

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Kristi Kuhi 163922IALB

**ELEKTRITUULIKUST PÕHJUSTATUD
VÕIMALIKUD HÄIRED MAAPEALSE
DIGITELEVISIOONI
VASTUVÕTUKVALITEEDILE**

Bakalaurusetöö

Juhendaja: Eerik Lossmann

Doktor

Tallinn 2020

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: Kristi Kuhi

02.01.2020

Annotatsioon

Käesoleva töö eesmärk on uurida elektromagnetväljade analüüsi tarkvara FEKO abil elektrituuliku mõju maapealse digitaaltelevisioonisignaali (DTT) levile. FEKO tarkvara kasutades modelleeritakse elektrituulik. Mudeli põhjal hinnatakse elektrituuliku DTT signaali hajutavatest omadustest tulenevat võimalikku vastuvõetud digitelevisioonisignaali kvaliteedi kahanemist.

Tuuleenergia on maailmas üks populaarsemaid roheline energia allikaid. Aja jooksul on välja tulnud mõned elektrituuliku miinused. Näiteks võivad tuulikud mõjutada signaalide kvaliteeti, mida selles töös uuritakse. Täpsemalt uuritakse digitelevisiooni vastuvõtu kvaliteeti. Uurimiseks modelleeriti FEKO tarkvaras elektrituulik ning kasutati tarkvarast saadud andmeid kvaliteedi hindamiseks.

Töö tulemusena selgus, et elektrituulikutel on mõju vastuvõtva digitelevisiooni kvaliteeti. Eriti keskenduti RCS uurimisele, mille väärtusi pakkus FEKO keskkond.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 25 leheküljel, 6 peatükki, 9 joonist.

Abstract

Possible impact of wind turbines on digital terrestrial television reception quality

The aim of this Bachelor's thesis is to investigate the impact of wind turbines on digital terrestrial television reception quality. The model of the wind turbine is done in FEKO software. The model is used to evaluate the scattering of signals and to determine the reception quality.

Wind energy is one of the leading green energy sources. However, with time some of the cons have surfaced. For example, wind turbines can affect signals, which this thesis is investigating. The investigating is done by modelling a wind turbine in FEKO software.

The outcome of this thesis was that the wind turbines have an effect on the DDT signal. RCS was especially focused on because the data was offered by the used software.

The thesis is in Estonian and contains 25 pages of text, 6 chapters, 9 figures.

Lühendite ja mõistete sõnastik

DTT	<i>Digital Terrestrial Television</i> , digitelevisiooni maapealne edastamine
eKr	enne Kristust
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> , Rahvusvaheline Telekommunikatsiooni Liit
MoM	<i>Method of Moments</i> , momentide meetod
RCS	<i>Radar Cross Section</i> , radari ristlõige
USA	<i>United States of America</i> , Ameerika Ühendriigid

Sisukord

1 Sissejuhatus	8
2 Elektrituulik	9
2.1 Tuuleenergia levik	9
2.2 Elektrituuliku disain	10
2.3 Elektrituuliku ülesehitus	12
2.4 Elektrituuliku töö kirjeldus	13
2.5 Tuulepark.....	15
3 Elektrituulikute mõju digiteleviseooni maapealsele edastamisele	16
3.1 Digiteleviseooni maapealne edastamine (DTT).....	16
3.2 Elektrituulikute võimalikud mõjud digiteleviseooni maapealsele edastamisele...	17
3.2.1 RCS.....	17
4 Mudeli valmistamine	21
4.1 FEKO.....	21
4.2 Mudeli koostamine	21
5 Andmete analüüs	24
5.1 RCS põhjal häirepiirkonna leidmine	24
6 Kokkuvõte	28
Kasutatud kirjandus	29

Jooniste loetelu

Joonis 1. Kolme tiivaga elektrituulikud [1].	10
Joonis 2. Õhu liikumine kurvilisel tiival [6].	11
Joonis 3. Elektrituuliku osaline ülesehitus [8].	13
Joonis 4. Maapealse digitaalse edastuse mudel [9].	16
Joonis 5. Hajuvuse mudeli koordinaadid [13].	19
Joonis 6. Elektrituuliku mudel CADFEKO-s.	22
Joonis 7. Graafik illustreerimaks kõige suuremat RCS väärtust, kui saatja asub 0° juures.	24
Joonis 8. Matlabi kood häirepiirkonna leidmiseks.	25
Joonis 9. Kõige väiksem RCS väärtus kui saatja asub 0° juures	26

1 Sissejuhatus

Tänapäeval mängib energia maailmas tähtsat rolli. Ilma energiata ei töötaks meie tehnoloogia ning isegi lihtsamad igapäevased tegevused, nagu transport või suhtlemine, ei saaks piisavalt areneda. Enamik maailmas kasutatavatest energiallikatest on taastumatud nagu nafta, kivisüsi ning põlevkivi. Seetõttu on hakatud liikuma rohelisema energia poole ning üheks tähtsamaks on siinkohal tuuleenergia.

Tuuleenergia kogumiseks ning rakendamiseks kasutatakse elektrituulikuid, mis lihtsustatult muudavad tuuleenergia elektrienergiaks. Alles 50 aastat tagasi ei mänginud tuul elektritootjana suurt rolli, kuid aina suurem riikide poolne toetus on muutnud selle üheks rohelise energia eestvedajaks.

Tuuleparkide rajamisega kaasneb aga põhjalik planeering, sest tuleb arvestada kõikide murekohtadega. Üheks võib olla digiteleviseiooni levik. Tänapäeva vajadustega seoses kasutatakse viimast aina rohkem, sest DTT (maapealse digiteleviseiooni edastamine) lubab efektiivsust ning mobiilsust. Elektrituulikute mõju uurimine digiteleviseiooni levikule on alles toimumas.

Käesoleva bakalaaurusetöö eesmärgiks on elektrituuliku modelleerimine ning mudeli põhjal digiteleviseiooni vastuvõtu kvaliteedi hindamine.

Töö koosneb kuuest peatükist, millest esimene on sissejuhatus ning kahes järgnevas kirjeldatakse elektrituulikut ning digiteleviseiooni. Järgnevates peatükkides toimub tarkvara baasil elektrituuliku modelleerimine ning leitud andmete analüüs.

2 Elektrituulik

Antud peatükis kirjeldatakse lühidalt tuuleenergia levikut läbi ajaloo ja elektrituuliku disaini ning töö iseloomu.

2.1 Tuuleenergia levik

Inimesed on kasutanud tuuleenergiat alates 5000 aastat eKr, kus tuult kasutati paatide liigutamiseks Niiluse jõel. 200. aastaks eKr olid Hiinas kasutusel tuule mõjul töötavad veepumbad ning Pärsias ja Lähis-Idas kasutati algelisi tuulikuid, et jahvatada vilja. Aja jooksul leiti uusi viise tuule kasutamiseks ning 11. sajandiks kasutasid Lähis-Ida elanikud tuulega töötavaid pumпасid ning tuulikuid ulatuslikult toidu tootmises. Euroopasse jõudis tuule tehnoloogia tänu kaupmeestele ning ristosõdijatele. Euroopast liikus eelnimetatud tehnoloogia immigrandide mõjul üle läänepoolkera [1].

Ameerika kolonialistid kasutasid tuulikuid, et jahvatada vilja, pumbata vett ning lõigata puitu saeveskites. 1800. aastate lõpus ning 1900. aastatel kasutati samuti USA farmides ning väiksemates asulates algelisi tuulegeneraatoreid, kuid suuremast elektritootmisest jäi tuuleenergia esialgu eemale [1].

Maailma esimene tuulepark ehitati 1887. või 1888. aastal Clevelandis USA leiduri ja ettevõtja Charles Francis Brush-i poolt. Jaam koosnes ühest tuulikust, mille 144-labalise seedripuust valmistatud tiiviku läbimõõt oli 17 m ning tuulik sooritas 10 pööret minutis. Tiivik varustas alalisvoolugeneraatorit võimsusega 12 kW ning oli automatiseeritud. Viimase eluiga oli 20 aastat. Esimese elektrituuliku autoriks peetakse taanlast Poul la Cour-i, kes avastas, et väheste labadega ning kiiresti pöörlevad tuuleturbiinid on efektiivsemad [2].

Tuuleenergia suuremale kasutamisele hakati mõtlema naftapuuduse ning keskkonnaprobleemide tõttu. Nafta lõplikkusele hakati USA-s ning maailmas mõtlema 1970. aastatel. Ameerika Ühendriikide valitsus toetas suurte elektrituulikute uuringuid ning arendust. 1980. aastate algul paigaldati Californiasse tuhandeid elektrituulikuid, sest USA poliitika soosis taastavate energiaallikate kasutamist. Sarnaselt USA-ga käis

Euroopas samal ajal elektrienergia areng. Taanist sai Euroopa esimene riik, mis võttis 1976. aastal vastu riikliku programmi tuuleenergia taaselustamiseks [1], [2].

Aastate jooksul on tuuleenergia arenenud ning 2012. aasta lõpuks toodeti maailmas elektrit tuuleenergia abil üle 280 000 MW, millest ligikaudu 50 protsenti (47,9 %) toodeti Hiinas ja USA-s. Euroopa Liidus on selles valdkonnas juhtival kohal Saksamaa, kelle võimus 2012. aastal oli 32 MW, mis tagas riigile maailmas kolmanda koha [3].

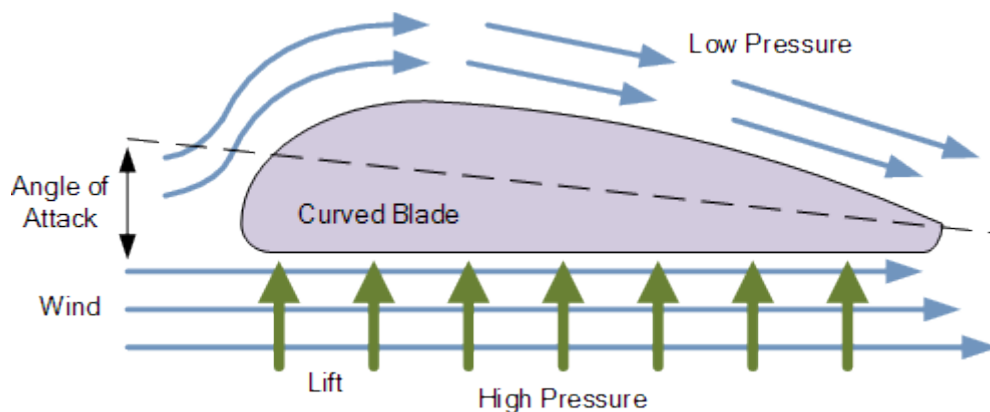
2.2 Elektrituuliku disain

Elektrituulikuid saab kategoriseerida kaheks, labade liikumise järgi horisontaalsel või vertikaalsel teljel. Kõige populaarsemad on horisontaalsed elektrituulikud kolme labaga (Joonis 1). Viimaste laialdane kasutus tuleneb disaini efektiivsusest, mille tagab kolme laba olemasolu. Mida vähem labasid on tuulikul, seda parem on elektrituuliku tasakaal. Tänapäeval on elektrituuliku keskmine eluiga 25 aastat [4], [5].



Joonis 1. Kolme tiivaga elektrituulikud [1].

Elektrituulikute labad on disainitud selliselt, et saavutada maksimaalne energia tuulest ning minimaalne ehituskulu. Enamik labadest valmistatakse klaaskiuga tugevdatud polüestrist või epoksüvaigust. Lisaks kasutatakse tugevdamiseks ka süsinikkiude või aramiidi. Energia maksimeerimiseks kasutatakse kergelt kurrvilisi labasid lamedate asemel, mis võimaldavad püüda 5 kuni 10 protsenti rohkem tuuleenergiat ja töötada efektiivselt ka piirkondades, kus tuulekiirus on madalam. Sellised labad meenutavad lennukite tiibasid. Disaini tõttu liigub õhk üle kurrvilise osa kiiremini kui lameda osa, mis tekitab madalarõhu ala kõrgemale, mille tõttu tõstejõud mõjutab labasid. Tõstejõu abil liiguvad tiivad tuule liikumisel. Kurrvilisi tiibasid kasutatakse, kuna tõstejõu tõttu liiguvad labad kiiremini kui tuul ning genereeritakse rohkem energiat suuremal efektiivsusel. Selliselt disainitud labadel võib esineda tõmbejõudu, mis tekib õhu ja tiiva hõõrdumisel. Tõmbejõud on risti tõstejõuga, mille vastu võitlemiseks on tiivad painutatud ning ahenevad. Lisaks tuleb arvestada tuuleliikumise nurgaga. Mida suurem on nurk, seda kiiremini tiivad pöörlevad, kuid kui nurk liigub üle 20 kraadi hakkab tõstejõud jälle vähenema. Seetõttu on tänapäeva disainidesse lisatud 10 kuni 20 kraadine nn vääne üle tiiva. Selle tulemusena väheneb tuuleliikumise nurk keskosa suhtes, kus õhk liigub suhteliselt aeglaselt [4], [6]. Õhu liikumine on illustratiivselt välja toodud Joonisel 2.



Joonis 2. Õhu liikumine kurrvilisel tiival [6].

Tuuliku disainimisel on kõige tähtsam efektiivsus, mistõttu turbiin asub kõrge torni otsas (umbes 85 m maapinnast). Kõrgemal on tuulte kiirused suuremad, puuduvad takistused ning on võimalus kasutada pikemaid labasid. Mida pikemad on labad, seda rohkem tuuleenergiat on võimalik koguda. Labade pikkus (umbes 70 m) tagab liikumise

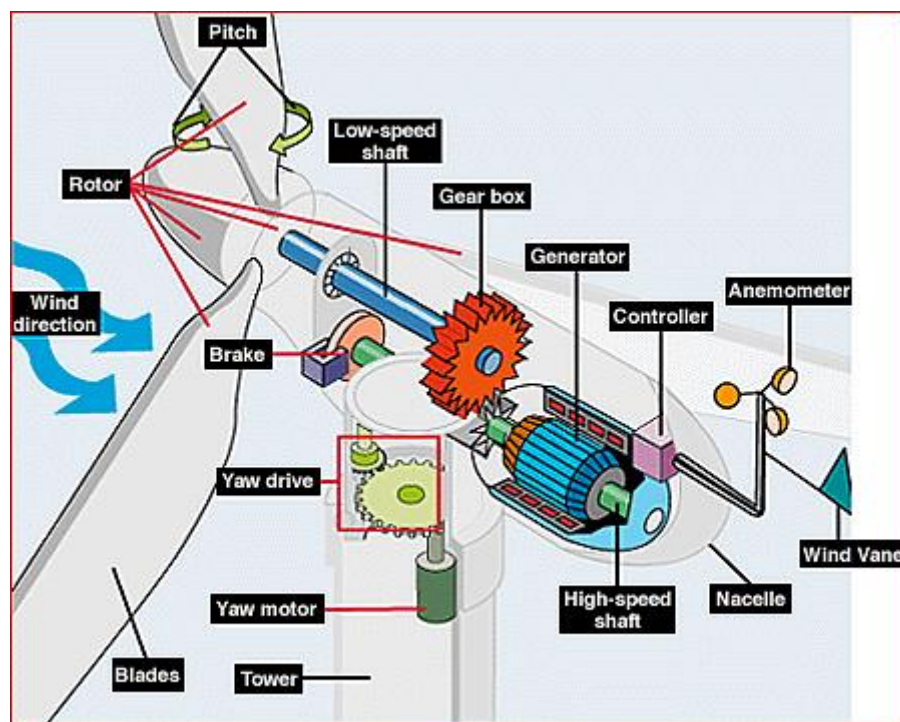
ka väiksemate tuuleiilidega. Sellele vaatamata seisavad tuulikud 14 protsenti oma elueast liikumatult [7].

2.3 Elektrituuliku ülesehitus

Tavaline elektrituulik koosneb kuni 8000 erinevast osast, järgnevalt on väljatoodud tähtsamad:

- torn – 40 kuni üle 100 m alustala;
- tiivikulabad – tavaliselt kolm laba, spetsiaalsetes vormides valmistatud liitmaterjalidest (klaaskiud, epoksüvaik, polüester, süsinikkiud);
- tiivikutrumm – malmist valmistatud, hoiab labad pöörlemise ajal õiges asendis;
- tiivikulaagrid – aitavad tuulikul tuule erinevatele jõududele ja koormustele vastu pidada;
- peavõll – kannab tiiviku pöörlemisel tekkiva jõu üle käigukastile;
- turbiini alus – peab olema piisavalt tugev, et kõiki tuuliku mehhanisme toetada;
- käigukast – hammasrattad suurendavad tiivikuvõlli madalat pöörlemiskiirust, et saavutada generaatori tööks vajalik kiire pöörlemiskiirus;
- generaator – muundab mehaanilise energia elektrienergiaks;
- kontroller – saab informatsiooni anemomeetrilt ning peatab vajadusel tuuliku (kui tuule kiirus liiga madal või kõrge);
- anemomeeter – mõõdab tuulekiirust ning suunda;
- langedussüsteem – mehhanism, mis pöörab gondlit nii, et see tuule suuna muutumisel samuti oma asendit muudab;
- sammsüsteem – reguleerib labade kaldenurka, et puhuvat tuult maksimaalselt ära kasutada;

- võimsusmuundur – muundab generaatori toodetud alalisvoolu elektrivõrgule edastatavaks vahelduvvooluks;
- transformator – muundab tuuliku toodetud elektrienergia kõrgepinge energiaks;
- pidurdussüsteem – ketaspidurid, mis vajadusel peatavad tuuliku liikumise;
- gondel – tuuliku mehhanisme kattev kest;
- kruvid – hoiavad paigal põhikomponente ning peavad olema suutelised taluma ülisuuri koormusi [3], [8].



Joonis 3. Elektrituuliku osaline ülesehitus [8].

2.4 Elektrituuliku töö kirjeldus

Elektrituulikute põhimõte on lihtne – nad kasutavad tuuleenergiat ning muudavad viimase kasutatavaks energiaks, millest saab omakorda toota elektrit. Tuuleenergia omandamiseks kasutatakse turbiini, mille moodustavad elektrituuliku tiivad. Turbiin on masin, mis liigub ringselt liikuv keskkonnas (vedelikus või gaasis) ning püüab kinni läbimineva energia. Elektrituulikute tiibadel on spetsiaalne kurriline disain, mis paneb

tuule kindlal moel liikuma. Selle tõttu kaotab tuul osa oma kineetilisest energiast ning turbiin rikastub võrdse energia võrra. Energia hulk sõltub mitmetest teguritest, millest tähtsamad on tiibade pikkus, disain ja keerlemiskiirus ning tuulekiirus. Mida pikemad on elektrituuliku tiivad, seda suurem on ala, kus turbiin saab energiat koguda. Tuulekiirus on samuti oluline, sest tuuleenergia on võrdeline tuulekiirusega kuubis. See tähendab, et kolm korda suurema tuulekiirusega on võimalik koguda kuni 27 korda rohkem energiat [7].

Ülevaatlilikult kirja pannes algab elektrituuliku töö tuule puhumisega turbiini labadele. Selles sisalduv kineetiline energia püütakse osaliselt kinni labade pöörlemisega. Olenevalt tuuliku disainist püütakse tuul kinni erineva nurga alt. Gondlis olev käigukast muudab madalal kiirusel pöörleva peavõlli kiiremaks, et toita generaatorit efektiivselt. Generaator muudab peavõllilt saadava kineetilise energia elektriliseks energiaks. Gondli tagaosas olevad anemomeetrid (automaatsed kiirust mõõtvad seadmed) pakuvad informatsiooni tuule kiiruse ja suuna kohta. Selle põhjal on võimalik pöörata tuulikut vastavalt ning liiga tugevate tuulte puhul kasutada pidurdussüsteemi. Elektrivool liigub järgnevalt läbi tornis oleva kaabli ning transformator muundab elektrivoolu kõrgepinge energiaks (ehk suurendab voolu umbes 50 korda). Tänu sellele on võimalik elekter efektiivselt üle kanda elektrivõrku [7].

Kokkuvõttes määrab elektrituulikute puhul toodetava elektrienergia neli faktorit:

1. Võimsus – elektrituulikute võimsus võib ulatada 250 W-st kuni 7 MW-ni.
2. Tuule kiirus – tugevamad tuuled toodavad rohkem energiat. Tuulikud toodavad energiat kiirustel 4-30 m/s.
3. Labade raadius – raadius on võrdeliselt seotud toodetava energiaga ehk mida suurem on raadius, seda rohkem energiat on võimalik toota.
4. Õhutihedus – mida kõrgem on õhurõhk, seda efektiivsemalt suudab tuulik elektrit toota [3].

2.5 Tuulepark

Elektrituulikuid saab nimetada tuulepargiks, kui nad toodavad elektrit samas asukohas. Kõik tuulikud on kaablitega ühenduses ning pärast transformaatori läbimist liigub elekter alajaama, kus kogutakse terve pargi elekter, ning see edastatakse elektrivõrku. Parke rajatakse nii merele kui ka maismaale. Merel rajatavates parkides on tavaliselt elektrituulikud suuremad kui maismaal [8].

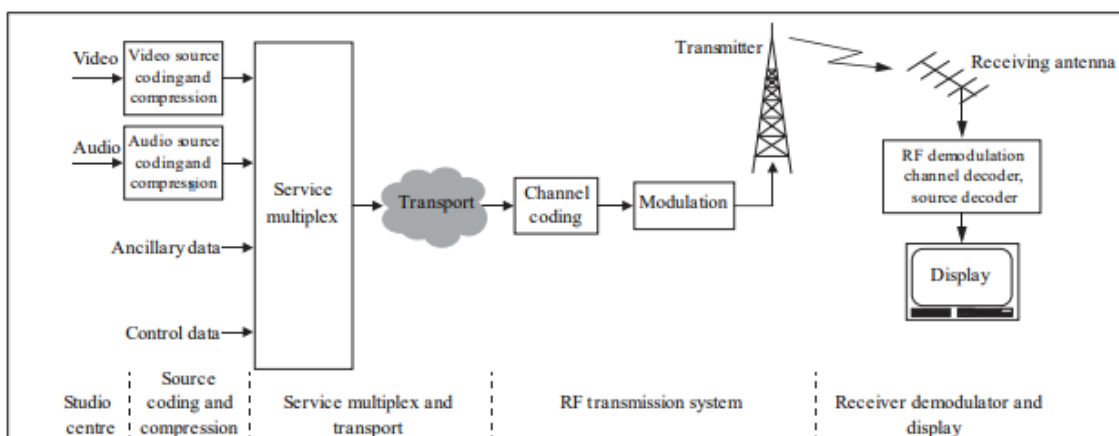
3 Elektriulikute mõju digiteleviseooni maapealsele edastamisele

Antud peatükis kirjeldatakse lühidalt digiteleviseooni edastamist maa peal ning elektriulikute võimalikku mõju viimase levikule.

3.1 Digiteleviseooni maapealne edastamine (DTT)

DTT ehk maapealne digiteleviseooni edastamine on kõige dünaamilisem, kuid samas kõige keerulisem viis televiseooni edastamiseks. Digitaalne edastamine aitab kaasa tänapäeva tarbijate nõudmistele. Kasutajad soovivad televiseooni vaadata erinevatest seadmetest ning mobiilselt. DTT töötab nii katustele asetatud antennidega kui ka väikeste antennidega mobiiltelefoni sees. Kuid maapealset edastamist võivad ohustada mitmed erinevad saatjad, mis asuvad samas või kõrval olevates kanalites ja saatjad, mis tegelevad teiste teenustega. Sellepärast peab maapealset edastamist hoolikalt planeerima, et oleks võimalik efektiivselt ära kasutada sageduse spektrid [9].

Joonisel 4 on väljatoodud DTT lihtsustatud mudel.



Joonis 4. Maapealse digitaalse edastuse mudel [9].

Jooniselt on võimalik vaadelda, et mudel on jaotatud neljaks osaks:

1. Allika kodeerimine ning pakkimine.
2. Teenuse liitmine (multipleks) ja transport.

3. Füüsiline kiht, kus toimub raadiosageduse kanali kodeerimine, moduleerimine ja levitamine.
4. Füüsiline kiht, kus toimub signaali vastuvõtjasse jõudmine, raadiosageduse kanali dekodeerimine ja sisu lahti pakkimine [9].

Antud töös uuritakse mudeli pealt vahepealset hetke, millal signaal saadetakse saatjast (*transmitter*) vastuvõtjasse (*reciever*).

3.2 Elektrituulikute võimalikud mõjud digiteleviseiooni maapealsele edastamisele

Tuuleparkides olevad elektrituulikud käituvad elektromagnetiliste raadiosageduslainete hajutajatena, mille tulemusena võivad tekkida hajutusefektid. Viimased käituvad signaali kajadena, mis võivad omakorda rikkuda erinevate telekommunikatsiooni-teenuste sidemeid [10].

Tuuleparkide mõju on aastate jooksul laialdaselt uuritud. Uuringud on läbiviidud näiteks analoogteleviseiooni edastusega ning radari ja raadiosidega. ITU pakub ka elektrituulikute tingitud televiseioonilevi hajuvuse kohta mudelit, kuid mudeli tingimused kehtivad vaid analoogedastusel [11].

Edasi on selgitatud antud töö käigus kasutatud valemeid, et uurida elektrituulikute mõju digiteleviseiooni maapealsele levikule.

3.2.1 RCS

RCS on mõõteühik, millega saab uurida elektrituuliku mõju süsteemi tööle. Viimasega uuritakse tuuliku poolt tekkinud hajuvust ning selle mõju radari tööle. Täpsemalt mõõdab RCS hajuvuse jõudu kindlas suunas. See tähendab, et mida suurem on mõõteühiku väärtus, seda suurem on selles suunas hajuvus [12].

Torni RCSi σ_i (m^2) vastuvõtuantenni suunas on võimalik leida valemiga:

$$\sigma_i(\phi_r, \theta_t) = krL_{nf}^2 \sqrt{\frac{1+\cos\phi_r}{2}} \sin\theta_t, \text{ kus} \quad (1)$$

k – laine number $k=2\pi/\lambda$ (m^{-1});

r – torni raadius (m);

L_{nf} – torni pikkus (m);

σ_i – RCS vastuvõtuantenni suunas (m^2);

ϕ_r – vastuvõtuantenni nurk horisontaaltasandil, mis on mõõdetud elektrituuliku juurest vastupäeva suunas saatjast;

θ_t – saatja nurk vertikaaltasandil;

λ – lainepikkus (m) [13].

RSC valemit pole selles töös vaja kasutada, sest modelleerimis tarkvara leiab selle automaatselt.

Eelneva valemiga saab leida RCS mõju, kuid vastuvõtjasse jõudva võimsuse saab leida valemiga:

$$P_{Tx-WT_i-Rx} = \frac{P_t G_{Tx-WT_i} G_{Rx-WT_i} \lambda^2 \sigma_i}{(4\pi)^3 R_{Tx-WT_i}^2 R_{WT_i-Rx}^2}, \text{ kus} \quad (2)$$

P_t – saatja maksimaalne võimsus (W);

G_{Tx-WT_i} – saatja kasutegur i-nda elektrituuliku suunas (dimensioonitu);

G_{Rx-WT_i} – vastuvõtja kasutegur i-nda elektrituuliku suunas (dimensioonitu);

R_{Tx-WT_i} – saatja kaugus i-nda elektrituulikuni (m);

R_{WT_i-Rx} – i-nda elektrituuliku kaugus vastuvõtjani (m) [13].

Kui on teada vastuvõtjasse jõudev võimsus, siis võrdluseks saab kasutada ilma RCS arvestamata vastuvõtjasse jõudvat võimsust (ehk kui signaal liiguks otse saatjast vastuvõtjasse), mille saab arvutada valemiga:

$$P_{Tx-Rx} = \frac{P G_{Tx-Rx} G_{Rx-Tx} \lambda^2 L_{prop}}{(4\pi)^2 R_{Tx-Rx}^2}, \text{ kus} \quad (3)$$

G_{Tx-Rx} – saatja kasutegur vastuvõtja suunas (dimensioonitu);

G_{Rx-Tx} – vastuvõtja maksimaalne kasutegur (dimensioonitu);

L_{prop} – levikadu (dimensioonitu);

R_{Tx-Rx} – saatja ja vastuvõtja vaheline kaugus (m) [13].

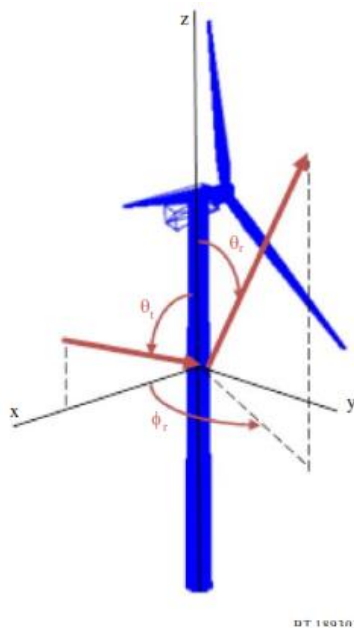
Võimsuse dB muutmiseks saab kasutada valemit:

$$Ratio_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_0}, \text{ kus} \quad (4)$$

P_1 – võrreldatav võimsus,

P_0 – võimsus, mille suhtes võrreldakse [14].

Võrrandites väljatoodud nurgad on nähtavad Joonisel 5.



Joonis 5. Hajuvuse mudeli koordinaadid [13].

Lisaks tuleks välja tuua, et signaali hajutamine toimub vahemikus $-120^\circ < \phi_r < 120^\circ$, mis defineerib RCS ulatuse horisontaaltasandil (ülejäanud hajutamine toimub tuuliku taga) [13].

Iga kanali keskmise amplituudi saab leida kahe võimsuse detsibellide suhtena ning see väljendub järgnevalt:

$$P_i = 10 \log \frac{P_{Tx} - W_{T_i - Rx}}{P_{Tx - Rx}} \quad (5)$$

Alla -45 dB kanaleid enam ei arvestata [13].

4 Mudeli valmistamine

Antud peatükis kirjeldatakse mudeli valmistamist ning selleks kasutatavat programmi FEKO.

4.1 FEKO

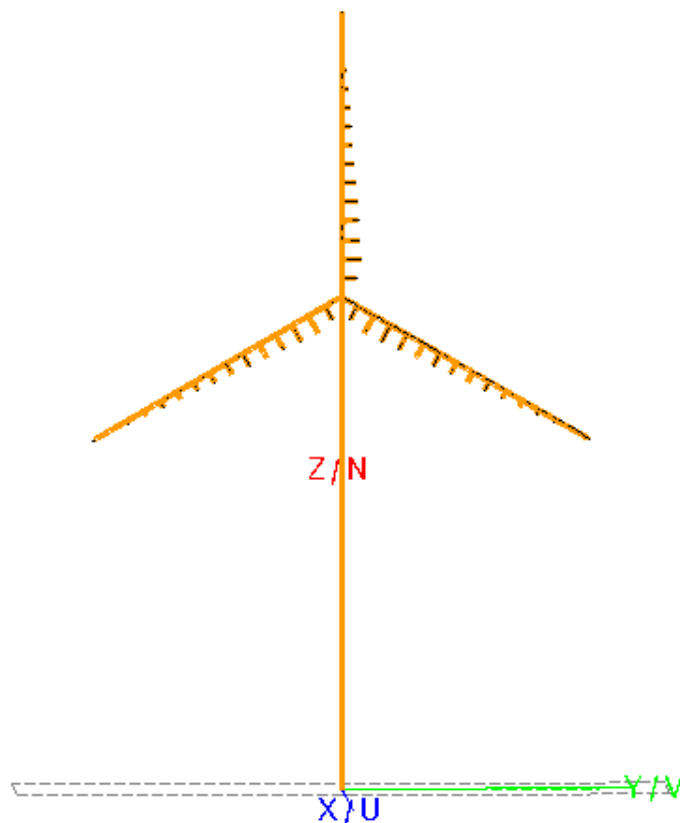
Altair Feko näol on tegemist laiaulatusliku 3D elektromagnetilise tarkvaraga, mida kasutatakse laialdaselt telekommunikatsiooni-, auto-, kosmose- ning kaitsetööstustes. Feko pakub mitmeid erinevaid tööriistu ühe litsentsi alt. Näiteks on võimalik uurida elektromagnetilisi probleeme, kaasa arvatud antenne, mikrolülitusahelaid, raadiosageduse komponente. Probleemi lahendamiseks on Feko-s mitmeid erinevaid lahendusi, mis muudab lahendamise efektiivsemaks ning täpsemaks. Mitmed lahendid on koostatud MoM baasil, mis kasutavad Maxwelli võrrandeid [15].

Töös on kasutatud õpilase litsentsi, mistõttu on programmi kasutamisel piirangud, millega on töö jooksul arvestatud. Antud töös on kasutatud Feko 3D modelleerimise võimalust, kus integreeritud võrk on moodustatud kolmnurkadest. Mudel on koostatud CADFEKO-s ning andmed on kogutud POSTFEKO toel.

4.2 Mudeli koostamine

Elektrituuliku mudel modelleeriti CADFEKO keskkonnas. Õpilaslitsentsi tõttu tekkisid mudeli kujutamise probleemid, kuna litsentsi alusel võib võrgustik koosneda kuni 25 000 kolmnurgast. Algselt oli mõeldud terve elektrituulik 3D-s esitada, kuid plaanitud tuulik ületas limiidi ning seetõttu pidi välja mõtlema alternatiivi.

Lõpuks otsustati tuulik valmistada traadist ning kasutada väikeseid traadijuppe, et lisada mudelile ruumilisust. Lõppmudelit on võimalik vaadelda Joonisel 6.



Joonis 6. Elekrituuliku mudel CADFEKO-s.

Jooniselt on näha, et valitud on kolme labaga horisontaalne elekrituulik, mis on kõige tüüpilisem tuuliku disain.

Torni pikkuseks FEKO keskkonnas on 100 ühikut ning labade pikkused on 58 ühikut. Kõik kolm elekrituuliku laba on üksteisega identsed, kuid asuvad erineva nurga all. Iga laba asub teisest 120 kraadi kaugusel. Tuuliku labade külge on kinnitatud erinevate suurusetega traadid, et muuta labad ruumilisemaks. Iga laba küljes on 15 traati ning tuuliku keskosa suhtes vaadatuna on esimese pikkus 3 ühikut, teise pikkus 4 ühikut ning siis väheneb iga traat 0,3 ühiku võrra. See tähendab, et traatide pikkused on vastavalt: 3; 4; 3,7; 3,4; 3,1; 2,8; 2,5; 2,2; 1,9; 1,6; 1,3; 1; 0,7; 0,4; 0,1. Algse suurendamise eesmärgiks on tuuliku laba muuta kurvilisemaks. Labadel olev iga traat on üksteisest 3,85 ühiku kaugusel, et ulatuda üle laba. Vastavad valikud tehti, et võrgu loomisel oleks kasutuses alla 25 000 kolmnurga ning tuuliku dimensioonid oleksid võimalikult tõetruud.

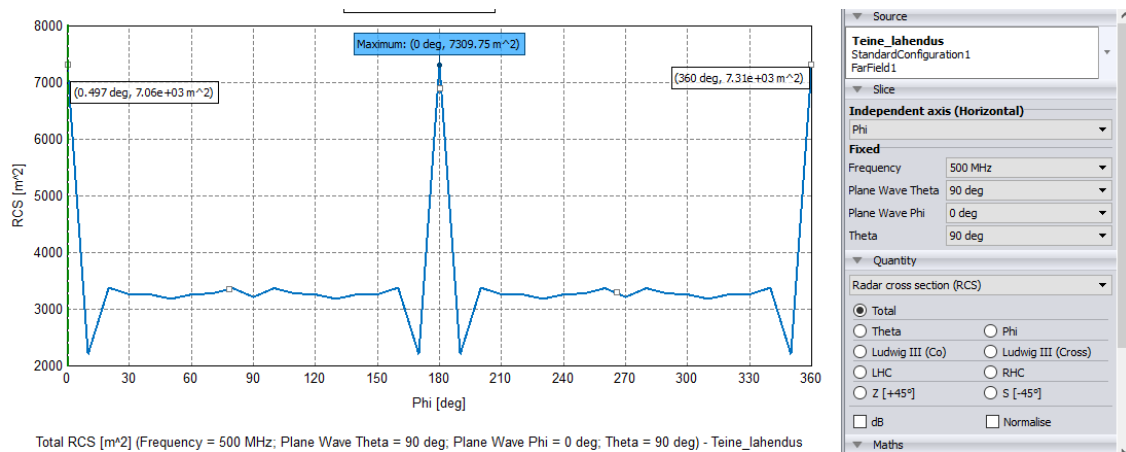
Lisaks on mudelile lisatud digiteleviisiooni saatja ning vastuvõtja. Mõlemad liiguvad elektrituuliku ümber ringselt 10 kraadiste sammudega. See tähendab, et mõlemal trajektoorigil mõõdetakse 37 punkti. Saatja sageduseks on valitud 500 MHz, sest Eestis jäävad kesksagedused just 500 MHz juurde vastavalt Levira andmetele, ning magnituudiks on valitud 10^{-4} V/m. Vastuvõtja on kujutatud kaugsoonina [16].

5 Andmete analüüs

Antud peatükis analüüsitakse mudeli põhjal leitud andmeid ning tehakse järeldused. Arvutuste tegemiseks on kasutatud MATLAB keskkonda ning kasutatud koodid leiab töö lisadest.

5.1 RCS põhjal häirepiirkonna leidmine

FEKO pakub automaatselt mudeli põhjal arvutatud RCS väärtuseid, kus on võimalik muuta saatja ning vastuvõtja asukohtasid vastavalt 10 kraadiste sammudega. Lihtsustamiseks on algselt võetud saatja asukoht konstantseks 0° juurde ning otsitud seejärel graafiku põhjal suurim RCS väärtus.



Joonis 7. Graafik illustreerimaks kõige suuremat RCS väärtust, kui saatja asub 0° juures.

Graafikult saab välja lugeda, et kõige suurem RCS väärtus asub Phi teljel 0° juures. 180° juures on RSC suurem, kuid arvestada tuleb φ_r vahemikku, mis jäi 120° ja -120° vahele. Sellest tulenevalt on suurim RSC väärtus 7060 m^2 .

Häirepiirkonna leidmiseks on kasutatud MATLAB-i keskkonda ning koodi võib näha Joonisel 8.

```
%Scattering power
```

```
f = 500e6; %sagedus
```



```

wavelength = 299792458/f; %lainepikkus

Pmax = 1000; %saatja võimsus

Gt = 1; % kasutegur 1

Gr = 1; % kasutegur 1

Rt = 20000; % Saatja kaugus elektrituulikust ning saatjast

d = 2*pi*Rt; % Trajektoori on ring ning raadius Rt

Rw = 50:50:d; %Distantis 50m kaupa

len = length(Rw); %Rw pikkus

RCS = 7060; %Suurim RCS väärtus

%%VV ja Saatja vaheline võimsus ilma tuulikuta

pow_VV_S=(Pmax*Gt*Gr*wavelength^2)/((4*pi)^2*Rt^2); % Võimsuse
arvutamine

dbm_algne=10*log10(pow_VV_S/Pmax); %Võimsuse dB muutmine

%%Tuuliku segamisel võimsus

for i = 1:len

    pow(i)=(Pmax*Gt*Gr*wavelength^2*RCS)/((4*pi)^3*Rt^2*Rw(i)^2);
    %võimsuse arvutamine

    dbm(i)=10*log10(pow(i)/0.001); %Võimsuse dB muutmine

    dbm_vastus(i) = (dbm(i) - dbm_algne); %% Kahe võimsuse suhte
    leidmine

end

end

```

Joonis 8. Matlabi kood häirepiirkonna leidmiseks.

Koodis on kommentaaridena (eraldatud kahe % märgiga) välja toodud ridade ülesanded.

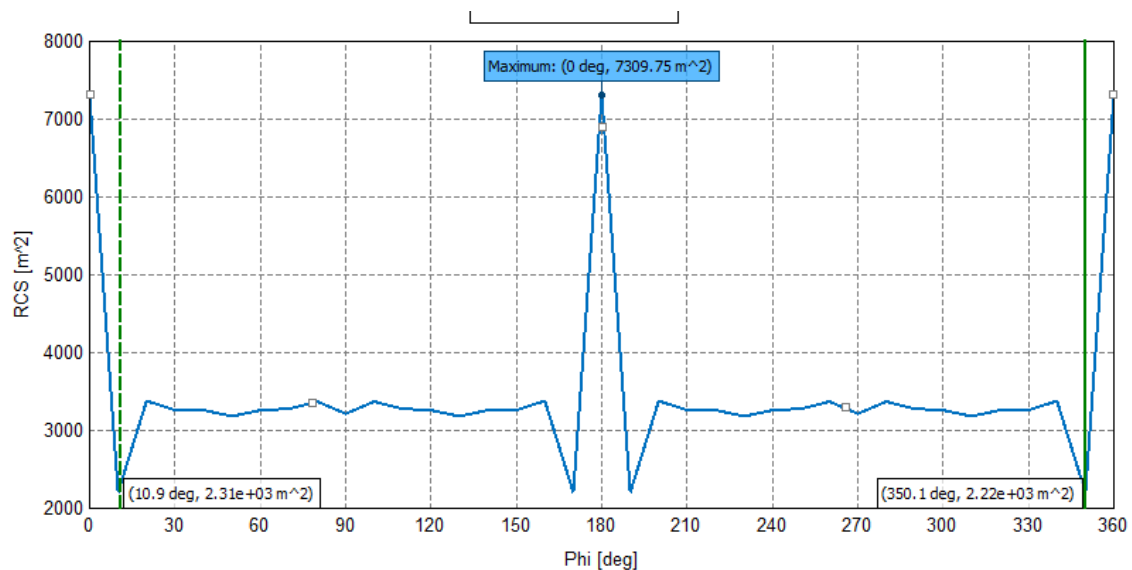
Esmalt on kasutatud valemit 3, et leida vastuvõtjasse jõudev võimsus ilma tuuliku segamiseta. Levikaoga ei ole arvestatud ning vastuvõtja ja saatja vaheliseks konstantseks kauguseks on võetud 20 km. Selline distants on digitelevisiooni signaali saatja ning vastuvõtja vahel tavaline. Saatja maksimaalseks võimsuseks on võetud 1000 MW. Kasutegurid on võrdsustatud ühega. Seejärel muudetakse leitud vastus valemiga 4 detsibellideks.

Seejärel on kasutatud valemit 2, millega leitakse iga 50 m tagant vastuvõtjasse jõudev võimsus ning muudetakse see omakorda detsibellideks.

Järgneval on koodis kasutatud valemit 5, kuid võimsused arvutatakse koodis varem ümber. Arvuliseks kriteeriumiks suhtel on -45 dB. Kui kahe võimsuse suhe muutub väiksemaks kui -45 dB, pole tegemist enam häirepiirkonnaga.

Antud koodis on kriteerium täidetud 84 elemendi juures ning kuna arvutati iga 50 m tagant, siis on häirepiirkonnaks $50 \cdot 84$ ehk 4200 m ehk 4,2 km. Sellest võib järeldada, et 4,2 km raadiuses elektrituuliku ümber on suurem võimalus häire tekkimiseks.

Võrdluseks võib võtta samalt graafikult kõige väiksema RSC väärtuse, milleks on 2310 m^2 , mis asub umbes 10° juures phi skaalal. See on nähtav Joonisel 9.



Total RCS [m²] (Frequency = 500 MHz; Plane Wave Theta = 90 deg; Plane Wave Phi = 0 deg; Theta = 90 deg) - Teine_lahendus

Joonis 9. Kõige väiksem RSC väärtus kui saatja asub 0° juures.

Sama koodi järgi arvutades, muutes vaid RSC väärtust, täitub kriteerium juba 48 elemendi juures ehk häirepiirkonnaks on $48 \cdot 50$ ehk 2400 m ehk 2,4 km.

Häirepiirkonna suurus on väga suures sõltuvuses RSC väärtusest ning kõige kriitilisema ning kõige parema tulemuse vahe on ligikaudu kahekordne. Suur RSC väärtus 0° juures tekkis, sest saatja ning vastuvõtja olid mõlemad tuulikuga sama nurga all. Kõige suuremaid tõuse oli graafikutelt näha 180° juures ning selle põhjustas jälle saatja ning vastuvõtja asend. φ_r nurk oleks olnud sirgjoon, kuid nurk φ_r peab jääma -120° ja 120° vahele.

6 Kokkuvõte

Bakalaurusetöö eesmärgiks oli elektrituuliku modelleerimine ning selle mudeli põhjal digitelevisiooni vastuvõtu kvaliteedi hindamine.

Tuuleenergia annab alternatiivi taastumatutele energiaallikatele. Aja jooksul on tekkinud aina rohkem tuuleparke ning üha rohkem riike maailmas liitub initsiatiiviga. Tuuleparkide rajamiseks tuleb teha tõhus planeering, millega võib vältida negatiivseid aspekte. Üheks selliseks aspektiks on signaalide hajutamine.

Selles töös keskenduti digitelevisiooni signaali hajumisele ning uuriti mudeli peal vastuvõtukvaliteedi muutumist. Mudel modelleeriti FEKO keskkonnas.

Kuna elektrituuliku mudeli modelleerimiseks CADFEKO keskkonnas oli kasutusel õpilase litsents, siis viimane seadis töö tulemusele piirangud. Kui algselt oli mõeldud terve elektrituulik esitada 3D-s, siis alternatiivse variandina pidi tuuliku valmistama väikestest traadijuppidest.

Eriti keskenduti RCS andmetele, kuna tarkvara andis need väärtused automaatselt graafikutega.

Arvutuste kaudu leiti häirepiirkonnad ning avastati, et viimase suurus on sõltuvuses RSC väärtusest ning kõige kriitilisema ning kõige parema tulemuse vahe on märkimisväärne. Tehtud arvutuste kaudu tuli juba välja peaaegu kahekordne erinevus.

Tulemused pole muidugi täpsed, sest kasutati lihtsustatud mudelit, kuid usun, et nende põhjal saab teha selgeid järeldusi.

Kasutatud kirjandus

- [1] EIA-U.S. Energy Information Administration, „Wind explained. History of wind power,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/history-of-wind-power.php>. [Kasutatud 01 01 2020].
- [2] A. Juske ja P. Raesaar, Tuulikud läbi aegade, Tallinn: Vali Press OÜ, 2008.
- [3] Energiatalgud, „Elektrituulik,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://energiatalgud.ee/index.php/Elektrituulik?menu-133#Elektrituulik_-_t.C3.B6.C3.B6p.C3.B5him.C3.B5te_ja_.C3.BClesehitus. [Kasutatud 01 01 2020].
- [4] IBERDROLA, „The main curiosities of wind turbines and its blades revealed,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.iberdrola.com/press-room/top-stories/wind-turbines-blades>. [Kasutatud 2020 01 01].
- [5] Acciona, „Wind Turbines,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.acciona.com/renewable-energy/wind-power/wind-turbines/>. [Kasutatud 01 01 2020].
- [6] Alternative Energy Tutorials, „Wind Turbine Blade Design, Flat or Curved,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/wind-turbine-blade-design.html>. [Kasutatud 01 01 2020].
- [7] C. Woodford, „Wind turbines,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.explainthatstuff.com/windturbines.html>. [Kasutatud 01 01 2020].
- [8] Newcom Group, „How Wind Fram Works,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.newcom.mn/en/media/news/176>. [Kasutatud 01 01 2020].
- [9] ITU-R, „Handbook on Digital Terrestrial Television Broadcasting Networks and Systems Implementation,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-63-2016-R1-PDF-E.pdf.

- [10] A. C. Casanova, M. C. Ramon, L. de Haro y Ariet ja P. Blanco-Gonzalez, „Wind farming interference effects,“ %1 *International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, 2008.
- [11] I. Angulo, D. de la Vega, O. Grande, N. Cau, U. Gil, Y. Wu, D. Guerra ja P. Angueira, „Empirical evaluation of the Impact of Wind Turbines on DVB-T Reception Quality,“ *IEEE TRANSACTIONS ON BROADCASTING*, kd. LVIII, nr 1, 2012.
- [12] C. Ton, „Radar cross section (RCS) simulation for wind turbines,“ Monterey, California, 2013.
- [13] ITU-R, Assessment methods of impairment caused to digital television reception by wind turbines, 2015.
- [14] Rapid Tables, „What is a decibel (dB)?,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.rapidtables.com/electric/decibel.html>. [Kasutatud 02 01 2020].
- [15] Altair. HyperWorks, „Altair Feko™ Overview,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://altairhyperworks.com/product/FEKO>. [Kasutatud 02 01 2020].
- [16] Levira, „Digilevi tasuta kanalite signaali edastavad saatjad,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://tasutatv.ee/saatejaamad/>. [Kasutatud 02 01 2020].