

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Marek Parts 201363IACB

Varjestatud kambrite sumbumuse mõõtmise süsteem

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Ivo Mürsepp
PhD

Tallinn 2023

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Marek Parts

15.05.2023

Annotatsioon

Lõputöö eesmärk on luua mõõtesüsteem, mis võimaldab mõõta elektrivälja sumbumust vähemalt 100 dB sagedustel 10 MHz kuni 10 GHz. Töö jooksul koostati kaks ühesugust kõrgsageduslülitit, mis võimaldavad kohtvõrgus lülitada kuni kuue antenni vahel ning arvutiprogramm, mis juhib kõrgsageduslülitit kui ka ülejäänud vajalikke süsteemi osasid.

Kõrgsageduslülitit kui ka arvutiprogrammi loomine õnnestus sellel määral, mis oli nõutud. Süsteemi võimekust uuriti TTÜ varjestatud kambris ning saadi teada, et kõik osad töötavad nii nagu vaja. Signaali tugevus sagedustel 20 MHz kuni 10 GHz osutus piisavaks mõõtesüsteemi jaoks. Sagedusel 10 MHz kuni 20 MHz järeldati, et signaali saatva antenni võimendus on selles piirkonnas liiga madal.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 20 leheküljel, 6 peatükki, 19 joonist, 2 tabelit.

Abstract

Shielded Chamber Attenuation Measurement System

The aim of the thesis is to create a measurement system that allows to measure electric field attenuation at frequencies from 10 MHz to 10 GHz. In addition, the measurement system should be able to measure at least 100 dB of attenuation.

For this work two high-frequency switches were designed, which allow switching between up to six antennas.

In addition to the hardware solution, software was created in C# that is meant to control this high-frequency switch as well as the other necessary parts of the system, such as a spectrum analyser and a signal generator. The program allows to make automated measurements within the capabilities of the system as a whole, i.e. measure electric field strength from 10 MHz to 10 GHz. Another feature of this program is to send commands to devices separately for debugging purposes or other reasons.

The performance of the system was tested in the Tallinn University of Technology's shielded chamber and it was found that all the components worked as required. The signal strength at frequencies from 20 MHz to 10 GHz proved to be strong enough to be adequate for the measurement system. At frequencies between 10 MHz and 20 MHz it was concluded that the gain of the transmitting antenna was too low in that region. One solution could be to use a different antenna for transmitting the signal.

The thesis is in Estonian and contains 20 pages of text, 6 chapters, 19 figures, 2 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

EVS	Eesti Vabariigi Standard
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MOSFET	<i>metal–oxide–semiconductor field-effect transistor</i>
NI MAX	<i>National Instruments Measurement & Automation Explorer</i>
RX	<i>Receive signal</i>
SCPI	<i>Standard Commands for Programmable Instruments</i>
TCP/IP	<i>Internet protocol suite</i>
TX	<i>Transmit signal</i>

Sisukord

Sisukord.....	6
Jooniste loetelu	7
Tabelite loetelu	8
1 Sissejuhatus	9
2. Teoreetilised alused	10
2.1 Varjestatud kambrid	10
2.2 Signaali levi ruumis	11
2.3 Eesti standard varjestatud kambrite mõõtmisel	12
2.4 Varasemad lähenemised elektrivälja sumbumuse mõõtmisel	13
2.5 Nõuded mõõteseadmetele	13
3 Eksperimendi meetodika	15
3.1 Mõõtemetoodika	15
3.2 Kasutatud seadmed	16
3.3 Kõrgsageduslüüti elektriskeem	17
3.4 Seadmete juhtimine kohtvõrgus	19
3.5 Programmikoodi kirjeldus	22
4 Tulemused ja analüüs	24
4.1 Eksperimentide tulemused ja analüüs.....	25
5 Kokkuvõte	28
Kasutatud kirjandus	29

Jooniste loetelu

Joonis 1 Näidis poliüuretaanvahust absorberitest [2].	10
Joonis 2 Näidis ferriitplaatidest [2].	10
Joonis 3 Varjestatud kambris juhtmevaba seadme paigutus [2].	11
Joonis 4 Mõõtmise plokk skeem.	15
Joonis 5 Kõrgsageduslüli kontrolleri plokk skeem.	17
Joonis 6 Kõrgsageduslüli kontrolleri elektriskeem.	18
Joonis 7 Kõrgsageduslüli kontrolleri fotod: (a) eesmisest küljest, (b) tagumisest küljest.	19
Joonis 8 Foto kõrgsageduslüli kontrolleri sisemusest.	19
Joonis 9 Wiresharki kuvatõmmis Arduino Nanoga suhtlusest.	20
Joonis 10 Paketi sisu käsuga "Ant2" Arduino Nanosse saatmisel.	21
Joonis 11 Wiresharki kuvatõmmis signaaligeneraatoriga suhtlusest.	21
Joonis 12 Paketi sisu signaaligeneraatorile 1 GHz sagedusele ümberlülitumise käsu saatmiseks.	21
Joonis 13 Wiresharki kuvatõmmis spektrianalüsaatoriga suhtlusest.	21
Joonis 14 Paketi sisu spektrianalüsaatoris 1 GHz kesksageduse seadistamiseks.	22
Joonis 15 Programmi kasutajaliides.	22
Joonis 16 Signaali saatvate antennide asetus TTÜ varjestatud kambrist väljas.	24
Joonis 17 Signaali vastu võtvate antennide asetus TTÜ varjestatud kambris.	25
Joonis 18 Sumbumuse minimaalne hinnang sagedustel 10 MHz kuni 10 GHz.	26
Joonis 19 Erinevate vastuvõtuantennide võrdlus.	27

Tabelite loetelu

Tabel 1 Mõõtesüsteemi seadmed.....	16
Tabel 2 Kõrgsageduslüüti komponendid.....	17

1 Sissejuhatus

Käesoleva töö ülesandeks on luua mõõtesüsteem, mis on võimeline mõõtma kõrgsagedusliku elektrivälja sumbumist ruumi seina läbimisel. Süsteem peab töötama sagedusvahemikus 10 MHz kuni 10 GHz. Süsteem peab olema võimeline mõõtma sumbumust kuni 100 dB. Testsignaali allikaks on kõrgsagedusgeneraator. Signaalide kiirgamiseks ja vastuvõtmiseks kasutatakse erinevaid antenne. Testsignaali tugevust mõõdetakse spektrianalüsaatoriga.

Töö koosneb kirjanduse ülevaatest, kus uuritakse kas sellise süsteemi loomine on füüsika mudelite järgi realistlik ning analüüsitakse varasemalt tehtud töid sarnastel teemadel.

Töö põhiosa koosneb mõõtesüsteemi füüsilisest koostamisest ning juhttarkvara loomisest. Selle eesmärgi saavutamiseks seati järgnevad etapid:

1. Mõõtmisstandardi alusdokumentidega tutvumine;
2. Vajalike seadmete hankimine;
3. Valmistada mitme antenni signaali juhtimist võimaldav elektriskeem;
4. Seadmete ühendamine ühtseks mõõtesüsteemiks;
5. Luua kõiki töös kasutatavaid seadmeid juhtiv tarkvara.

Seejärel teostati süsteemi töövõime kindlaks määramiseks eksperiment Tallinna Tehnikaülikooli varjestatud kambri, mõõtes kambri seinte sumbuvus sagedustel 10 MHz kuni 10 GHz. Analüüsiti tulemusi ja anti hinnang kambri sumbumusele.

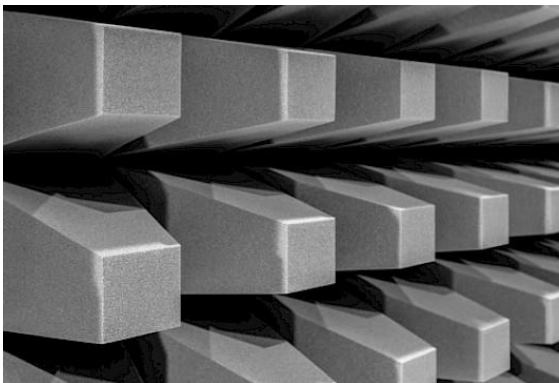
2. Teoreetilised alused

Järgnevas peatükis kirjeldatakse, mis on varjestatud kamber. Selgitatakse vajalikku signaali levi mudelit, mille abil saab enne süsteemi loomist hinnata, kas see on füüsiliselt realistlik. Kirjeldatakse mõõtestandardi sisu, mille järgi reaalsed mõõtmised tehakse ja arvutatakse esmane hinnang nõuetele, millele mõõteseadmed peavad vastama.

2.1 Varjestatud kambrid

Varjestatud kambrid on juhtivast materjalist seintega ruumid, mis ümbritsevad objekte, mida on vaja kaitsta välise elektromagnetkiirguse eest. Sarnaselt saab seda kasutada ka vastupidi – kaitsta kambrist väljas olevaid objekte kiirguse eest, juhul kui tehakse katseid mõne raadiosignaale saatva seadmega. Juhtivad seinad takistavad elektromagnetvälja energia levimist läbi nende [1, 2].

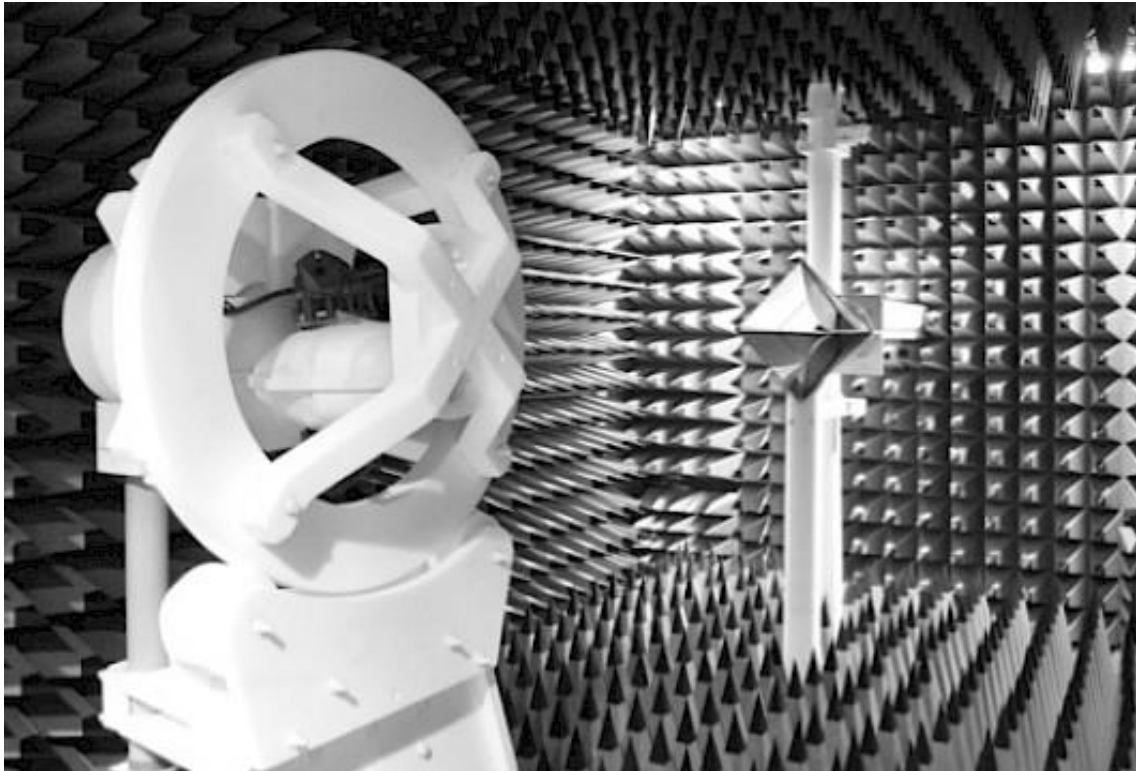
Lisaks on seintel elektromagnetvälja neelavad elemendid, mis samuti piiravad energia liikumist seinast läbi, kuid nende peamine eesmärk on peatada ruumi sees toimuvaid peegeldusi. Üldiselt on need signaali neelavad elemendid tehtud keraamilistest ferriitplaatidest. Ferriitplaadid neelavad elektromagnetvälja, mille sagedus on kuni 1 GHz. Kõrgematel sagedustel jaoks on seintel vahust absorberid, mis suudavad neelata signaali sagedustel 1 kuni 40 GHz [2].



Joonis 1 Näidis poliüuretaanvahust absorberitest [2].



Joonis 2 Näidis ferriitplaatidest [2].



Joonis 3 Varjestatud kambris juhtmevaba seadme paigutus [2].

Varjestatud kambri sumbumuse mõõtmine on vajalik selleks, et saada kvantitatiivsed tulemused kambri võimekusest peatada elektromagnetvälja sisenemist kambrisse või väljumist kambrist. Sumbumuse teadmine on oluline siis, kui tehakse elektromagnetvälja mõõtmisi, mille korral on tähtis, et ümbritsevast keskkonnast tulenevad signaalid ei mõjutaks kambris toimuvaid katsetusi. Siis saab välistada kambrist väljaspool toimuva mõju eksperimentidele kambris sees. Võimalikud rakendused sellisele kambrile on testida näiteks antenni lähi-, kui ka kaugtsoonis või juhtmevabu sidesüsteeme [3].

2.2 Signaali levi ruumis

Töös kasutatakse signaali nõrgenemise hindamisel Friisi valemit. Friisi valemi järgi on vastuvõtja poolel mõõdetava signaali võimsus:

$$P_v = G_s G_v \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 P_s \quad (1) \text{ ja}$$

$$P_v^{[dB]} = P_s^{[dB]} + G_s^{[dB]} + G_v^{[dB]} + 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (2),$$

kus:

- P_s on signaali saatva antenni sisendvõimsus;
- P_v on antenni poolt vastuvõetud signaali võimsus;

- G_t on saateantenni võimendus;
- G_r on vastuvõtuantenni võimendus;
- λ on edastatava signaali lainepikkus;
- d on vahemaa antennide vahel.

Nende valemite puhul eeldatakse, et tegu on tühja, kaovaba ruumiga. Samuti eeldatakse, et $d \gg \lambda$, ehk antennid asuvad üksteisest kaugtsoonis.

2.3 Eesti standard varjestatud kambrite mõõtmisel

Töös koostatava mõõtesüsteemi aluseks on Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskuse standard EVS-EN 50147-1:2002 (Eesti Vabariigi Standard) [4]. Standard käsitleb meetodit, kuidas mõõta varjestatud kambrite või ruumide elektromagnetilist sumbumust sageduste vahemikus 9 kHz kuni 40 GHz.

Standardi kohaselt tuleb võimalusel teha katsed mitmest kambrit ümbritsevast punktist. Juhul, kui ümbritsev müra tase on piisavalt madal, siis kõik katsed on soovitatud teostada selliselt, et vastuvõtuantenn asub varjestatud kambrit väljas ja saateantenn sees.

Elektrivälja mõõtmisel on soovitatud teha mõõtmised mõlemalt poolt varjestavast seinast 1 m kaugusel, seda sagedustel vahemikust 30 MHz kuni 1 GHz. Sagedusest 1 GHz kuni 40 GHz on antennid mõlemalt poolt seinast 30 cm. Mõõtepunktid, mida on tarvis mõõta on standardis fikseeritud kui 30 MHz, 100 MHz, 400 MHz, 1 GHz, 10 GHz ja 40 GHz. Võrdlusmõõtmisel tuleb arvestada mõlema sagedusvahemiku korral mõõdetava ruumi seinapaksusega ning see juurde lisada. Sumbumuse arvutusvalem on elektrivälja korral:

$$a_s = 20 \log \frac{E_0}{E_1} \quad (3),$$

kus a_s on varjestamise määr ühikutes dB, E_0 on elektrivälja tugevus varjestamata olukorras ja E_1 elektrivälja tugevus samal kaugusel ning pärast varjestava materjali läbimist. Analoogiliselt on magnetvälja mõõtmiste korral:

$$a_s = 20 \log \frac{H_0}{H_1} \quad (4),$$

kus H_0 ja H_1 on mõõdetud magnetvälja tugevus varjestamata ja varjestatud olukorras.

2.4 Varasemad lähenemised elektrivälja sumbumuse mõõtmisel

Seda, kuidas mõõdetakse ruumide elektrivälja sumbumust erinevates töödes on omavahel sarnased. Erinevused on peamiselt alusdokumendis, mille järgi mõõtmisi tehakse.

Alternatiivsed dokumendid Eesti standardile on näiteks IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 299-2006 [5], mida on võetud aluseks tellisest seinaga sumbumuse mõõtmisel [6] ja mikrolaineahju elektrivälja sumbumuse mõõtmiseks [7]. Võrreldes Eesti standardiga on IEEE 299-2006 oluliselt detailsem mõõtmisprotseduuride kirjelduses, kuid arvutused sumbumuse leidmiseks ja antennide kaugused sarnased, ehk teadvustatakse ja mõõdetakse elektrivälja madalatel sagedustel lähitsoonis. Varjestatud ruumi mõõtmist on teostatud artiklis [8], kus kasutati mõõtmise aluseks standardeid IEEE 299-1997 ja EN 50147-1. IEEE 299-1997 on lihtsalt vanem versioon standardist IEEE 299-2006.

2.5 Nõuded mõõteseadmetele

Selleks, et veenduda, kas on võimalik töös kasutataval süsteemil mõõta sumbumust 100 dB, on tarvis arvutada Friisi valemi järgi vastuvõtjasse saabunud signaali tugevus kõikidel mõõdetavatel sagedustel. Kuna enamuse sagedustel ei kehti Friisi valemi tingimus $d \gg \lambda$, siis seda saab kasutada ainult signaalide korral, mille sagedus on mitusada MHz. See tähendab, et 2 meetri kaugusel on alates 150 MHz-st signaali lainepikkus suurem kui antennide vaheline kaugus, siis sellest hetkest alates võib hakata mõtlema Friisi valemi kasutamisele. Teoreetiliselt saab arvutada signaali ülekande ka lähitsoonis, kuid töös kasutatavate laiaribaliste antennide puhul on selline arvutus keerukas.

Lisaks kaugusest tingitud signaali sumbumisele tuleb arvestada, et kõik mõõteseadmed tekitavad müra, mis võib olla tingitud igasugusest laetud osakeste juhuslikust liikumisest, näiteks soojuslik liikumine, või kosmilisest kiirgusest. Peamine müraliik, mis spektrianalüsaatorites avaldub on soojusliikumise põhjustatud [9].

Erinevate tootjate poolt pakutavate spektrianalüsaatorite keskmiseks müratasemeks pakutakse ilma eelvõimendita $-147 \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}}$ kuni $-133 \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}}$ sagedusvahemikus 10 MHz kuni 10 GHz [10, 11, 12]. Seega on võimalik kinnitada, et mingi ruum või kamber summutab signaali vähemalt 100 dB siis, kui signaali tugevus oli ilma mõõdetava seinata

ligikaudu -33 dBm. Varjestatud ruumis, mille sumbumus on 100 dB või rohkem, ei tohiks olla -33 dBm tugevusega signaal enam tuvastatav.

Eelnevalt oli mainitud, et müra taset tõstab temperatuur, siis sellele vaatamata on võimalik, et andmelehtedelt saadud müratase ei vasta reaalsele tingimustele. Juhul kui vastuvõtja asub mingi süsteemi koosseisus, siis tegelik müra nivoo ei ole ainult vastuvõtja sisemine ning see võib olla suurem kui -133 dBm. Praktikas avaldub see nii, et antenni temperatuur, keskkonna temperatuur ja kaablite kaod mõjutavad vastuvõetud müra.

Teades, et vastuvõetava signaali tase peab olema peale tühja ruumi läbimist vähemalt -33 dBm, siis selle arvu kaudu saab määrata vähima vajaliku väljundvõimsusega signaaligeneraatori. Kuna mõõtmised tehakse vastavalt Eesti standardile, siis on vaja leida valemist (2) väärtus muutujale P_t , kui $P_r = -133 \text{ dBm} + 100 \text{ dB} = -33 \text{ dBm}$.

Eeldusel, et antennid on kõik võimendusetu, ehk $G_r = G_t = 0 \text{ dB}$, siis sellises olukorras sõltub vastuvõetud signaali tugevus pöördvõrdeliselt signaali sagedusest, sest $\lambda = \frac{c}{f}$. Et mõõtmised tehakse kahelt erinevalt kauguselt – 60 cm sagedustel, mis on kõrgemad kui 1 GHz ja 2 m sagedustel, mis on madalamal, kui 1 GHz, siis madalatel sagedustel on suurimat signaali tugevust vaja 1 GHz juures, kus $d = 6,6\lambda$ ning valemist (2) avaldades:

$$P_t^{[dBm]} = P_r^{[dBm]} - G_t^{[dB]} - G_r^{[dB]} - 20 \log\left(\frac{c}{4\pi d f}\right)$$

$$P_t^{[dBm]} = -33 - 0 - 0 - 20 \log\left(\frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4\pi \cdot 2 \text{ m} \cdot 1 \cdot 10^9 \text{ Hz}}\right) = 5,5 \text{ dBm}$$

Ja süsteemi teisel mõõtekaugusel 0,6 m peab olema signaali tugevus sagedusel 10 GHz, kus $d = 20\lambda$:

$$P_t^{[dBm]} = -33 - 0 - 0 - 20 \log\left(\frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4\pi \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 10 \cdot 10^9 \text{ Hz}}\right) = 15,0 \text{ dBm}$$

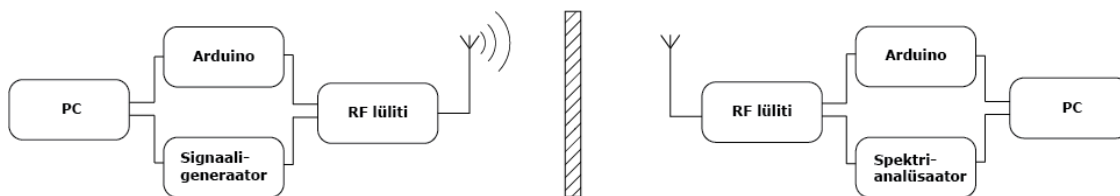
Tuleb mainida, et need valemid ei kehti signaali madalamal poolel, kus elektriväli on lähitsoonis. Nende puhul on võimalik ainult praktiliste mõõtmistega kindlaks teha signaaligeneraatori võimsus. Juhul, kui mõni sagedus peaks olema selline, mille võimsust signaaligeneraator ei suuda väljastada, siis võib lahenduseks olla ka antennide suunateguri arvestamine.

3 Eksperimendi meetoodika

Peatükis kirjeldatakse, milline on sumbumuse mõõtmise meetoodika. Loetletakse kõik seadmed, mis mõõtesüsteemi kuuluvad ning kirjeldatakse nende ülesannet kogu süsteemis. Uuritakse kuidas seadmed töötavad kohtvõrgus ning näidatakse, milline on süsteemi juhtiva tarkvara üldine töövoog.

3.1 Mõõtemetoodika

Mõõtmise aluseks kasutati Eesti standardit EVS-EN 50147-1:2002, mille kirjeldus on peatükis 2.3. Mõõteseadmete võimekusest tulevana ei mõõdetata käesolevas töös magnetvälja tugevust ning elektrivälja tugevust alates sagedusest 10 GHz. Erinevalt standardis toodust, oli elektrivälja mõõtmise algsageduseks 1 meetri kauguselt 10 MHz.



Joonis 4 Mõõtmise plokk skeem.

Mõõtmisi tehakse nii, et spektrianalüsaatori ribalaius oleks võimalikult väike, ehk 1 Hz. Väike ribalaius mõjutab seda, et elektrivälja tugevus, mis ühe signaali punkti mõõtmisel saadakse on võimalikult täpselt selle sageduse oma, mida parajasti tahetakse mõõta. See tähendab, et kitsama ribalaiuse puhul ei lisandu mõõtetulemusse signaali, mis on uuritava sageduse lähedal ja seetõttu müra tase langeb. Ribalaiuse vähendamisega kasvab ka mõõtepunktide arv uuritavas sagedusvahemikus ning seetõttu pikeneb ka mõõtmisaeg.

Selle asemel, et mõõta viiel sagedusel punkte nii nagu standardis, otsustati jaotada punktid logaritmiliselt ja mõõta 100 punkti iga antenniga, ehk kokku 300 mõõtepunkti ning ühe punkti mõõteajaks oli 10 sekundit. Logaritmiliselt jaotatuna mõõdetake lisaks standardis toodud punktidele veel rohkem punkte. Mõõtepunktide arv valiti praeguses töös selle järgi, kui kaua oleks mõistlik ühte eksperimenti teha. Sellise mõõtepunkti arvuga võtab üks mõõtmine aega ligikaudu 3000 sekundit, ehk veidi vähem kui tund.

Logaritmiline jaotus mõõtepunktide vahel tähendab, et punktid jaotatakse vastavalt avaldisele:

$$f(i) = f_{algus} \cdot e^{\frac{i-1}{n-1} \ln \frac{f_{lõpp}}{f_{algus}}} \quad (5),$$

kus:

- $f(i)$ on i -nda mõõtepunkti sagedus;
- f_{algus} on algsagedus;
- $f_{lõpp}$ on viimane mõõdetav sagedus;
- n on kõikide punktide koguarv, ning $n \in \mathbb{N}$ ja $n \geq 2$;
- i mõõtepunkti number ning $i \in \mathbb{N}$ ja $i \leq n$.

3.2 Kasutatud seadmed

Tabelis 1 on toodud töös kasutatavad mõõteseadmed ning nende olulisemad parameetrid. Tabelist on näha, et saadetavate ja vastuvõetavate signaalide sagedus katab kogu süsteemilt nõutud sagedusvahemiku 10 MHz kuni 10 GHz.

Tabel 1 Mõõtesüsteemi seadmed.

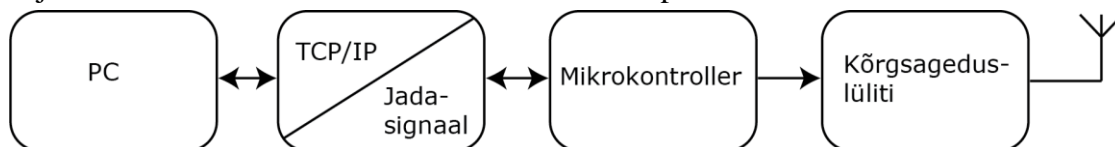
Mõõtesüsteemi komponent	Olulised parameetrid
Signaaligeneraator [13]	Töösagedus: $9,0 \text{ kHz} \leq f \leq 12,0 \text{ GHz}$ Maksimaalne väljundvõimsus: 15 dBm
Spektrianalüsaator [14]	Töösagedus: $9,0 \text{ kHz} \leq f \leq 13,6 \text{ GHz}$ Müratase: $-106 \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}}$ kuni $-146 \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}}$
Antennid	Töösagedus 1: 10 MHz kuni 100 MHz (varras) Töösagedus 2: 100 MHz kuni 1,3 GHz (dipool) Töösagedus 3: 700 MHz kuni 18 GHz (ruupor)

Probleem võib tekkida ainult vajaliku väljundvõimsuse taseme saavutamiseega. Teoreetiliselt oli vaja, et signaaligeneraatori väljundis oleks võimsus 15 dBm ja andmelehel tulenev maksimaalne võimsus on täpselt 15 dBm. Kuna süsteemis on ilmselt mingid muud signaali kaod, siis on võimalik, et vastuvõetud signaal ei ole nii tugev kui vaja. Kaabelduses ja muul viisil elektrivälja sumbumise kompenseerimiseks kõrgetel

sagedustel kasutatakse antenne, mille andmelehel [15] on näha, et selle võimendus on ligikaudu 10 dBi sagedustel, kus kaod muutuvad piisavalt suureks. Viidatud ruuporantenn on nii saate- kui ka vastuvõtu poolel, seega ei ole põhjust arvata, et ei saavutata vajalik tundlikkus.

3.3 Kõrgsageduslüli juhtimise elektriskeem

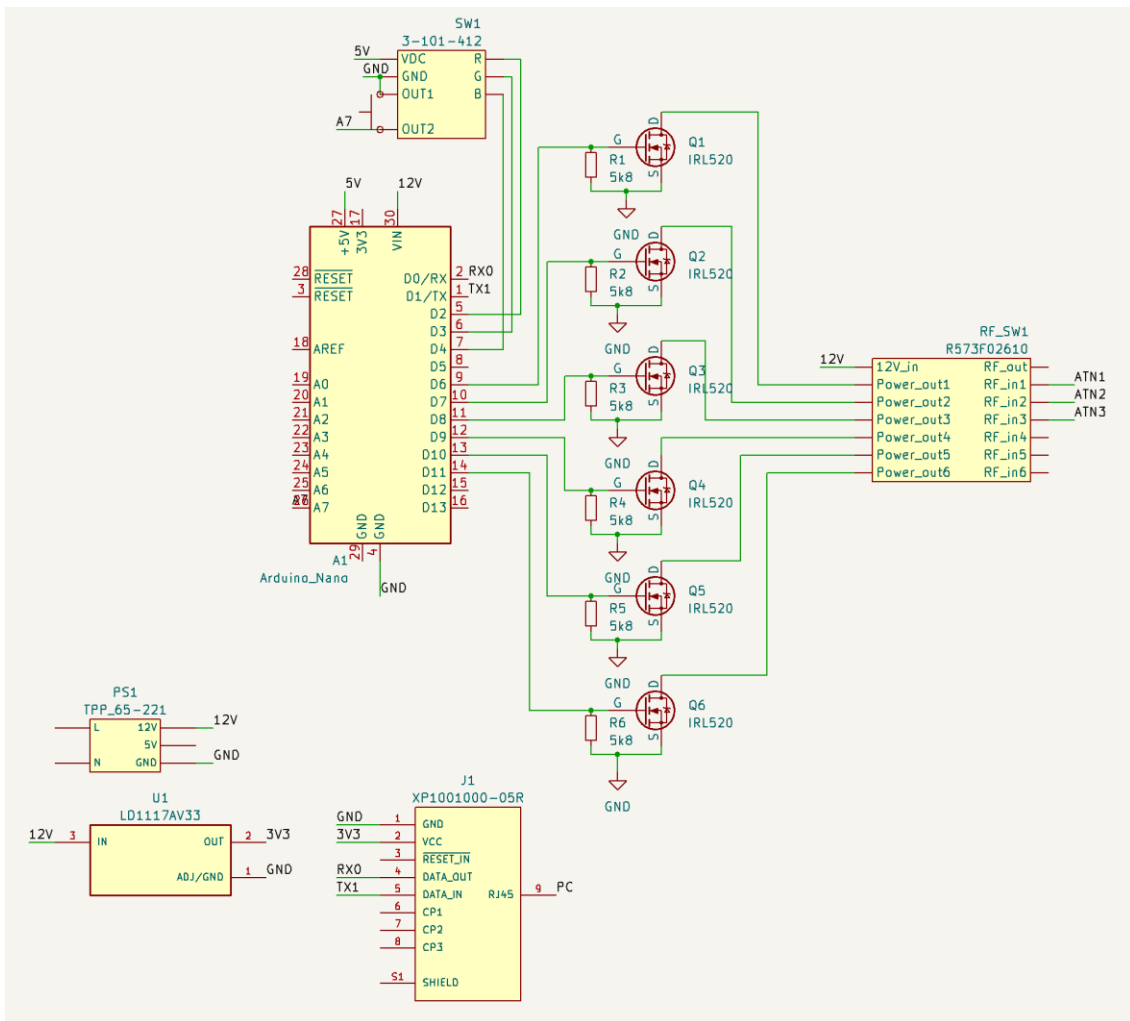
Selleks, et vahetada antenne automaatselt, tehti kõrgsageduslüli kontrolleri, mida on võimalik juhtida üle kohtvõrgu. Kõrgsageduslüli kontrolleri juhib saatja poolel signaali liikumist generaatorist antennidesse ning vastuvõtja poolel antennidest spektrianalüsaatorisse. Elektriskeemi vajalikuks osaks on ka toiteplokk, mille eesmärk on anda koaksiaalkaablite ümberlülitusreleele, kui ka kõikidele muudele komponentidele vajaliku voolu. Skeemi koostamisel kasutatud komponendid on toodud tabelis 2.



Joonis 5 Kõrgsageduslüli kontrolleri plokk skeem.

Tabel 2 Kõrgsageduslüli komponendid.

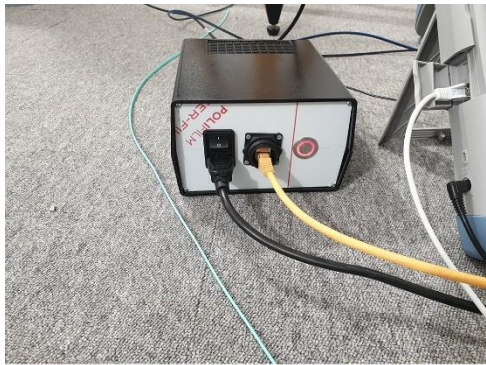
Komponendi nimetus	Olulised parameetrid
Koaksiaalkaablite ümberlüli [16]	Töösagedus: 0 kuni 26,5 GHz Toitepinge/lülituspinge $V_{sisend} = 12 \text{ V}$
Mikrokontroller [17]	Viigu väljundpinge $U_{väljund} = 5 \text{ V}$ Väljundvool: $I_{koogu} \leq 500 \text{ mA}$
Toiteplokk [18]	Sisendpinge: $U_{sisend} = 230 \text{ V RMS}$, $f = 50 \text{ Hz}$ Väljundpinge: $U_{väljund} = 12 \text{ V DC}$ Väljundvool: $I_{väljund} \leq 3,3 \text{ A}$
Transistor [19]	Tüürelektroodi pingeline: $U_{GS} = 5 \text{ V}$ Läte ja neelu pingeline: $U_{DS} \leq 100 \text{ V}$
Lantronix Serial to Ethernet Server [20]	Toitepinge: $U_{sisend} = 3,3 \text{ V}$ Toitevool: kuni 250 mA Andmeviikude pingeline $U_{RX,TX} \leq 5 \text{ V}$
Mahtuvuslik lüli [21]	Toitepinge: alates $U = 5 \text{ V}$ Toitevool: kuni 25 mA



Joonis 6 Kõrgsageduslülitri kontrolleri elektriskeem.

Elektriskeemi tööpõhimõte on selline, et kui saabub kohtvõrgus sõnum seadmesse J1, ehk Lantronix serverisse (Joonis 6), siis see tehakse ümber jadasignaaliiks ja saadetakse edasi seadmesse A1, ehk Arduino Nano viikudesse D1 ja D2. Arduino Nano seejärel muudab õigesti vormistatud käsu korral milline viik D6 kuni D11 on pingestatud ja viike D2 kuni D4 kaudu milline värvikombinatsioon töötab mahtuvuslikul lülitil SW1.

Viigud D6 kuni D11 juhivad eraldi MOSFETi (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*) paisu. MOSFETide neelud on läbi antenni lülitri pingestatud 12 V-se pingega. Kui üks MOSFETi kanal avaneb, siis relee ümberlülitumisel ühendub signaaligeneraatori väljund sobiva antenniga.

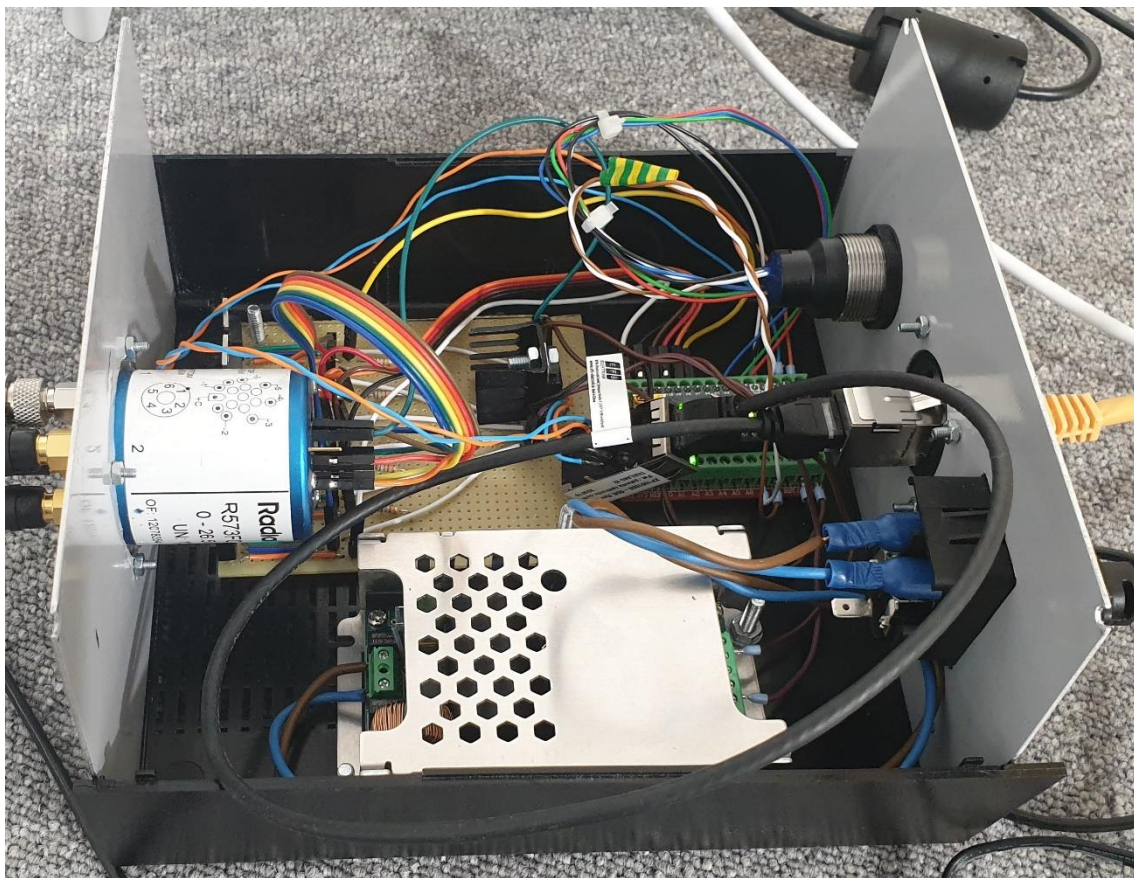


(a)



(b)

Joonis 7 Kõrgsageduslüli kontrolleri fotod: (a) eesmisest küljest, (b) tagumisest küljest.



Joonis 8 Foto kõrgsageduslüli kontrolleri sisemusest.

3.4 Seadmete juhtimine kohtvõrgus

Kõik seadmed on juhitavad üle tavalise Ethernet kaabli, mis on käesolevas töös Cat6 tüüpi kaablid 8P8C kontaktidega.

Ühenduse loomiseks Arduino Nanoga kasutatakse vahelülina Lantronix serverit. Arduino Nano on mikrokontrolleri plaat, millel on ATmega328P mikrokontroller ja Lantronix

server võimaldab luua võrguühendust mistahes jadaühendust võimaldava seadmega, milleks praegusel juhul on Arduino Nano plaadil RX (*receive signal*) ja TX (*transmit signal*) viigud.

Lantronix serveriga ühenduse loomiseks on võimaluseks kasutada näiteks Telnet protokoll. Telnet on rakenduskihi protokoll, mis toetub TCP/IP-le (*Internet Protocol Suite*).

Selgitamaks, kuidas täpselt näevad välja IP paketid ja signaalid, mida seadmed omavahel saadavad, kasutati vabavaralist programmi Wireshark [22], mis võimaldab jälgida võrguliiklust ja edastatud pakette.

Wiresharki kasutati Arduino Nanoga ühenduses veendumisel ja pakettide uurimiseks. Testimisel kasutati ühte juhuslikku käsku, mida seade ootab RX porti. Testkäsuks oli „Ant2“ mis pingestab D7 viigu. D7 viik on ühendatud MOSFETiga, mis juhib koaksiaalkaabli signaali mille tootjapoolne nummerdus on arv 1. Sama käsk ulatub arvust 1 kuni arv 6, ehk „Ant6“.

Uuriti erinevaid variante, kuidas käsk registreeritakse, selleks, et olla kindel, et kui lõpuks pakett saadetakse üle võrgu, siis mikrokontroller on võimeline sellest õigesti aru saama.

Arduino Nanoga ühendusel selgus, et sõltuvalt operatsioonisüsteemist ja tarkvarast läheb signaal üle Telneti erinevalt. Linuxi operatsioonisüsteemis terminali „Ant2“ sisestades ja *enter* klahvi vajutades tuvastas Arduino teksti „Ant2\r\n“. Windowsis programmi PuTTY [23] terminali sama signaali „Ant2“ ilma *enter* klahvi vajutamata tuvastati Arduinos tekst „Ant2“. Muid variante, nagu „Ant2\n“ või „Ant2\n\r“ kummagi programmiga ei olnud võimalik saata. Muuhulgas oli ostsilloskoobiga jadaühenduse signaale uurides võimalik tähele panna, et PuTTY saadab sümboli kohe peale sisestamist, kuid Linuxi terminali rakendus saadab terve sõnumi korraga *enter* klahvi vajutamisel. Töös täiendati programmikoodi, et kompenseerida neid erinevaid variante sama käsu saabumisel.

210	312.886992	192.168.1.29	192.168.1.129	TCP	58	49848 → 10001 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=64240 Len=4
211	312.898454	192.168.1.129	192.168.1.29	TCP	60	10001 → 49848 [ACK] Seq=1 Ack=5 Win=2047 Len=0
212	313.893213	192.168.1.129	192.168.1.29	TCP	60	10001 → 49848 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=5 Win=2047 Len=1
213	313.914452	192.168.1.129	192.168.1.29	TCP	69	10001 → 49848 [PSH, ACK] Seq=2 Ack=5 Win=2047 Len=15
214	313.914517	192.168.1.29	192.168.1.129	TCP	54	49848 → 10001 [ACK] Seq=5 Ack=17 Win=64224 Len=0

Joonis 9 Wiresharki kuvatõmmis Arduino Nanoga suhtlusest.

```

0000  00 80 a3 e2 6b 58 1c 1b 0d 9d 37 54 08 00 45 00  ...kX...7T..E.
0010  00 2c 40 3a 40 00 80 06 36 a3 c0 a8 01 1d c0 a8  ;,@:~...6.....
0020  01 81 c2 b8 27 11 b6 f7 e5 7f 00 4d 0e 6b 50 18  ....'.....M.kP.
0030  fa f0 e6 4e 00 00 41 6e 74 32  ....N..Ant2

```

Joonis 10 Paketi sisu käsuga "Ant2" Arduino Nanosse saatmisel.

Signaaligeneraatori ühenduse kontrollimiseks kasutati Windows operatsioonisüsteemile tehtud programmi NI MAX (*National Instruments Measurement & Automation Explorer*) [24]. Seadmele on võimalik saata SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*) käske sageduse muutmiseks, modulatsiooni muutmiseks jm. Signaaligeneraatori eripära paistab olevat see, et ekraanipilt ei uuene käskude saatmisel üle võrgu – seadme ekraan näitab 1 GHz, aga väljund realselt kiirgab võrgust saadud käsu tõttu 2 GHz signaali. Kätsiti muutes seadme parameetreid uueneb ekraanipilt korrektseks.

Wiresharkiga saadetud ja vastuvõetud võrgupakette uurides on näha, et signaaligeneraatorini jõuavad käsud lihtsa TCP/IP paketina, ilma kõrgema kihi protokollita. Tehes PuTTYga *Raw* tüüpi ühendus signaaligeneraatorisse oli võimalik saata TCP/IP pakett, mille andmeosa on identne NI MAX programmist saadetuga, kuid signaaligeneraator sellele ei reageerinud.

50	65.398516	192.168.1.29	192.168.1.132	TCP	73	49847 → 10000	[PSH, ACK] Seq=5 Ack=2 Win=65536 Len=19
51	65.392494	192.168.1.132	192.168.1.29	TCP	60	10000 → 49847	[PSH, ACK] Seq=2 Ack=24 Win=29248 Len=1 [TCP segment of a reassembled PDU]

Joonis 11 Wiresharki kuvatõmmis signaaligeneraatoriga suhtlusest.

```

0000  00 e0 4c 36 08 61 1c 1b 0d 9d 37 54 08 00 45 00  ..L6.a...7T..E.
0010  00 3b 62 d4 40 00 80 06 13 f7 c0 a8 01 1d c0 a8  ;b:@...;.....
0020  01 84 c2 b7 27 10 eb bf d0 0f a3 c6 e5 d8 50 18  ....'.....P.
0030  01 00 cb f3 00 00 3a 46 52 45 51 20 31 20 30 30  ....:F REQ 1 00
0040  30 20 30 30 30 20 30 30 30  ....0 000 00 0

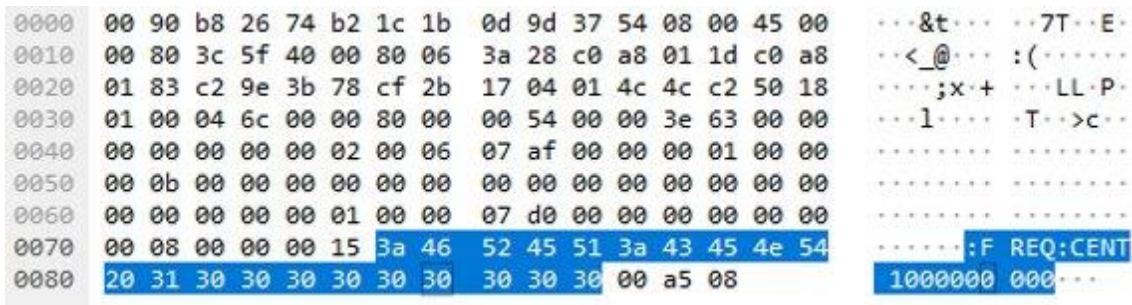
```

Joonis 12 Paketi sisu signaaligeneraatorile 1 GHz sagedusele ümberlülitumise käsu saatmiseks.

Spektrianalüsaatori ühenduse kontrollimiseks kasutati sama NI MAX programmi. Sellel juhul oli TCP/IP-le lisaks vaja protokoll nimega VXI-11 [25].

28	96.234117	192.168.1.29	192.168.1.131	VXI-11 Core	142	V1 DEVICE_WRITE Call (Reply In 29) LID=1 :FREQ:CENT 1000000000
29	96.326703	192.168.1.131	192.168.1.29	VXI-11 Core	90	V1 DEVICE_WRITE Reply (Call In 28) No Error
30	96.366849	192.168.1.29	192.168.1.131	TCP	54	49822 → 15224 [ACK] Seq=297 Ack=197 Win=65280 Len=0

Joonis 13 Wiresharki kuvatõmmis spektrianalüsaatoriga suhtlusest.

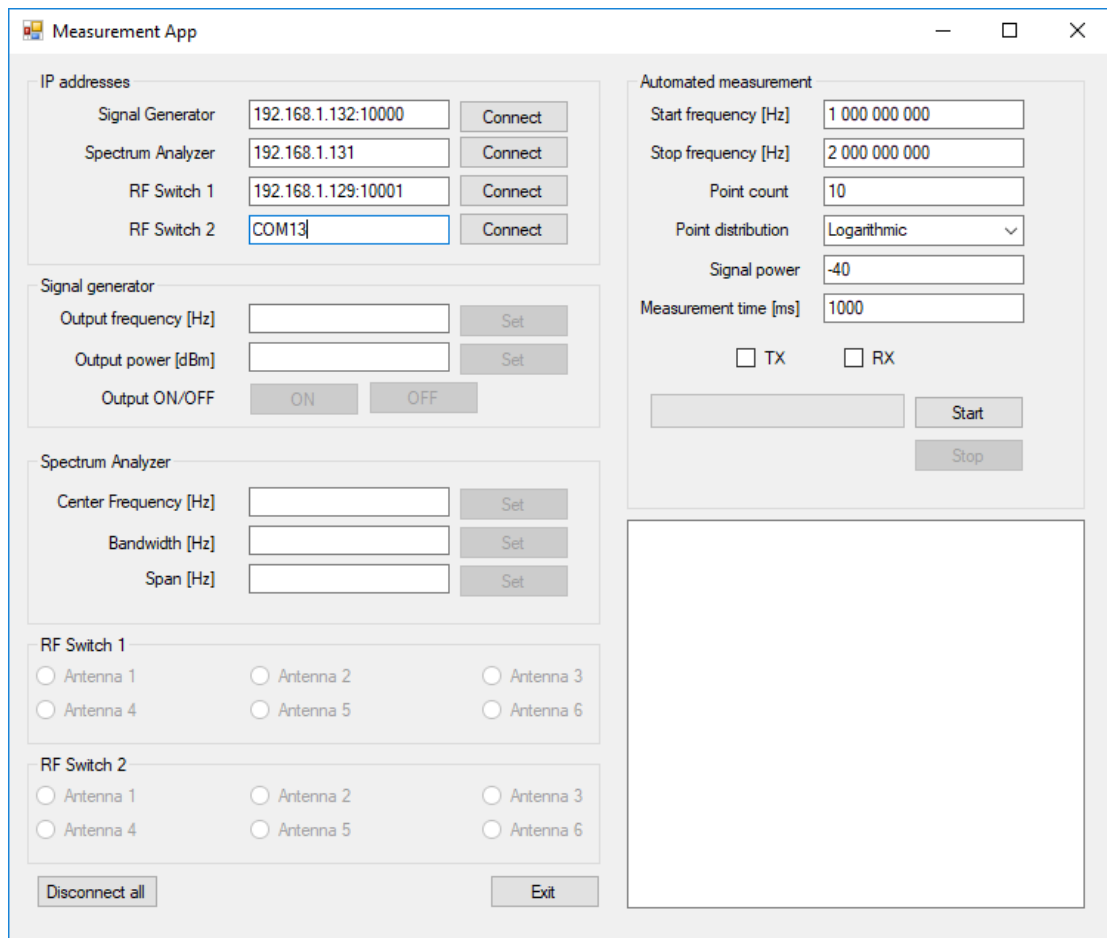


Joonis 14 Paketi sisu spektrianalüsaatoris 1 GHz kesksageduse seadistamiseks.

3.5 Programmikoodi kirjeldus

Programm, millega seadmeid juhitakse on kirjutatud C# keeles ning koosneb põhimõtteliselt neljast suuremast sektsioonist:

1. Seadmetega ühendamine;
2. Seadmetele kasutaja poolt käskude andmine;
3. Automaatne mõõtmine kasutaja poolt määratud sagedusvahemikus;
4. Teadete kuvamine kasutajale.



Joonis 15 Programmi kasutajaliides.

Seadmetega ühendamine toimub National Instrumentsi poolt pakutava teegi abil, mis tuleb kaasa nende tarkvara installeerimisega. Sisuliselt luuakse tavapärase TCP/IP ühendus, mille sisendi ja ühenduse kontrollid tehakse teegisisestes funktsioonides.

Antennide lüliti puhul kasutatakse tavapärast TCP teeki [26], mis tuleb kaasa Visual Studio [27] integreeritud programmeerimiskeskonna installeerimisel.

Seadmetele kasutaja poolt käskude andmine on võimalik alates sellest hetkest, kui on kinnitatud töötav ühendus. Kontrollitakse sisendeid, et nad oleksid seadmete piirangutele vastavad.

Automaatse mõõtmise osas kontrollitakse sisestatud informatsiooni, ehk mõõteparameetreid. Kasutaja saab valida, kas programmi käivitunud arvuti on signaali kiirgav pool, signaali mõõtev pool või täidetakse mõlemat ülesannet. Mõõtmise alustamisel käivitatakse uus programmi haru, kus:

1. Arvutatakse punktid vastavalt soovitud jaotusele;
2. Signaaligeneraatorile ja/või spektrianalüsaatorile saadetakse arvutatud sagedus;
3. Programm ootab, kuni kogutakse andmeid vastuvõtjas;
4. Mõõdetakse signaali tugevus (juhul, kui on vastuvõtu pool);
5. Saadetakse järgmine sagedus ja korratakse alates punktist 2 kuni kõik punktid on mõõdetud.

Kõik mõõtetulemused hoitakse mõõtmise ajal põhimälus ning enne seda, kui programmi haru lõpetab töö andmed salvestatakse .csv failiformaadis programmi kausta, kaasa arvatud näiteks ühenduse katkemise korral.

4 Tulemused ja analüüs

Käesolevas peatükis kirjeldatakse reaalset eksperimenti, kus kontrollitakse kogu loodud süsteemi võimekust. Eksperiment viidi läbi kajavabas kambris. Elektrivälja mõõdeti nii, nagu on kirjeldatud peatükis 3.1. Kõigepealt mõõdeti signaali tugevus avatud ja seejärel suletud kambriuksega. Kasutati ühte arvutit kogu süsteemi juhtimiseks. Antennid, mille tööpiirkond on 10 MHz kuni 1 GHz asuvad üksteisest 2 m kaugusel. 1 GHz ja kõrgema tööpiirkonnaga antennid (ruuporid) on 0,6 m kaugusel. Antennide omavahelistele augustele on juurde liidetud veel seinapaksus 0,05 m.

Praeguses konfiguratsioonis on kogu eksperimenti juhtimas üks arvuti, mistõttu on viidud läbi kambri seinas oleva spetsiaalse ava fiiberoptiline kaabel. Tehtud katsetustel asus vastuvõtusüsteem kambris sees, selleks, et vähendada võimalikku vale signaali mõõtmist ja vähendada müra taset spektrianalüsaatoris.



Joonis 16 Signaali saatvate antennide asetus TTÜ varjestatud kambrist väljas.

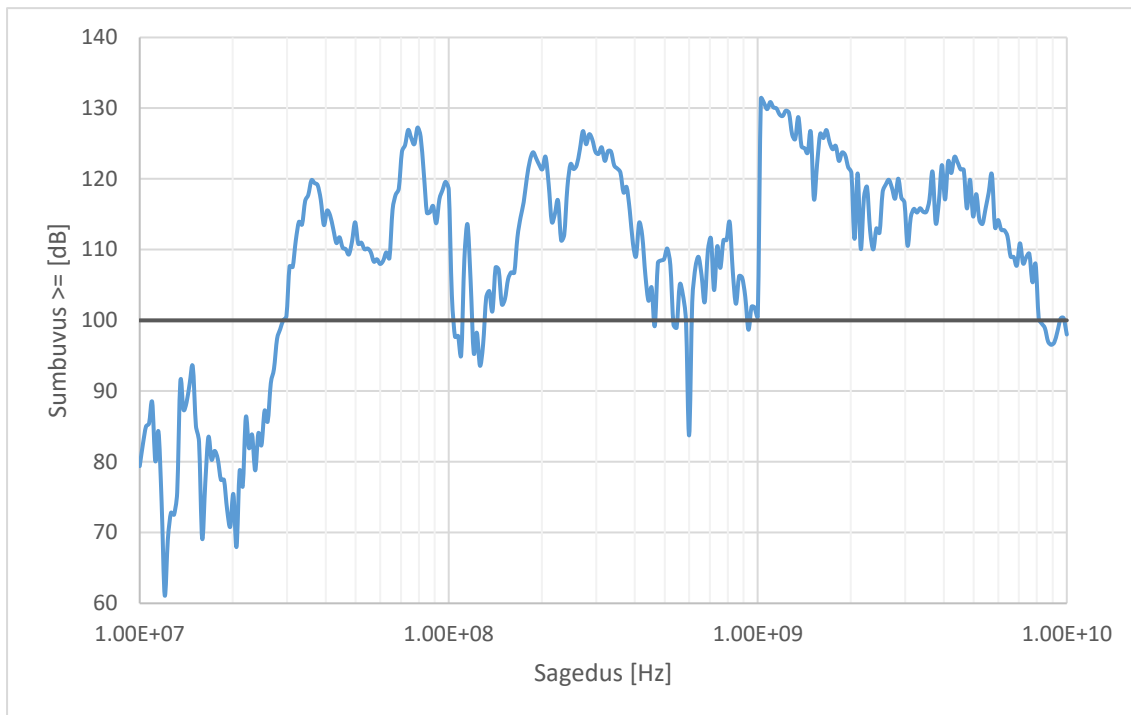


Joonis 17 Signaali vastu võtvate antennide asetus TTÜ varjestatud kambris.

4.1 Eksperimentide tulemused ja analüüs

Lähtuvalt antennide tööpiirkonnast, lülitatakse antenne ümber sagedustel 100 MHz ja 1 GHz. 1 GHz juures tuleb mainida, et antenn on nüüd ka füüsiliselt lähemal. Joonis 18 on näha, et sagedustel 10 MHz kuni 20 MHz ei saavutata soovitud 100 dB suurust sumbumuse eristamise võimekust. Varasemalt tehtud eksperimendiga võrreldes saab kinnitada, et signaali tugevuse langemised 100 MHz kuni 10 GHz vahemikus olid juhuslikud hälbed. Korduskatsel neid kõrvalekaldeid samadel sagedustel uuesti ei tuvastatud.

Reaalsuses on enamus sagedustel varjestatud kambri sumbumus suurem, sest suletud kambriukse korral saadetud signaali näha ei olnud, välja arvatud 800 MHz piirkonnas. Seetõttu on võimalik öelda, et kambri sumbumus on mistahes mõõdetud sagedusel suurem või võrdne kui $a_s^{[dB]} \geq E_{avatud}^{[dBm]} - E_{suletud}^{[dBm]}$. Sumbumus on võrdne selle vahega siis, kui signaal on päriselt tuvastatud. Nendes mõõtepunktides, kus reaalne sumbumus on suurem, kui eeltoodud avaldise vahe, võrdub $E_{suletud}$ müratasemega mõõdetud sagedusel.



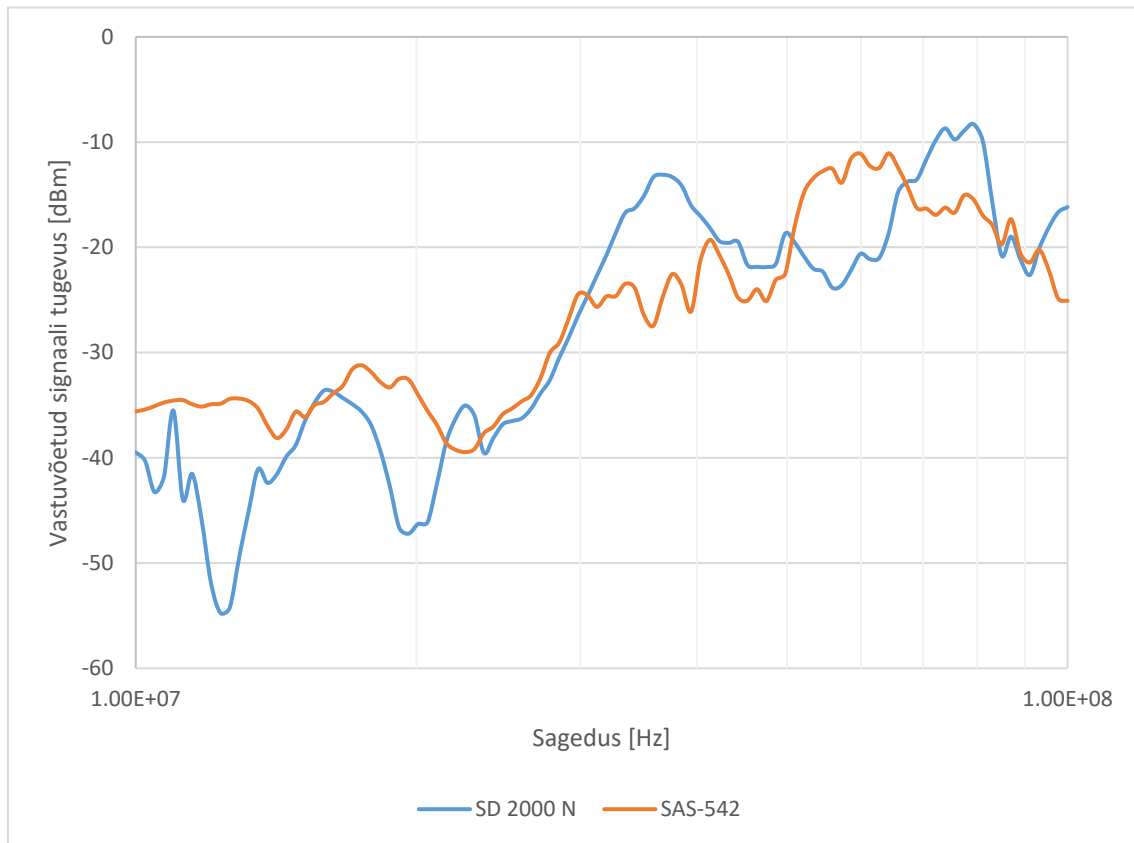
Joonis 18 Sumbumuse minimaalne hinnang sagedustel 10 MHz kuni 10 GHz.

Katsete käigus saadi teada, et vastuvõetud signaali sagedus ei olnud kõrgetel sagedustel – 5 GHz ja kõrgemal, täpselt paigas – see oli õigest sagedusest mööda kuni 1 kHz, ehk erines vähem kui 0.0001 % õigest väärtusest. Kõrgematel sagedustel see viga kasvas, kuid vea suurus protsendina ei kasvanud. Võimalik, et tegu oli spektrianalüsaatorist tuleneva veaga. Oodates ja lastes seadmetel töötada pikemalt, siis vastuvõetud signaali maksimum liikus õige sageduse poole. Kuna see triiv on protsentuaalselt väike, siis see ei mõjuta eksperimendi tulemusi.

Mõõtmistulemustest võib järeldada, et praegune mõõtesüsteem ei ole võimeline mõõtma signaali sumbumust soovitud 100 dB sagedusvahemikus 10 MHz kuni 20 MHz. Samuti saab öelda, et ülejäänud sagedusvahemikus 20 MHz kuni 10 GHz on TTÜ varjestatud kambri sumbumus vähemalt 100 dB. TTÜ kambri spetsifikatsioonis väideti sumbumus olevat suurem või võrdne kui 120 dB sagedustel 100 MHz ja 10 GHz. Mõõtmistulemustest võib öelda, et see ilmselt on tõsi, sest reaalselt signaali ei õnnestunud enamasti mõõta.

Selleks, et uurida kas 10 MHz kuni 20 MHz on signaali vastuvõtva antenni tööpiirkonnast väljas, asendati see ühe teisega ning saadi kahte antenni võrdlev tulemus, kus mõlemad asuvad 2 meetri kaugusel saateantennist.

Tulemustest on näha, et signaali tugevus tõuseb vajalikule -33 dBm nivoole mõlemal korral natuke enne 20 MHz sageduseni jõudmist. Kõverate sarnasuse tõttu võib öelda, et antenn mida kasutatakse signaali edastamiseks ei tee seda nii madalatel sagedustel. Võimalik lahendus puudujäägi eemaldamiseks on kasutada teistsugust antenni signaali saatmisel selles piirkonnas.



Joonis 19 Erinevate vastuvõtuantennide võrdlus.

5 Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli luua mõõtesüsteem, mis mõõdab elektrivälja sumbumust läbi mistahes kambri või ruumi seinte. Mõõtesüsteemi võimekuseks pidi olema leida vähemalt 100 dB sumbunud signaali sagedusvahemikus 10 MHz kuni 10 GHz. Leiti, et hinnanguliselt on võimalik selline süsteem koostada, tingimusel, et kasutada on piisava väljundvõimsusega signaaligeneraator.

Mõõtesüsteemi jaoks koostati kõrgsageduslüliti ja arvutiprogramm, mis juhiks kõiki seadmeid üle kohtvõrgu. Süsteemi riistvaraline loomine ja üksikute osade testimine oli töö kõige aeganõudvam osa.

Süsteemi võimekuse määramiseks mõõdeti TTÜ varjestatud kambrit. Leiti, et mõõtesüsteemi tööpiirkonna madalatel sagedustel 10 MHz kuni 20 MHz vastuvõetud signaali tugevus oli madalam kui tarvis. Võimalik lahendus puudujäägiks on kasutada teistsugust antenni signaali saatmisel selles piirkonnas. Ülejäänud tööpiirkonnas 20 MHz kuni 10 GHz võib öelda, et süsteem on võimeline mõõtma elektrivälja sumbumust automaatselt ja vajaliku 100 dB ulatuses.

Kasutatud kirjandus

- [1] „Holland shielding,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://hollandshielding.com/Shielding-tips-and-tricks>. [Kasutatud 04.05.2023].
- [2] „Albatross Projects EMC Chambers,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.albatross-projects.com/en/products/emc-chambers/>. [Kasutatud 04.05.2023].
- [3] „Albatross Projects Microwave Chambers,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.albatross-projects.com/en/products/microwave-chambers/>. [Kasutatud 04.05.2023].
- [4] „Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.evs.ee/et/evs-en-50147-1-2002>. [Kasutatud 20.03.2023].
- [5] „IEEE 299-2006 Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4117954>. [Kasutatud 30.04.2023].
- [6] J. Zbojovský ja M. Pavlík, „Measuring and simulation of the shielding effectiveness of electromagnetic field of brick wall in the frequency range from 0.9 GHz to 5 GHz,“ *2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, IEEE, 2017, pp. 1-4.
- [7] L. L. Hatfield ja B. Schilder, „MICROWAVE SHIELDING MEASUREMENT METHOD,“ *2009 IEEE Pulsed Power Conference*, IEEE, 2009, pp. 1280-1284.
- [8] V. Bîndar, M. Popescu ja A. Vulpe, „Considerations regarding shielding effectiveness and testing of electromagnetic protected enclosures used in communications security,“ *2014 10th International Conference on Communications (COMM)*, IEEE, 2014, pp. 1-6.
- [9] Keysight, „Keysight Spectrum Analysis Basics,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://courses.ece.ubc.ca/elec391/AN150.pdf>. [Kasutatud 29.04.2023].
- [10] „Keysight Technologies FieldFox Handheld Analyzers,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06516/data-sheets/5992-3702.pdf>. [Kasutatud 22.04.2023].
- [11] „Rohde & Schwarz FSH Specifications,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/FSH_dat-sw_en_5214-0482-22_v3200~1.pdf. [Kasutatud 22.04.2023].
- [12] „Anritsu Field Master Pro,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/datasheet/11410-01000AD.pdf>. [Kasutatud 22.04.2023].
- [13] „Tabor Electronics LS1291P,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.taborelec.com/ls1291p>. [Kasutatud 20.03.2023].

- [14] „Rohde & Schwarz FSH13,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/handheld/rs-fsh-handheld-spectrum-analyzer_63493-8180.html. [Kasutatud 20.03.2023].
- [15] „A.H Systems horn antenna,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.ahsystems.com/datasheets/SAS-571_Horn_Antenna_Datasheet.pdf. [Kasutatud 22.04.2023].
- [16] „Radiall,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Radiall/R573F02610?qs=T3oQrply3y%2FOUB19AaGm0w%3D%3D>. [Kasutatud 02.02.2023].
- [17] „Arduino Nano,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>. [Kasutatud 20.03.2023].
- [18] „Traco Power,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.tracopower.com/int/model/tpp-40-221>. [Kasutatud 20.03.2023].
- [19] „Vishay Siliconix IRL520,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.digikey.com/en/products/detail/vishay-siliconix/IRL520/51135>. [Kasutatud 20.03.2023].
- [20] „Lantronix XPort,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.lantronix.com/products/xport/#product-overview>. [Kasutatud 20.03.2023].
- [21] „Schurter Inc Switch Pushbutton,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.digikey.de/en/products/detail/schurter-inc/3-101-429/7104568>. [Kasutatud 20.03.2023].
- [22] „Wireshark,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.wireshark.org/>. [Kasutatud 29.04.2023].
- [23] „PuTTY,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://putty.org/>. [Kasutatud 03.20.2023].
- [24] „National Instruments NI MAX,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ni.com/en-us/support/documentation/supplemental/21/what-is-ni-measurement---automation-explorer--ni-max--.html>. [Kasutatud 20.03.2023].
- [25] „Wireshark VXI-11,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://wiki.wireshark.org/VXI-11>. [Kasutatud 20.03.2023].
- [26] „C# TcpClient,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/fundamentals/networking/sockets/tcp-classes>. [Kasutatud 29.04.2023].
- [27] „Visual Studio IDE,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://visualstudio.microsoft.com/>. [Kasutatud 29.04.2023].

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Marek Parts

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Varjestatud kambrite sumbumuse mõõtmise süsteem“, mille juhendaja on Ivo Mürsepp
 - 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.

15.05.2023

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 loomingulise 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.