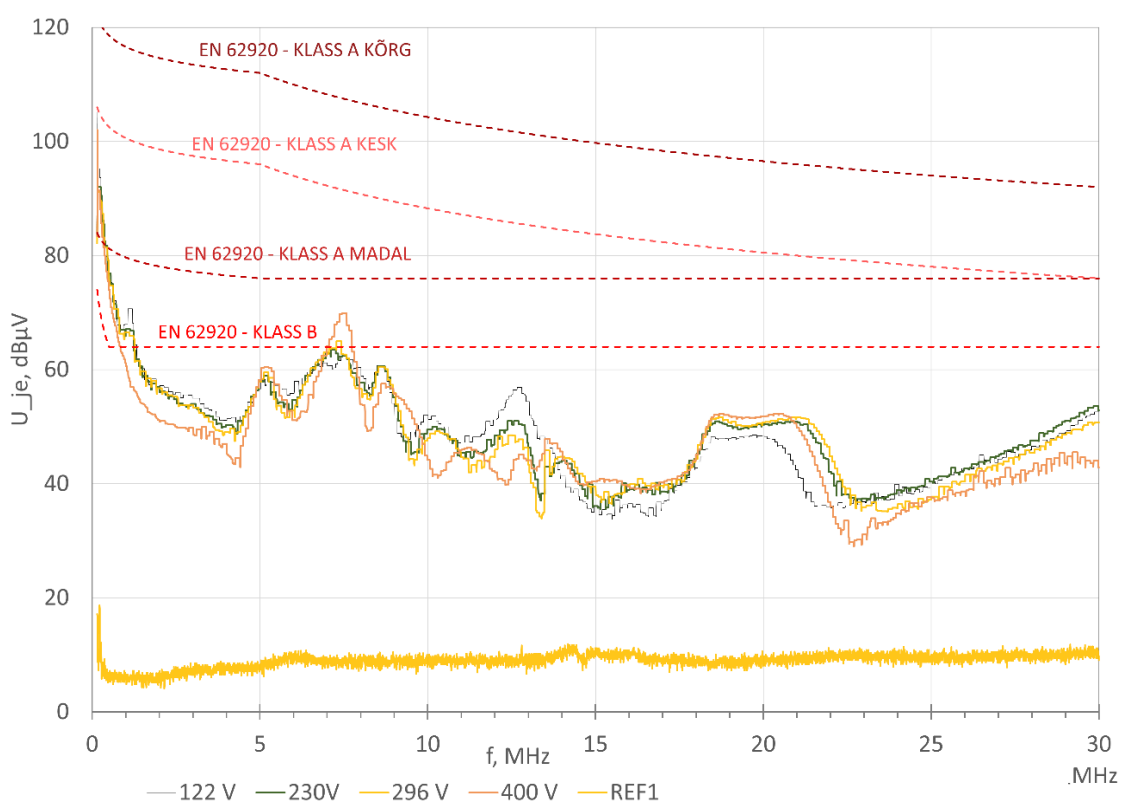
Joonis 5.7. Vaheldi 150 kHz – 30 MHz sagedusriba juhtivuslike emissioonide sõltuvus vaheldi alalisvoolu sisendpingest.



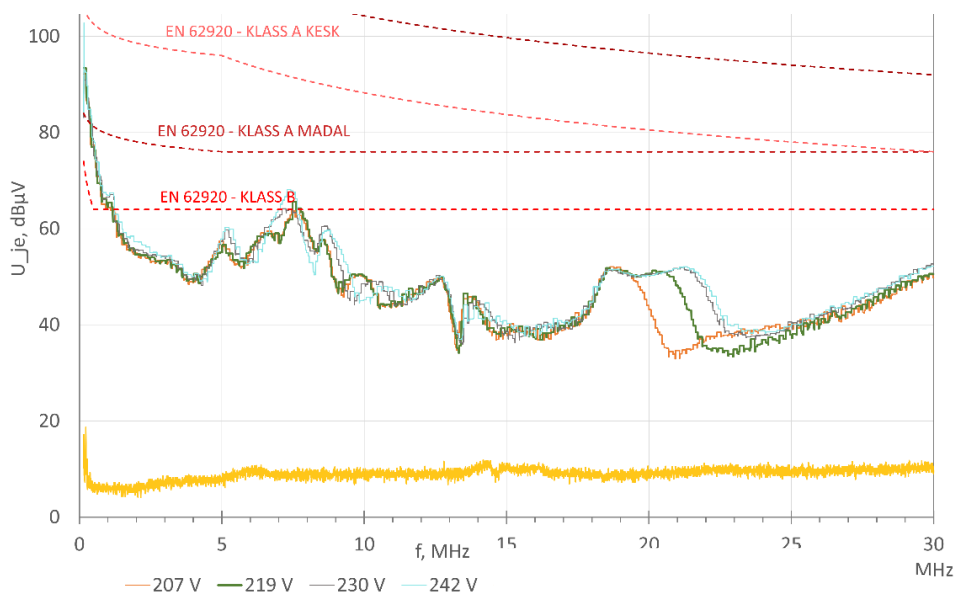
Joonis 5.8. Vaheldi 150 kHz – 30 MHz sagedusriba juhtivuslike emissioonide sõltuvus vaheldi vahelduvvoolu väljundpingest.

## 5.2.2 Alalisvoolusisendi mõõtetulemused

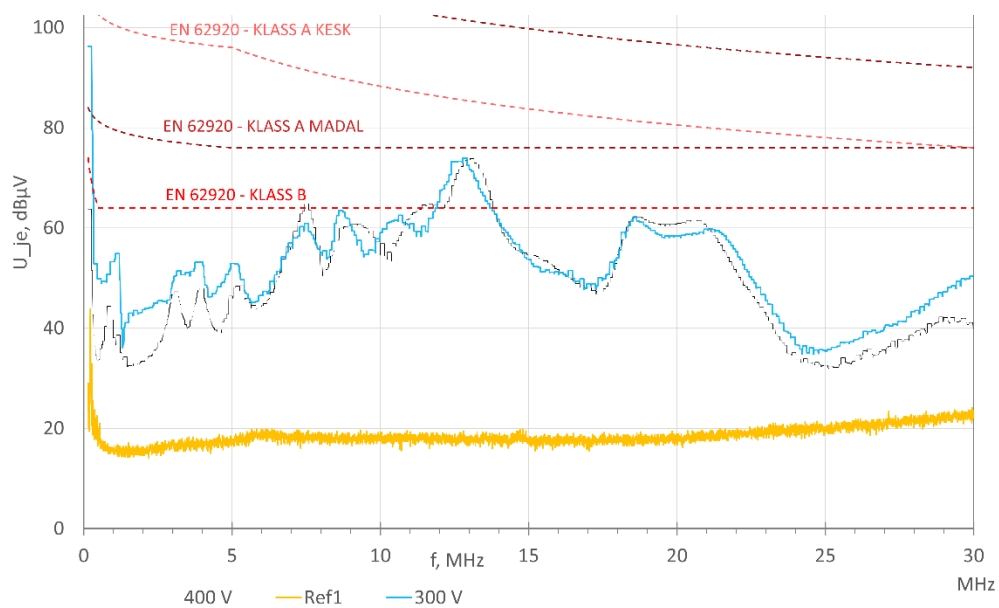
EMI-analüsaatoriga mõõdeti emissioone AVTV-I 150 kHz – 30 MHz sagedusribal, L1 klemmi ja L2 klemmi suhtes, ning mõõdeti samuti asümmeetrilisi ja sümmeetrilisi häiringuid. Kuna L1 ja L2 häiringud olid väga sarnaste tulemustega ei analüüsitud antud töös AVTV L2 tulemusi. Alltoodud graafikud Joonis 5.9 ja Joonis 5.10 näitavad juhtivuslike emissioone 150 kHz – 30 MHz sagedusribal AVTV L1 klemmil nii vaheldi alalisvoolu sisendpinge kui vahelduvvoolu väljundpinge muutmisel. Joonis 5.11 Näitab vaheldi sümmeetrilisi häiringuid sagedusel 150 kHz – 30 MHz vaheldi sisendpinge muutmisel. Joonis 5.12 ja Joonis 5.13 on graafikud vaheldi asümmeetrilistest häiringutest sisend ja väljundpinge muutmisel sagedusvahemikus 150 kHz – 30 MHz. Piirtasemete info vt "2.4 Vaheldi elektriliste häiringute piirnõuded esitavad standardid".



Joonis 5.9. Vaheldi 150 kHz – 30 MHz sagedusriba alalisvoolu L1 juhtivuslike emissioonide sõltuvus vaheldi alalisvoolu sisendpingest.

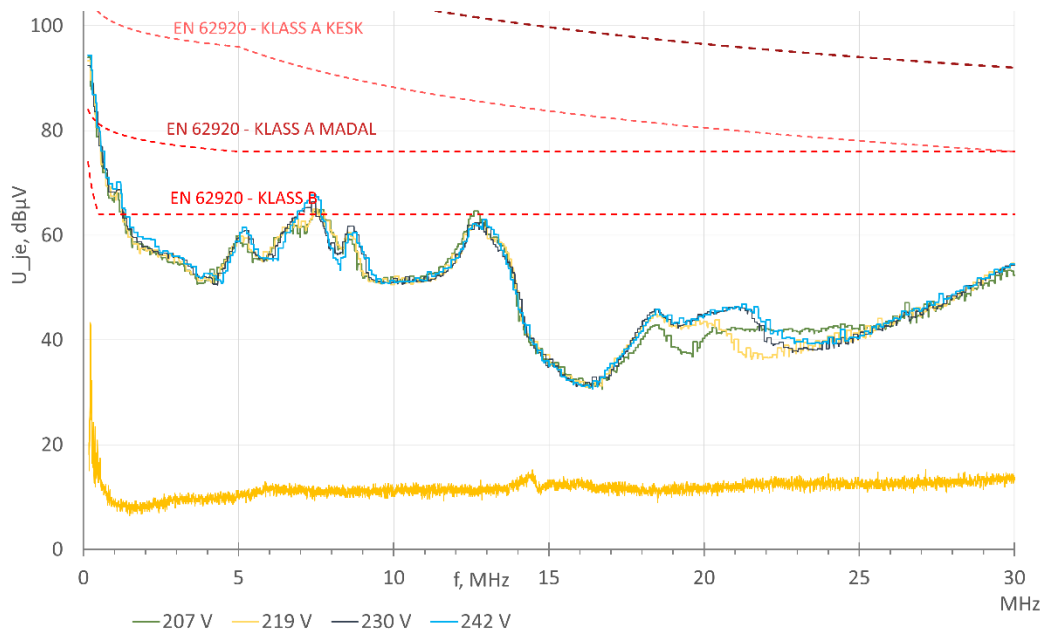


Joonis 5.10. Vaheldi 150 kHz – 30 MHz sagedusriba alalisvoolu L1 juhtivuslike emissioonide sõltuvus vaheldi vahelduvvoolu väljundpingest.

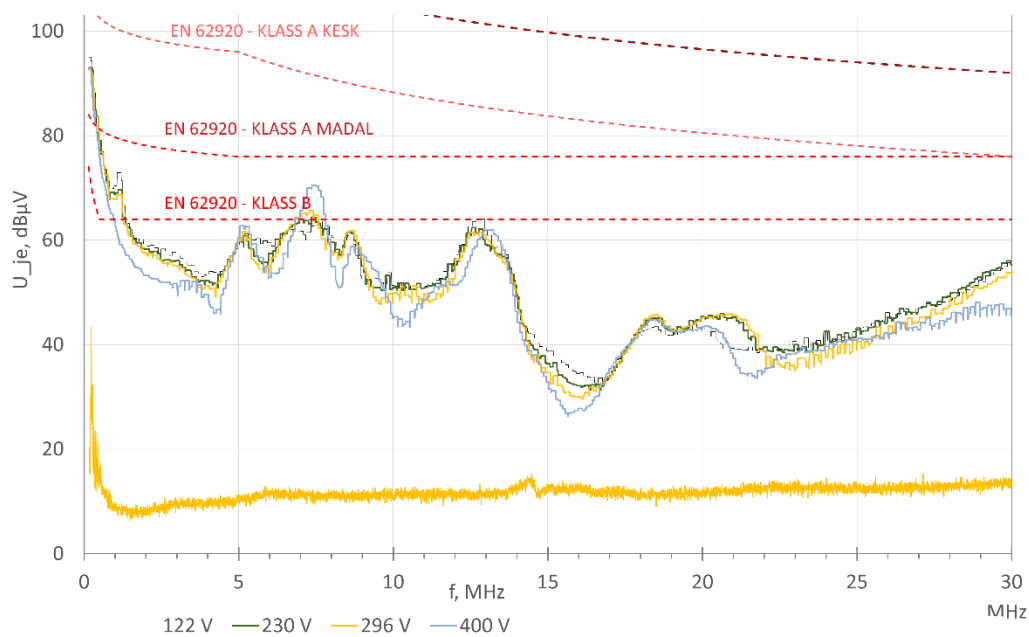


Joonis 5.11. Vaheldi 150 kHz – 30 MHz sagedusriba alalisvoolu sümmeetriliste juhtivuslike emissioonide sõltuvus vaheldi alalisvoolu sisendpingest.





Joonis 5.12. Vaheldi 150 kHz – 30 MHz sagedusriba alalisvoolu asümmeetriliste juhtivuslike emissioonide sõltuvus vaheldi vahelduvvoolu väljundpingest.



Joonis 5.13. Vaheldi 150 kHz – 30 MHz sagedusriba alalisvoolu asümmeetriliste juhtivuslike emissioonide sõltuvus vaheldi alalisvoolu sisendpingest.

## **6 Mõõtetulemuste hinnang**

### **6.1 Madalsageduslike häiringusuuruste tulemuste hinnang**

Katsetest selgub, et vahelduvvooluväljundi vooluharmonikud olid mõõtmistulemuste järgi vaheldil nii EVS-EN 61000-3-2 [10] klass- A kui ka klass- B seadmete nõuetele vastavad. Katsetulemuste järgi olid harmoonikud kuni 40. harmoonikuni suhteliselt madalad ja ei ulatunud üldiselt piirnormide tasemele lähedalegi. Katsetest selgus, et palju tugevam mõju madalsageduslikele harmoonikutele oli vaheldi sisendpinge muutus võrreldes vaheldi vahelduvvooluväljundi pingetaseme muutusega.

Katsetulemustest on ka nähtav, et kõige madalama absoluutväärtusega vooluharmonikud esinesid vaheldi nominaal-talitlustingimuste (so pingeväärtustel, mis olid alalis-sisendis ja vahelduvväljundis) korral. Vaadeldes vooluharmonikute absoluutväärtusi on märgatav ka sisendpingetel seos, madalama väljundvooluga olid esimese nelja paaritu vooluharmoniku väärtused tunduvalt madalamad.

Vaheldite katsetamiseks saab siit tõstatada täiendava uurimisülesande, sest märgata on väljaspool nimitingimusi esinevate häiringutasemete suurenemist. Töökindluse tagamiseks oleks otstarbekas sooritada katsetused suurimatel häiringutingimustel.

### **6.2 Kõrgsageduslike tulemuste hinnang**

Katsetest selgus, et vahelduvvoolu kõrgsageduslikke juhtivuslikke häiringuemissioone mõjutas tunduvalt tugevamalt vaheldi alalisvoolu sisendpinge muutus. Vaheldi vahelduvvoolu juhtivuslikud emissioonid ei muutunud eriti tugevalt neutraal – faas tulemuste suhtes võrreldes liin – neutraal süsteemis mõõdetud tulemustega.

Oluline on märkida, et siin katsetes rakendati püsivalt vaheldi nimivõimsust ja kõik katsed sooritati vaheldi nimivõimsus-talitusel. Kõrgsagedushäiringute emissioon püsis üldiselt samal tasemel sõltumata suuremal määral rakendatud pingetasemetest.

## KOKKUVÕTE

Antud lõputöö eesmärk oli päikesepaneelidega koduse elektri jaama ühendamiseks ette nähtud vaheldi analüüsimine häiringute emissiooni seisukohast. Selle juures on eesmärgiks leida seosed ja tingimuslikud parameetrid, mis iseloomustaksid vaheldi tööst tingitud müra- ja moonutuste taset tegelikus võrgus töötamisel.

Vaheldite juures on oluline, et need oleksid töökindlad ja turvalised nii inimestele kui ka teistele seadmetele. Selle tõttu tuleb arvestada vaheldi disainis elektromagnetilise sidestusega ja erinevate häiringutega, mida vaheldi võib elektrivõrgus põhjustada. Elektromagnetilise sidestuse puhul on oluline, et seade oleks immuunne teiste seadmete poolt põhjustatud häiringutele. Lisaks on oluline, et seadme poolt emiteeritud elektromagnetilised lained teisi läheduses paiknevaid elektriseadmeid võimalikult minimaalselt häiriks.

Talitlustingimuste juures juhitud, et kõik katsetes muudetavad parameetrid oleks aktuaalsed ja igapäeva elus reaalsed väärtused. Katseskeemi kavandamisel juhitud, et katse oleks ka korratav. Seetõttu teostati mõõtmisi, mõõdetavaid parameetreid ja katseskeemi planeerimist standardite järgi.

Antud töös mõõdeti erinevatel talitlustingimustel nii madalsageduslike (alla 9 kHz) kui ka kõrgsageduslike emissioone (150 kHz – 30 MHz). Antud töös keskenduti ka kõrgsagedusliku (9 kHz – 150 kHz) sagedusribale, mis pole CE- märgise saamiseks vaheldil vajalik.

Antud töös suudeti edukalt katseskeem koostada vastavalt standardites toodud suunistele ja sellega vajalikud mõõtmised teostada. Katseskeemis sai vaheldit edukalt mõjutada võrgus ja igapäeva elus vastavate parameetritega vastavalt standarditele. Madalsageduslike tulemuste juures täheldati, et tugevamad muutused esinesid vaheldi alalisvoolu sisendpinge muutmisel. Antud töö mõõtmistööd olid edukad hoolimata mitmetest asjaoludest, mis väljakutseks esinesid.

Antud töös käsitletud vaheldi töötas üldiselt korralikult ja madal- ning kõrgsageduslikud tulemused olid ühtlased. Antud töös aga selgus, et vaheldi ei sobi olmekeskonda, kuid on oma võimsusega sobilik mitte-olmekeskonnas töötama.

## Kasutatud kirjandus

- [1] European Union, „Directive (EU) 2023/959 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union and Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment,” *Off. J. Eur. Union*, kd. 50, 2023.
- [2] European Commission, „Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast),” *Official Journal of the European Union*, kd. 68, 2023.
- [3] Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiiv 2014/30/EL, elektromagnetilist ühilduvust käsitlevate liikmesriikide õigusaktide ühtlustamise kohta (uuesti sõnastatud) 26.02.2014., Euroopa Liidu Teataja, 2014.
- [4] „EVS-EN 62920:2017+A11+A1:2021. FOTOELEKTRILISED TOITEVÕIMSUSE GENEREERIMISSÜSTEEMID. Toitemuunduruseadmete elektrimagnetilise ühilduvuse nõuded ja katsetusmeetodid.,” Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2017.
- [5] „EVS-EN 50160:2023. Avalike elektrivõrkude pinge tunnussuurused,” Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2023.
- [6] IEC TR 61000-2-5:2017. Elektromagnetiline ühilduvus. Osa 2-5: Keskkond. Elektromagnetiliste keskkondade kirjeldus ja liigitus., Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2017.
- [7] D. & M. F. Kos, „Conductive EMI reduction in switched-mode power converters.,” %1 *International Symposium on Industrial Electronics*, Dubrovnik, 2005.
- [8] EVS-EN IEC 61000-6-3:2021. Elektromagnetiline ühilduvus. Osa 6-3: Erialased põhistandardid. Emissioonistandard seadmetele olmekeskkondades., Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2021.
- [9] CIS/H/497/Q. Proposal for the publication as a Publicly Available Specification (PAS) of the conducted emission requirements in the frequency Range 9 kHz – 150 kHz developed within project IEC 61000-6-3/AMD1/FRAG2 ED3. 2024-03-08, 2024: International Electrotechnical Committee (IEC).
- [10] „EVS-EN 61000-3-2:2014. ELEKTROMAGNETILINE ÜHILDUVUS. Osa 3-2: Piirväärtused. Vooluharmonooniliste emissiooni lubatavad piirväärtused (seadmetel sisendvooluga kuni 16 A faasi kohta),” Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2015.
- [11] GROWATT, „GROWATT,” n.d. [Võrgumaterjal]. Available: [https://growatt.tech/wp-content/uploads/2023/02/MIC-750\\_3300TL-X-Datasheet.pdf](https://growatt.tech/wp-content/uploads/2023/02/MIC-750_3300TL-X-Datasheet.pdf). [Kasutatud 20 Mai 2024].
- [12] Elektrilevi, „Võrguinverterite nimekiri,” [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.elektrilevi.ee/documents/8644141/8650194/vorguinverterite\\_nime\\_kiri.pdf](https://www.elektrilevi.ee/documents/8644141/8650194/vorguinverterite_nime_kiri.pdf). [Kasutatud 13 05 2023].
- [13] National Instruments, „BNC-2120 Installation Guide,” 21 02 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/bnc-2120-getting-started/resource/372123d.pdf>. [Kasutatud 28 04 2024].
- [14] HAMEG Instruments, „HM6050-2 Line Impedance Stabilization Network Benutzerhandbuch User Manual,” 2015. [Võrgumaterjal]. Available: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_manuals/gb\\_1/h/hm6050\\_2/HM6050-2\\_UserManual\\_de\\_en\\_04.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/h/hm6050_2/HM6050-2_UserManual_de_en_04.pdf). [Kasutatud 20 Mai 2024].

- [15] EVS-EN 55016-1-2:2014/A1:2018. Raadiohäiringute ja häiringutaluvuse mõõteseadmed ja -meetodid. Osa 1-2: Raadiohäiringute ja häiringutaluvuse mõõteseadmed. Juhtivuslikult levivate häiringute mõõtmise sidestusseadmed, Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2018.
- [16] EVS-EN 55016-2-1:2014/A1:2017. Raadiohäiringute ja häiringutaluvuse mõõteseadmed ja -meetodid. Osa 2-1: Häiringute ja häiringutaluvuse mõõtemetodid. Juhtivuslikult levivate häiringute mõõtmine, Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2017.
- [17] EVS-EN IEC 55016-1-1:2019. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Measuring apparatus, Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2019.
- [18] EMCIS, „LN2-100T catalog. DC–LISN for Photovoltaic Inverter,” n.d. [Võrgumaterjal]. Available: [http://emcis.cafe24.com/wpE/wp-admin/catalog/LN2-100T\(CATALOG\).pdf](http://emcis.cafe24.com/wpE/wp-admin/catalog/LN2-100T(CATALOG).pdf). [Kasutatud 20 Mai 2024].
- [19] Magna-Power, „Magna-Power TS Series,” n.d. [Võrgumaterjal]. Available: [https://magna-power.com/assets/files/datasheets/datasheet\\_ts\\_4.6.0.pdf](https://magna-power.com/assets/files/datasheets/datasheet_ts_4.6.0.pdf). [Kasutatud 20 Mai 2024].
- [20] E. M. M. A. & M. U. Lossmann, „Noise Level Estimation in the Shortwave Frequency Range,” *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 2011.
- [21] EVS-EN 55016-2-1:2014/AC:2020. Raadiohäiringute ja häiringutaluvuse mõõteseadmed ja -meetodid. Osa 2-1: Häiringute ja häiringutaluvuse mõõtemetodid. Juhtivuslikult levivate häiringute mõõtmine., Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2020.
- [22] EVS-EN 55016-2-1:2014. Raadiohäiringute ja häiringutaluvuse mõõteseadmed ja -meetodid. Osa 2-1: Häiringute ja häiringutaluvuse mõõtemetodid. Juhtivuslikult levivate häiringute mõõtmine, Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2014.
- [23] EVS-EN 55016-1-2:2014. Raadiohäiringute ja häiringutaluvuse mõõteseadmed ja -meetodid. Osa 1-2: Raadiohäiringute ja häiringutaluvuse mõõteseadmed. Juhtivuslikult levivate häiringute mõõtmise sidestusseadmed., Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2014.
- [24] EVS-EN 55011:2016+A1+A11+A2:2021. Tööstus-, teadus- ja meditsiiniseadmed. Raadiosageduslike häiringute tunnussuurused. Piirväärtused ja mõõtemetodid., Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2021.
- [25] „Application notes. Spectrum and signal analyzer measurements and noise,” Keysight Technologies, 2021.
- [26] EVS-EN IEC 61000-3-2:2019+A1:2021. Elektromagnetiline ühilduvus. Osa 3-2: Piirväärtused. Vooluharmooniliste emissiooni lubatavad piirväärtused (seadmetel sisendvooluga kuni 16 A faasi kohta), Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus, 2021.

## LISAD

Lisa 1 Madalsageduslike vooluharmonikute mõõtetulemused

Tabel Lisa 1.1 Madalsageduslike vooluharmonikute absoluutväärtuse sõltuvus vaheldi alalisvoolu sisendpingest

$U_{DC}$	$I_{eff}$	$I_{h1}$	$I_{h3}$	$I_{h5}$	$I_{h7}$	$I_{h9}$
122 V	6.227 A	6.216 A	0.196 A (-24.4 %)	0.056 A (-9.1 %)	0.044 A (-22.9 %)	0.027 A (-24.8 %)
230 V	7.926 A	7.894 A	0.263 A (-4 %)	0.072 A (21.7 %)	0.056 A (-0.6 %)	0.041 A (-5.1 %)
296 V	8.362 A	8.338 A	0.251 A (1.4 %)	0.061 A (16.2 %)	0.05 A (-15.7 %)	0.036 A (-15.2 %)
400 V	8.23 A	8.221 A	0.216 A (0 %)	0.072 A (0 %)	0.059 A (0 %)	0.039 A (0 %)

Tabel Lisa 1.2 Madalsageduslike vooluharmonikute absoluutväärtuse sõltuvus vaheldi vahelduvvoolu väljundpingest

$U_{DC}$	$I_{eff}$	$I_{h1}$	$I_{h3}$	$I_{h5}$	$I_{h7}$	$I_{h9}$
207 V	9.117	9.103	0.256 A (9.4 %)	0.061 A (0.5 %)	0.052 A (1 %)	0.035 A (1.5 %)
219 V	8.72325	8.69925	0.264 A (4.5 %)	0.061 A (3.7 %)	0.051 A (0.4 %)	0.036 A (0.5 %)
230 V	8.3475	8.3225	0.255 A (0 %)	0.061 A (0 %)	0.051 A (0 %)	0.038 A (0 %)
242 V	7.991	7.96825	0.239 A (- 4.3 %)	0.066 A (- 6.2 %)	0.053 A (7.8 %)	0.035 A (3.9 %)

Tabel Lisa 1.3 Madalsageduslike vooluharmonikute suhteväärtuse sõltuvus vaheldi alalisvoolu sisendpingest

U <sub>AC</sub>	I <sub>h3</sub>	I <sub>h5</sub>	I <sub>h7</sub>	I <sub>h9</sub>
207 V	2.81% (6.6 %)	0.674% (21.9 %)	0.566% (17 %)	0.389% (13.8 %)
219 V	3.035% (-1.3 %)	0.701% (17.2 %)	0.586% (12.9 %)	0.417% (6.2 %)
230 V	3.058% (-2 %)	0.73% (12.6 %)	0.61% (8.6 %)	0.46% (-3.7 %)
242 V	2.996% (0 %)	0.822% (0 %)	0.662% (0 %)	0.442% (0 %)

Tabel Lisa 1.4 Madalsageduslike vooluharmonikute suhteväärtuse sõltuvus vaheldi vahelduvvoolu väljundpingest

U <sub>DC</sub>	I <sub>h3</sub>	I <sub>h5</sub>	I <sub>h7</sub>	I <sub>h9</sub>
122 V	3.156% (0 %)	0.898% (0 %)	0.711% (0 %)	0.431% (0 %)
230 V	3.326% (5.4 %)	0.912% (1.6 %)	0.707% (-0.6 %)	0.514% (19.3 %)
296 V	3.006% (-4.8 %)	0.732% (-18.5 %)	0.598% (-15.9 %)	0.428% (-0.8 %)
400 V	2.625% (-16.8 %)	0.881% (-1.9 %)	0.715% (0.6 %)	0.47% (8.9 %)

Lisa 2 Paigaldatud katseskeemi jäädvustused



Joonis Lisa 2.1 Katseskeemi jäädvustus



Joonis Lisa 2.2 Katseskeemi jäädvustus