



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Markus Maunumaa

KESTOMAGNEETTIGENERAATTORI

Generaattorin prototyypin suunnittelu

Tekniikka
2021

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Markus Maunumaa
Opinnäytetyön nimi	Kestomagneettigeneraattori
Vuosi	2021
Kieli	suomi
Sivumäärä	39 + 2 liitettä
Ohjaaja	Marko Rantasalo

Tämän opinnäytetyön aiheena on suunnitella ja valmistaa mahdollisimman yksinkertainen kestopagneettigeneraattori. Generaattori on suunniteltu tuottamaan sähköä esimerkiksi pientuulivoimalaitoksessa.

Pääsääntöisesti työssä keskitytään generaattoreihin ja niiden toimintaan. Alussa on yleistä tietoa erityyppisten generaattoreiden toimintaperiaatteista, joita käytetään myös suuren kokoluokan voimalaitoksissa. Erilaisten generaattorityyppien toimintaa vertaillaan keskenään.

Kestomagneettigeneraattorin prototyypin suunnittelun jälkeen keskitytään laitteen kokoamiseen. Rakentamisvaiheessa otetut valokuvat havainnollistavat työn etenemistä. Laitteen pyörityskokeen suorittamiseksi sille on lopuksi rakennettava tarkoitukseen sopiva alusta.

Lopuksi generaattoria koekäytetään eri pyörimisnopeuksilla erillisen sähkömoottorin ja kiilahihnan avulla. Ensimmäisessä mittauksessa mitataan pelkkä jännite. Kaksi muuta mittausta tehdään kuormittamalla generaattoria käyttäen kahta erilaista kuormaa.

Opinnäytetyön lopputuloksena on toimiva kestopagneettigeneraattori, jota voidaan käyttää esimerkiksi pientuulivoimalaitoksissa.

ABSTRACT

Author	Markus Maunumaa
Title	Permanent Magnet Generator
Year	2021
Language	Finnish
Pages	39 + 2 Appendices
Name of Supervisor	Marko Rantasalo

The subject of this thesis was to design and manufacture as simple as possible a permanent magnet generator. The generator was designed to produce electricity for example at a mini wind power plant.

This thesis mainly focuses on generators and their operation. The operating principles of different types of generators used in large power plants was studied. Different generator types were compared with each other.

After designing a prototype of the permanent magnet generator, the focus was on assembling the device. Photographs were taken during the construction phase to illustrate the progress of the work. To perform the rotation test of the device, a suitable platform was built for it.

Finally, the generator was tested at different speeds with a separate electric motor and V- belt. In the first measurement, only the voltage was measured. The two other measurements were made by loading the generator using two different resistors.

The result of the thesis is a permanent magnet generator that can be used in small-scale wind power plants.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	8
2	TUULIVOIMA.....	9
	2.1 Tuulivoiman hyödyntäminen	9
	2.2 Pientuulivoima	9
	2.3 Pientuulivoimalan generaattori	10
	2.4 Siipien vaikutus tehoon.....	11
	2.5 Energian syöttäminen verkkoon pientuulivoimalla	12
3	VAIHTOSÄHKÖGENERAATTORIT	13
	3.1 Yleistä	13
	3.2 Tahtigeneraattori	13
	3.3 Kestomagneettigeneraattori	14
	3.4 Epätahtigeneraattori	14
4	TASASÄHKÖGENERAATTORIT.....	16
	4.1 Yleistä	16
	4.2 Tasasähkögeneraattorin toimintaperiaate.....	16
	4.3 Tasa- ja vaihtosähkögeneraattorien eroavaisuuksia.....	16
	4.4 Tasasähkögeneraattorin haittapuolia.....	17
5	KESTOMAGNEETTIGENERAATTORIN SUUNNITTELU	18
	5.1 Lähtökohta	18
6	GENERAATTORIN RAKENTAMINEN	19
	6.1 Lähtöarvot	19
	6.2 Kuoren suunnittelu ja valmistus.....	19
	6.3 Magneettien kiinnitys kuorikappaleeseen.....	20
	6.4 Staattorilevyt.....	22
	6.5 Akselirunko.....	22
	6.6 Käämien eriste	24
	6.7 Käämintä.....	25

6.8	Prototyypin kokoaminen.....	26
7	PROTOTYYPIN TOIMINNAN TESTAUS.....	29
7.1	Testauksen suunnittelu.....	29
7.2	Generaattorin pyöritystapa.....	29
7.3	Pyörimisnopeuden säätö	30
7.4	Kiinnitysrakenteet.....	31
7.4.1	Generaattorin kiinnitys alustaan.....	31
7.4.2	Kulmavaihdemoottorin kiinnitys alustaan	33
7.5	Generaattorin pyörityskoe.....	33
8	MITTAUSTULOKSET.....	34
8.1	Mittaustulokset.....	34
9	YHTEENVETO	37
	LÄHTEET.....	38
	LIITTEET	39

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Pientuulivoimajärjestelmän osat. /6/	10
Kuva 2. Winspot-merkkisen pientuulivoimalan tuottokäyrä. /6/	12
Kuva 3. Roottori etupuolelta. Laakerit ovat jo paikallaan.	20
Kuva 4. Magneetit liimattuna roottorin sisäkehälle.	21
Kuva 5. Staattorilevyt ja käämirulla kiinnitettynä akselirunkoon.	23
Kuva 6. Kääminnäissä käytetty apuväline.....	26
Kuva 7. Valmiiksi koottu generaattori takapuolelta.....	28
Kuva 8. Generaattori kiinnitettynä "testauspenkkiin".	32
Taulukko 1. Generaattorin tuottama jännite ilman kuormaa.	34
Taulukko 2. Generaattorin tuottama jännite, virta ja teho 74 Ω kuormalla.....	35
Taulukko 3. Generaattorin tuottama jännite, virta ja teho, kun kuormana on 40W:n hehkulamppu.	36

LIITELUETTELO

LIITE 1. Generaattorin kokoonpanopiirustus

LIITE 2. Generaattorin räjäytyskuva

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena oli suunnitella ja valmistaa generaattori lähinnä koti- ja harrastekäyttöön tarkoitettuun pientuulivoimalaitokseen. Tuulivoima on nykyään jo erittäin merkittävä energiantuotannon lähde Suomessa, ja jatkuvasti on kehitteillä uusia hankkeita sen lisäämiseksi. Markkinoilla on varsinaisten energiantuotantoon tarkoitettujen tuulivoimaloiden lisäksi kotikäyttöön tarkoitettuja pientuulivoimaloita.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään pääsääntöisesti oman generaattorini suunnitteluun, mutta käydään läpi myös varsinaisten tuulivoimalaitosten ja erilaisten generaattorityyppien toimintaa. Tarkoituksena oli suunnitella mahdollisimman yksinkertainen generaattorin prototyyppi, jolla voidaan havainnollistaa sähkön tuottaminen mahdollisimman yksinkertaisesti.

Normaaleista vaihtosähkögeneraattoreista poiketen tämä generaattori ei tarvitse erillistä magnetointivirtaa, vaan se toimii kestopagneettiperiaatteella. Toimintaperiaate on siis samanlainen kuten polkupyörän dynamossa. Generaattoria pyöritettäessä voidaan havainnollistaa, miten käämiin saadaan syntymään vaihtosähköä pyörivästä liikkeestä pyörivässä magneettikentässä, ja miten esimerkiksi pyörimisnopeus vaikuttaa jännitteeseen ja tehoon. Prototyyppi on suunniteltu mahdollisimman yksinkertaiseksi kuvaamaan kyseistä ilmiötä.

Kokonaisten pientuulivoimalan suunnittelu yksinkertaisimmillaankin käsittäisi lisäksi muun muassa siipien, generaattorin kiinnityksen runkoon sekä varsinaisen laitteen rungon suunnittelun.

2 TUULIVOIMA

2.1 Tuulivoiman hyödyntäminen

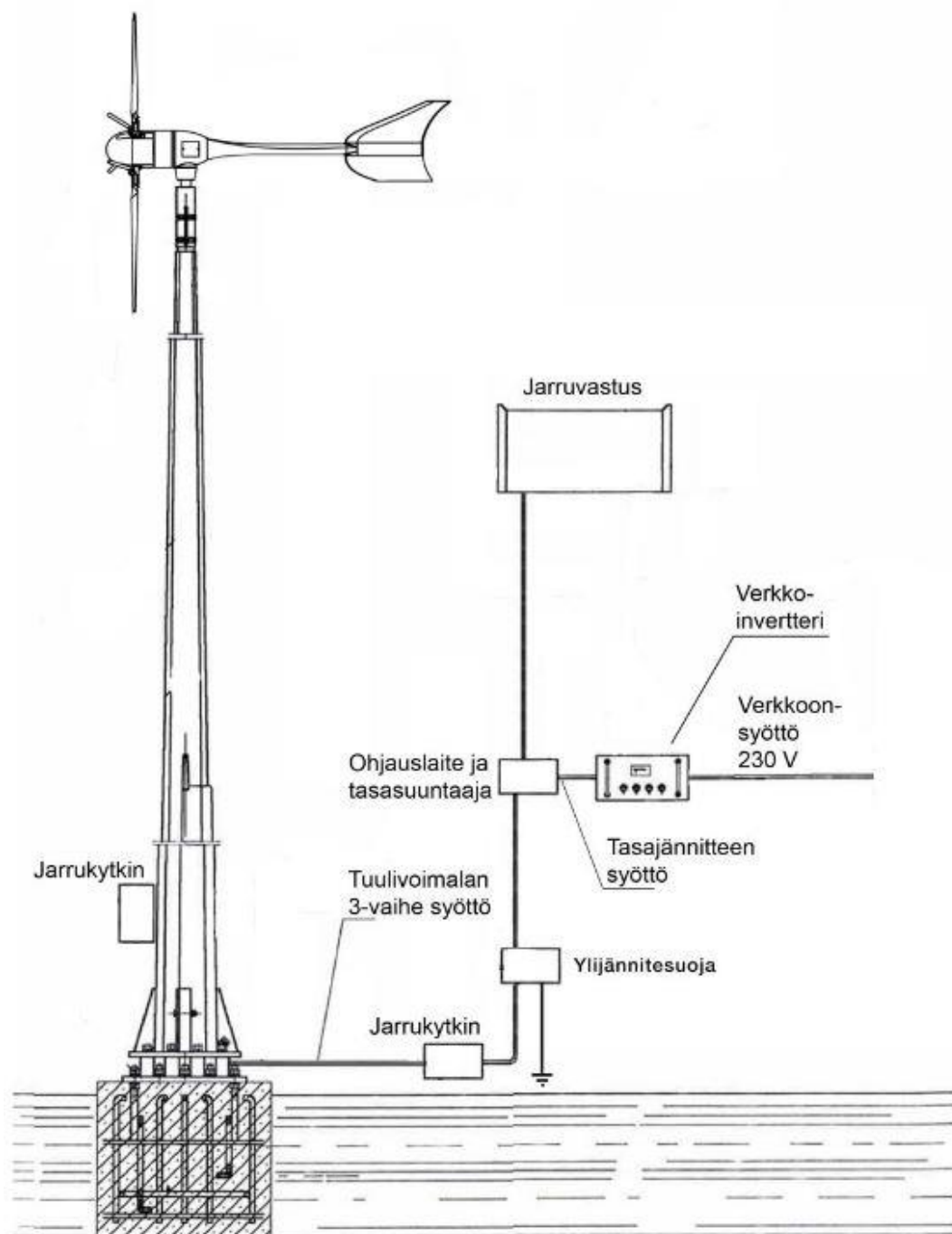
Tuulivoimalaitos on laite, joka hyödyntää tuulesta saatavan liike- energian sähköksi. Tuulivoimalan roottorin siivet muuntavat liike- energian pyörimisliikkeeksi, joka generaattorin avulla muutetaan sähköenergiaksi. Energian tuottamiseen tarkoitettut voimalaitokset, joita koko maailmassa rakennetaan kiihtyvällä vauhdilla, ovat yleensä lähes 200 metriä korkeita, ja yhden voimalan tehontuotto on useita megawatteja.

2.2 Pientuulivoima

Pientuulivoiman tarkoitus on tuottaa energiaa lähinnä yksittäisten kotitalouksien käyttöön, akustojen lataamiseen, kesämökkikäyttöön tai muuhun kevyempään energiantarpeeseen. Voimala voidaan myös liittää sopivan säätölaitteiston avulla valtakunnan sähköverkkoon.

Pientuulivoimalat voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin, vaaka- akselisiin ja pystyakselisiin voimaloihin. Perinteisissä potkurityyppisissä voimaloissa pyörimisliike perustuu aerodynaamiseen voimaan. Saman voiman ansiosta myös lentokoneet kykenevät nousemaan ilmaan. Potkurivoimaloita kutsutaan vaaka- akseliseksi voimaloiksi (HAWT, horizontal axis wind turbine). Pystyakselisessä voimalassa (VAWT vertical axis wind turbine), joka on toinen tuulivoimalatyypeistä, toiminta perustuu aerodynaamiseen voimaan, tuulen työntävään voimaan tai molempien yhteisvaikutukseen. /6/

Hyötysuhdetta ja kustannustehokkuutta ajatellen vaaka- akselinen tuulivoimala on parempi, koska potkurin avulla saadaan mahdollisimman suuri ilmavirtauksen pinta- ala tuulta vasten. Pystyakseliset voimalat tarvitsevat enemmän tuulta tuottaakseen saman verran tehoa potkurikäyttöiseen voimalaan verrattuna, joten niiden hyötysuhde on pienempi. Pystyakselisten voimaloiden hyvänä puolena on se, että ne eivät ole kovin herkkiä ilman pyörteille, eli turbulensseille. /6/



Kuva 1. Pientuulivoimajärjestelmän osat. /6/

2.3 Pientuulivoimalan generaattori

Pientuulivoimaloissa ei yleensä käytetä vaihteistoa, koska se laskisi liian paljon hyötysuhdetta voimalan kokoon suhteutettuna. Vaihdelaatikko tekisi voimalasta myös liian painavan ja sen vaatima huollon tarve tekisi laitteesta epäkäytännöllisi-

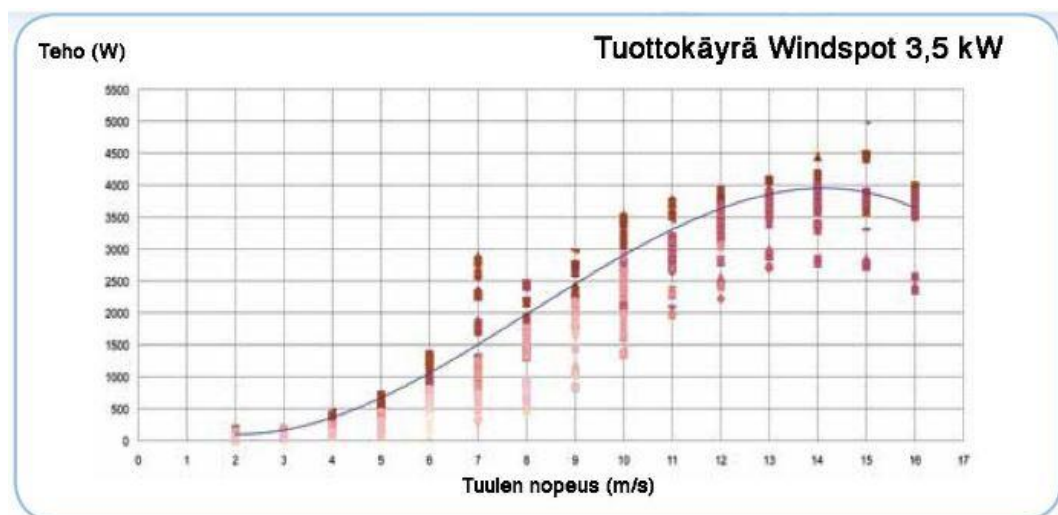
sen. Roottorin akseli on kytketty suoraan generaattoriin, joten sekä siipien että generaattorin pyörimisnopeus on sama. Pientuulivoimaloissa käytetään yleensä kes-
tomagneettigeneraattoreita. Tuottavuuteen voidaan vaikuttaa joko käyttämällä
erittäin voimakkaita magneetteja, tai pyörittämällä generaattoria hyvin suurella
nopeudella. /6/

Jos esimerkiksi 3 kW:n tuulivoimala pyörii 300 1/ min, on pyörimisnopeus hyvin
suuri mikä tarkoittaa, että generaattorissa on käytetty heikkoja magneetteja. Kor-
kean pyörimisnopeuden saavuttamiseksi vaaditaan kovia tuulia, joten tämänkal-
tainen tuulivoimala sopii parhaiten rannikko- olosuhteisiin. Korkea pyörimisno-
peus rasittaa voimalan rakenteita, ja voi vaikuttaa pitkällä tähtäimellä sen kestä-
vyyteen. Generaattorin pyörimisherkkyyks on tärkeä seikka varsinkin heikolla tuu-
lilla. Pyörimisherkkyyttä voidaan parantaa hyvin laakeroidulla generaattorilla,
sekä roottorin painolla suhteessa magneettien voimakkuuteen. /6/

2.4 Siipien vaikutus tehoon

Tuulivoimalan siipien suunnittelu on haasteellinen tehtävä, koska siipien on toi-
mittava monilla eri pyörimisnopeuksilla ja tuulennopeuksilla. Pääsääntöisesti
voimalan tehoon vaikuttaa roottorin koko. Vaaka- akselisen voimalan siipien pin-
ta- alan kaksinkertaistuesssa niiden tuulesta tehoa ottava pinta- ala nelinkertaistuu.
Potkurivoimaloissa siipien pinta- ala lasketaan kaavalla $\pi \cdot r^2$, jossa r on siiven pi-
tuus. /6/

Tuulivoimalan hankkimisvaiheessa voidaan vertailla eri voimalatyypin sähkön-
tuottokykyä valmistajan ilmoittamalla tuottokäyrällä. Tuottokäyrä kertoo, minkä
verran generaattori tuottaa sähköä milläkin tuulennopeudella. Tuulivoimalat myy-
dään nimellistehon mukaan, ja tuottokäyrästä selviää, onko nimellisteho ilmoitettu
matalan vai korkean tuulennopeuden mukaan. /6/



Kuva 2. Winspot-merkkisen pientuulivoimalan tuottokäyrä. /6/

Kuvassa 2 on esimerkki 3,5 kW:n Windspot-merkkisen tuulivoimalan tuottokäyrästä. Suomessa tuulennopeudet ovat yleisimmillään 4–6 m/s. Jos nimellistehon arvo on ilmoitettu tuulen nopeuden ollessa esimerkiksi 8 m/s, on se todennukaisempi arvo kuin esimerkiksi 12 m/s tuulella mitattu arvo, joka on voimakasta myrskytuulta. /6/

2.5 Energian syöttäminen verkkoon pientuulivoimalla

Pientuulivoimalan tuottama sähkö voidaan muuttaa verkkoinvertterin ja tasasuuntaajan avulla normaaliksi yksivaiheiseksi 230V verkkosähköksi. Verkkoinvertteri toimii siten, että se tunnistaa sähköyhtiöltä tulevan sähkön taajuuden ja syöttää sen rinnalle tuulivoimalan tuottaman sähkön. Verkkoinvertteri on kytketty kiinteistön sähköpääkeskukseen. Jos tuulivoimalan tuottama sähkö ei riitä esimerkiksi kiinteistön tarpeisiin, otetaan tarvittava osuus sähköverkosta. Jos tilanne on päinvastoin, eli jos voimala tuottaa enemmän mitä kiinteistön sähkön kulutus sillä hetkellä on, siirtyy ylimääräinen tuotettu sähkö suoraan verkkoon. Pientuulivoimalla tuotetusta ylijäämästä ei saa Suomessa kuitenkaan ainakaan toistaiseksi korvausta sähköyhtiöltä. /6/

3 VAIHTOSÄHKÖGENERAATTORIT

3.1 Yleistä

Sähkökone on nimitys generaattoreille ja sähkömoottoreille. Sähkökone on tavallaan kaksitoiminen laite siten, että moottoria voidaan yleensä käyttää generaattorina ja generaattoria moottorina. Erityyppiset generaattorit eroavat toiminnaltaan toisistaan, ja eri käyttötarkoituksiin on suunniteltu tietynlaiset generaattorityypit. Generaattori muuntaa sähkömagneettisen induktion avulla mekaanisen energian sähköenergiaksi. Esimerkiksi tuulivoimaloissa mekaaninen energia saadaan tuulen pyörittämältä roottorilta, ja muissa voimalaitostyypeissä esimerkiksi höyryn tai veden pyörittämältä turbiinilta. Generaattorin pääosat ovat paikallaan oleva staattori ja pyörivä roottori. Generaattorityypistä riippuu, kuinka osat on magnetoitu, ja muodostuuko käyttövirta staattorilla vai roottorilla. Pyörivät käämit, joissa kulkee tasavirta tahtikoneessa, synnyttävät magneettikentän, joka vaihtelee pyörimistajuuden mukaan staattorikäämityksessä. Muuttuvassa magneettikentässä staattorikäämitykseen indusoituu vaihtojännite, ja magneettivuo kulkee ilmapälin kautta staattorista roottoriin ja takaisin. /5/

3.2 Tahtigeneraattori

Generaattorin staattori ja roottori sisältävät molemmat magneettikentän lähteen. Roottori pyörii, ja staattori pysyy paikallaan. Herätemagneettikenttä synnytetään kenttäämeillä, jotka sijaitsevat pyörivässä roottorissa. Ankkurikäämitys sijaitsee staattorissa, josta siihen indusoitunut sähköenergia otetaan käyttöön. Ankkurikäämitys voi kuitenkin sijaita myös roottorissa, jolloin vastaavasti kenttäämit kulkevat staattorissa. Tahtigeneraattorissa kenttäämeille syötetään tasavirtaa, joka synnyttää ajan suhteen muuttuvan magneettikentän roottorin ja staattorin välille. Sähkövirta siirretään pyörivälle roottorille yleensä liukurenkaiden tai hiiliharjojen välityksellä. /5/

Staattorin rautaosat koostuvat staattoriselästä ja -hampaista. Rautaosat kootaan siten, että lieriön muotoiseksi kappaleeksi ladotaan päällekkäin uritettuja segmenttilevyjä. Koska staattorissa kulkee vaihtovirta, on staattorin rautaosat tehtävä levy-

rakenteisena pyörrevirtahäviöiden pienentämiseksi. Varsinkin suurissa generaattoreissa staattoriin tehdään ilmasolia lämmön pois kuljettamiseksi koneesta ilman välityksellä. Staattorikäänitys sijoitetaan staattorihampaiden väliin jääviin uriin. /4/

Konetta sanotaan tahtigeneraattoriksi siksi, koska sähköinen taajuus on synkronoitu mekaaniseen pyörimisliikkeeseen. Kun generaattorin napalukua kasvatetaan, sähköinen taajuus kasvaa mekaaniseen taajuuteen nähden. Oleellisinta tahtigeneraattorin toiminnassa on se, että sen mekaaninen pyörimisliike ja sähköinen taajuus ovat synkronoidut. Kun tahtigeneraattorin roottori pyörähtää yhden kierroksen, sinimuotoista jännitettä syntyy yhtä monta jaksoa, kuin on napaparien lukumäärä generaattorissa. /5/

3.3 Kestomagneettigeneraattori

Yksi tahtigeneraattorityypeistä on kestopagneettigeneraattori. Se eroaa rakenteellisesti vierasmagnetoiduista tahtigeneraattoreista siten, että kenttä- käänitys on korvattu kestopagneeteilla. Generaattorin rakenne on tahtigeneraattoria yksinkertaisempi, sillä roottoriin ei tarvitse syöttää sähkövirtaa. Kestomagneettigeneraattorin valmistuskustannukset ovat huomattavasti korkeammat magneettien korkean hinnan vuoksi. Kestomagneettigeneraattoreita käytetään kuitenkin yleisesti esimerkiksi nykyaikaisissa suurenkin kokoluokan tuulivoimalaitoksissa. /5/

Kestomagneettikoneen erityisenä etuna on tahtikoneeseen verrattuna suuri hyötysuhde ja korkea vääntömomenttitiheys. Nykyisin käytettävät parhaimmat kestopagneettimateriaalit ovat melko reagoimattomia ulkoisille magneettikentän voimakkuuksille ja esimerkiksi ilmvälän vaikutukselle. Neo-magneetit ovat melko herkkiä lämpötilan vaikutuksille, koska koersiivivoima putoaa merkittävästi lämpötilan kohotessa. Neo-magneetteja voidaan nykyisten ominaisuuksiensa vuoksi käyttää kestopagneetti- tahtikoneissa. /3/

3.4 Epätahtigeneraattori

Epätahtikone eroaa periaatteellisesti tahtikoneesta kahdella tavalla. Epätahtikoneessa roottorikäänit ovat oikosuljetut, ja sekä staattori- että roottorikäänneissä

kulkee vaihtovirta. Epätahtikonetta kutsutaan myös oikosulkukoneeksi oikosuljetujen roottorikäämien vuoksi. Staattorikäämitys on lähtökohtaisesti samanlainen kuin vierasmagnetoidussa tahtikoneessa, mutta roottorin rakenne on erilainen. Tahtikoneen roottorikäämeissä kulkee tasavirta, joka johdetaan sinne yleensä liukurenkaiden tai hiiliharjojen välityksellä. Epätahtikoneessa ei ole tarpeen siirtää sähkövirtaa staattorin ja roottorin välillä, mikä tekee epätahtikoneen rakenteesta yksinkertaisemman. Staattorikäämeihin syötetty sinimuotoinen vaihtovirta synnyttää ajan suhteen muuttuvan magneettikentän, joka roottorikäämeihin kohdistuessaan indusoi niihin jännitteen. Roottorikäämien oikosulkeminen aiheuttaa sen, että niissä alkaa kulkea vaihtovirta. Oikosulkukone, epätahtikone ja induktiokone ovat nimityksiä samalle laitteelle. Kone voi toimia sekä moottorina että generaattorina. Suurin osa markkinoilla olevista ja teollisuudessa käytetyistä 3-vaiheisista sähkömoottoreista on oikosulkumoottoreita. Sana ”oikosulku” tulee nimenomaan oikosuljetuista roottorikäämeistä, oli kyseessä sitten moottori tai generaattori. /5/

Epätahtikoneen toiminta perustuu staattori- ja roottorikäämien väliseen vuorovaiikutukseen. Staattori- ja roottorikäämien sinimuotoisten magneettikenttien välillä on oltava vaihe- eroa, jotta koneen toiminnalle oleellinen vääntömomentti syntyy. Tämä tarkoittaa, että mekaaninen vääntömomentti edellyttää epätahtia staattorin ja roottorin välillä. Epätahdin suunta määrää sen, käytetäänkö konetta moottorina vai generaattorina. Epätahtikone muuntaa mekaanista energiaa sähköenergiaksi, jos roottoria pyöritetään hiukan tahtinopeutta suuremmalla nopeudella. Generaattori saa herätevirtansa staattorikäämeille syötetystä vaihtovirrasta, jonka seurauksena myös roottorikäämeissä alkaa kulkea sähkövirta. Kun roottoria pyöritetään hieman tahtinopeutta suuremmalla nopeudella, staattorikäämit alkavat tuottaa sähkötehoa. Roottorin pyörimisnopeuden täytyy olla generaattorina toimiessaan yli 3000 kierrosta minuutissa, jos herätevirran taajuus on 50 Hz. Vääntömomentti on seuraus epätahdistä. Staattorin ja roottorin välillä ei ole mekaanista vääntömomenttia, jos roottori pyörii tarkalleen herätevirran määräämällä tahtinopeudella. Roottorin pyöriessä tahtinopeutta hitaammin, kone toimii moottorina. Kun roottorin pyörimisnopeus sen sijaan on tahtinopeuden yläpuolella, muuntaa epätahtikoneen roottori mekaanista liike- energiaa sähköenergiaksi. Sähköenergia saadaan talteen staattorikäämien navoista. /5/

4 TASASÄHKÖGENERAATTORIT

4.1 Yleistä

Tasasähkögeneraattoreita käytetään tuulivoimakäytössä lähinnä pienemmän kokoluokan tuulivoimalaitoksissa. Generaattorityyppi on käytössä myös vanhemmissa ajoneuvoissa ja traktoreissa, mutta nykyään ajoneuvoissakin käytetään vaihtosähkögeneraattoreita, ja sähkö tasasuunnataan erillisellä diodisillalla.

4.2 Tasasähkögeneraattorin toimintaperiaate

Tasasähkögeneraattorin merkittävin ero vaihtosähkögeneraattoriin verrattuna on se, että se sisältää kommutaattorin, eli virrankäntimen. Kommutaattorilla tasasuunnataan ankkurikäämyksessä syntyvä vaihtojännite. Generaattorin rungossa olevat magneettinavat muodostavat magneettikentän. Ankkuri, jonka levypaketista muodostuvan rautasydämen urissa on paljon kuparilankakerroksia, pyörii rungossa olevien magneettinapojen magneettikentässä. Pyöriessään ankkurin ankkurikäämyksessä leikkaa magneettikentän voimaviivoja, ja käämykseen syntyy vaihtojännite. Vaihtojännite johdetaan pyörivälle kommutaattorille, joka muuttaa sen tasajännitteeksi. /2/

Generaattorin tuottaman tasajännitteen tasaisuus riippuu siitä, kuinka paljon johdinvyhtejä ankkurissa on. Mitä enemmän ankkurissa on johdinvyhtejä ja uria, sitä tasaisempaa jännitettä generaattori tuottaa. Jokaiselle johdinvyhdille on omat lamellinsa kommutaattorissa. /1/

4.3 Tasa- ja vaihtosähkögeneraattorien eroavaisuuksia

Merkittävimpiä eroja tasa- ja vaihtosähkögeneraattoria vertailtaessa ovat esimerkiksi, että tasasähkögeneraattorissa sähkön syntyminen tapahtuu pyörivässä ankkurissa, kun puolestaan vaihtosähkögeneraattorissa se tapahtuu paikallaan olevassa staattorissa. Vaihtosähkögeneraattorin magnetointikäämyksessä sijaitsee pyörivässä roottorissa, mutta tasasähkögeneraattorissa se on sijoitettu paikallaan olevaan naparunkoon. Tasasähkögeneraattori tasasuuntaa sähköä pyörivän kommutaattorin avulla, mutta vaihtosähkögeneraattorissa on käytettävä erillistä diodisiltaa. /2/

4.4 Tasasähkögeneraattorin haittapuolia

Tasasähkögeneraattorin kommutaattori rajoittaa generaattorin huippukierroslukua, koska kommutaattori ei toimi kunnolla hyvin suurilla kierrosnopeuksilla. Kommutaattori kuumenee myös voimakkaasti pyörimisnopeuden kasvaessa, ja lisäksi hiiliharjat kuluvat. Hiiliharjojen vaihtaminen aiheuttaa generaattorityypille suuremman huoltotarpeen vaihtosähkögeneraattoriin verrattuna. Etenkin ajoneuvo-käytössä, kun laturit olivat vielä tasasähkögeneraattoreita, on tyhjäkäynnin lataus-teho pienen pyörimisnopeuden vuoksi niin alhainen, ettei se saavuta välttämättä akun vaatimaa latausjännitettä. Sähkölaitteiden lisääntymisen aiheuttaman tehon-tarpeen, kaupunkiajon, kasvaneen pysähdysten määrän, ynnä muiden seikkojen johdosta tasasähkögeneraattori laturina korvattiin ajoneuvoissa vaihtosähkö-generaattorilla. /2/

5 KESTOMAGNEETTIGENERAATTORIN SUUNNITTELU

5.1 Lähtökohta

Lähtökohtana oli suunnitella mahdollisimman yksinkertainen kestromagneetti-generaattori. Tavoitteena oli saada rakennettua laite, joka tuottaa sähköä pyörivästä liikkeestä. Tässä vaiheessa ei ollut vielä merkitystä muilla yksityiskohdilla, kuten lopullisilla materiaalivalinnoilla, tai sillä miten esimerkiksi siivet tullaan kiinnittämään roottoriin tai miten generaattori kiinnitetään niin sanotun voimalaitoksen päärunkoon. On huomattava, että työn tarkoitus ei ollut rakentaa varsinaista verkkovirtaa tuottavaa voimalaitosta, vaan havainnollistaa pienessä mittakaavassa ilmiötä, jolla tuulella pyörivästä liikkeestä saadaan sähköä. Tämän takia laitteen maksimaalinen jännitteen tuotto tulisi jäädä alle 20 volttiin ja teho muutamiin watteihin. Käytännössä laitteen pyöriessä siihen voitaisiin kytkeä kaikenlaisia paristokäyttöisiä laitteita kuten esimerkiksi ledivalaistusta.

Generaattorin mitat ja koko olivat vapaasti valittavissani. Koska generaattorin käyttötarkoitus oli toimia vaihteettomassa välityksettömässä tuuliturbiinissa, oli huomioitava, että sen on pystyttävä tuottamaan sähköä melko pienellä pyörimisnopeudella. Generaattorin roottorin pyörimisnopeus olisi tässä tapauksessa siis sama kuin siipien pyörimisnopeus.

Koska kestromagneettien käyttäminen oli toiminnan edellytys, aloin vertailla muita laitteita ja ratkaisuja, jotka toimivat kyseisellä periaatteella. Merkittävin vastaavanlaisen pienoisingeneraattorin käyttökohde ovat polkupyörän dynamot. Viimeisen vuosikymmenen aikana kehitetty napadynamo on toiminnaltaan hyvin yksinkertainen, ja tuottaa suuren napalukunsa ansiosta sähköä pienellä pyörimisnopeudella polkupyörön vanteen pyörännavassa. Tämän keksinnön pohjalta aloin kehittää omaa prototyyppiäni. Tarvittiin teräskehikon sisällä oleva käämipakka, jota magneetit kiertävät. Mitä enemmän magneetteja, sitä suurempi napaluku ja ulkokehä. Napaluvun ollessa pieni tarvitaan puolestaan suurempi pyörimisnopeus jännitteen kasvattamiseksi.

6 GENERAATTORIN RAKENTAMINEN

6.1 Lähtöarvot

Suunnittelun mitoituksen aloittamiseksi oli hankittava sopivia magneetteja. Varaosaliikkeestä löytyi sopivia ja tehokkaita kooltaan 48x 21x 9 mm suorakaiteen muotoisia perusmagneetteja. Päätin että kaksikymmentä magneettia olisi sopiva määrä tällaisen prototyypin rakentamiseen, jolloin niistä pyöreään kehään aseteltaessa muodostui ulkohalkaisijaltaan noin 160 mm ympyrä. Magneetit tarvitsevat ympärilleen kuoren, jonka sisäkehälle ne liimataan. Kuori pyörii staattorilevyjen ja käämipakan ympärillä ja muodostaa roottorin. Staattori ja käämit pysyvät liikkumatta pyörivän kuoren sisällä. Magneettien mitoitusta lähtökohtana pitäen suunnittelin Siemens NX:llä ensin roottorin kuoren, josta tuli kulmikas ja pelkistetty versio tässä prototyypissä.

6.2 Kuoren suunnittelu ja valmistus

Kuoren suunnittelu alkoi sisäkehän mitoituksella. Käytin 3D-ohjelmaa apuna tämän tarkan mitan laskemisessa. Kuoren sisähalkaisijan oli oltava lähes sadasosamillimetrin tarkkuudella, jotta magneetit saa liimattua tiukasti vierekkäin eikä niiden väliin saa jäädä rakoja. Kuoren seinämän vahvuudeksi mitoitin 10 mm, jolloin roottorin ulkohalkaisija on 180 mm. Koska kyseessä on prototyyppi, ei kuoren valmistusmateriaali ja valmistusmenetelmä ollut aivan yksiselitteinen. Jos generaattorista olisi tehty esimerkiksi tuotannossa valmistettava ja myyntiin tuleva laite, olisi kuorikappale tietenkin ollut järkevää sorvata alumiinista, ja magneettien kiinnityksen jälkeen se pitäisi tietenkin vielä tasapainottaa. Alumiinista valmistettaessa kuorikappale olisi vaatinut todella suuren palan raaka-ainetta, joten pelkän raaka-aineen hankinnan ja koneistustöiden seurauksena siitä olisi tullut kohtuuttoman kallis osa.

Koska generaattori on vain testaustarkoituksiin käytettävä prototyyppi, päätettiin kuorikappale tehdä 3D-tulostimella, josko se tälläkin menetelmällä oli varsin suuri kappale tulostettavaksi. 3D-tulostamalla tehdyt muovikappaleet ovat yleensä hyvinkin pieniä, mutta useinkin rakenteellisesti hyvin monimutkaisia. Juuri esimer-

kiksi monimutkaisten tukirakenteiden valmistamiseksi koneenosissa, on 3D-tulostus erinomainen menetelmä. Kuorikappaleen tulostustyö onnistui Technobotnian 3D-tulostuksen laboratoriossa. Materiaalina tulostuksessa käytettiin PLA-muovilaatua. PLA eli Poly-lactic acid on edullinen monikäyttöinen lankatulostusmateriaali, josta on helppo tulostaa. Se on uusiutuvista raaka-aineista valmistettu biohajoava termoplastinen alifaattinen polyesteri. PLA on melko kovaa ja haurasta muovia, mutta kuitenkin työstettävissä esimerkiksi hiomalla.



Kuva 3. Roottori etupuolelta. Laakerit ovat jo paikallaan.

6.3 Magneettien kiinnitys kuorikappaleeseen

Kuorikappaleen valmistuttua tulostustarkkuuden voidaan katsoa olleen noin 0,05 mm - 0,1 mm. Laakeripesiä piti hiukan pyöräyttää hiomapaperilla, että halkaisijaltaan 20 mm laakerit sai painettua laakeripesiin. Mutkikkaampi juttu muodostui magneettien liimauksesta roottorikuoren sisäpuoliselle ulkokehälle. Kuten aiemmin mainitsin, mitoitin 3D-ohjelmalla millin sadasosan tarkkuudella koon kuorikappaleen sisähalkaisijalle, ja ympyrän piirin pituudelle. Piirin pituuden laskin

yksinkertaisesti siten, että laitoin ne 20 magneettia pöydälle, ja mittasin ”magneetitipötkön” kokonaispituuden. Magneetit eivät luonnollisesti olleet keskenään niin identtisiä, että niissä jokaisessa oli leveyssuunnassa jonkun verran heittoja millin kymmenesosan sisällä. Virheet tulostustarkkuudessa aiheuttivat kuitenkin sen, että sovittaessani magneetteja kuoren sisäkehälle, viimeinen magneetti ei mahtunut paikalleen vaan sen leveydestä oli hiottava pois arviolta noin 0,5 mm. Näin pieni asia ei tietenkään vaikuttanut toimintaan ja tällainen hajonta työstötarkkuudessa on aivan normaalia.



Kuva 4. Magneetit liimattuna roottorin sisäkehälle.

Magneetit kiinnitettiin kuoren sisäkehään liimaamalla siten, että apuvälinettä käyttäen levitin liimaa vain pienelle matkalle, ja liimasin neljä magneettia kerrallaan. Liimana käytettiin hartsimaiseksi kovettuvaa erittäin pitävää Loctiten valmistamaa Power Epoxy -pikaepoksiliimaa. Apuvälineenä viilapenkissä oli käytettävä lisäksi työtä varten valmistettua kuoren muotoa mukailevaa aputeräslevyä, johon magneetit tarttuivat, ja täten sain ne helposti kohdistettua syvyysuunnassa paikalleen. Itse liiman kovettumista odottaessa oli magneetteja painettava sen ai-

kaa kuorta vasten ihan vaan käsivoimin. Apuvälineistä huolimatta magneettien liimaaminen kuoren sisäkehälle oli erittäin haastava ja tuskallinen operaatio, koska sen oli onnistuttava ensimmäisellä kerralla eikä varaa virheisiin ollut.

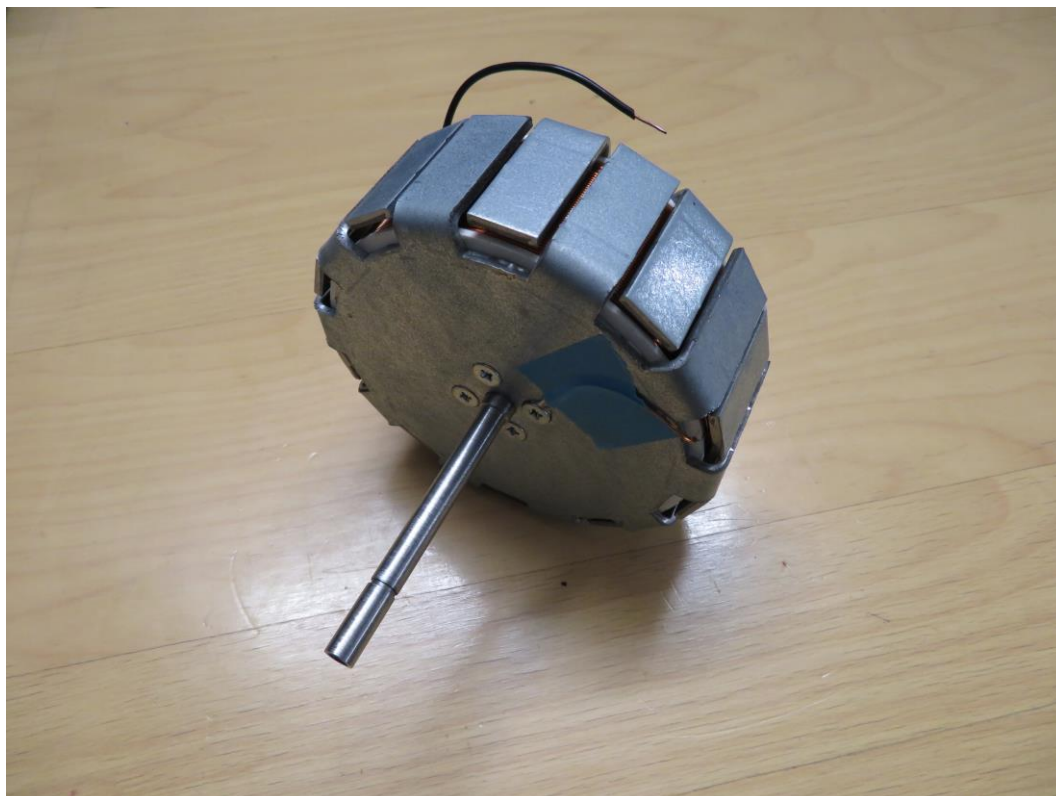
6.4 Staattorilevyt

Roottorin kuoren ja sen sisäkehälle liimattujen magneettien sisäpuolinen ympyrähalkaisija oli lähtökohta staattorin suunnittelulle ja valmistukselle. Staattorilevyjen koko puolestaan määrittää niiden sisäpuolelle jäävän tilavuuden, johon käämitys kierretään. Mallina käytin kuten koko generaattorin, myös staattorilevyjen suunnittelussa ja valmistuksessa polkupyörän napadynamo. Dynamossa napaluku tosin oli 28 napaa, eli 14 napaa molemmin puolin. Staattorilevyt puristetaan neljällä koneruuvilla akselirungon rautasydäntä vasten, jonka halkaisija on 40 mm ja jonka ympärille käämi tulee kiertää muovirullaan, joka toimii eristeenä. Koska ulkokehässä on 20 magneettia, täytyy staattoriraidoissa olla saman verran niin sanottuja piikkejä, joiden läheltä ohi kulkiessaan magneetit indusoivat staattoriraudan sisällä olevaan käämiin jännitteen. Staattorilevyt täytyy sijoittaa käämirullan molemmin puolin, jolloin yhdellä puolella on oltava tasaisin välein 10 piikkiä. Mitoitin magneettien muodostaman ympyrän sisähalkaisijaa apuna käyttäen staattoriraudan koon siten, että magneetin lappeen ohittaessa piikin uloimman kulman välystä jää staattorin ja magneetin väliin noin 2 mm. Staattorilevyt valmistetaan 3 mm kuumasinkitystä levyistä ohutlevymenetelmällä, ja piikit taivutetaan 90 asteen kulmaan niitä kiertävien magneettien suuntaisesti särmäämällä.

6.5 Akselirunko

Akselirungon suunnittelu tehtiin käytännössä samaan aikaan roottorin kuorikappaletta suunniteltaessa. Akselirunko on kappale, johon staattorilevyt, käämirulla sekä laakereiden varassa pyörivä roottori kiinnitetään, ja siten se pitää koko generaattorin kasassa. Akselirunko toimii samalla käämityksen rautasydämenä, jonka vuoksi sen staattorilevyjen välissä oleva keskikohta täytyy olla paksuudeltaan 39,4 mm. Jos rautasydäntä ei tarvittaisi, akselin paksuus olisi voinut olla kauttaaltaan 8 mm. Yksinkertaisessa prototyypissä rautasydän päätettiin tehdä yhtenäisestä kappaleesta, joka oli tässä tapauksessa helpoin ja nopein ratkaisu. Yhtenäinen

rautasydän aiheuttaa kuitenkin todennäköisesti jonkin verran jännitehäviöitä. Polkupyörän napadynamossa, jota käytin esimerkkinä prototyypini suunnittelussa, oli vastaava rautasydän valmistettu toisistaan eristetyistä ohuista rautalevyistä. Samaa periaatetta käytetään myös muuntajissa jännitehäviön pienentämiseksi.



Kuva 5. Staattorilevyt ja käämirulla kiinnitettynä akselirunkoon.

Kohtaan, jossa akselirunko on 39,4 mm paksu, on sen molemmin puolin kiinnitetty staattorilevyt neljällä 5 x 60 mm uppokantaisilla koneruuveilla. Ruuvien kannat piti upottaa etummaiseen staattorilevyyn, koska staattorilevyn ja roottorikuoren väliin ei jäänyt tilaa kuin 4 mm. Sydänkappaleen etupuolella on 79 mm pitkä halkaisijaltaan 8 mm akseli, jonka varassa roottori pyörii, ja takapuolella 13 mm pitkä halkaisijaltaan 10 mm paksu tappi, joka on tarkoitettu staattorilevyn keskittämiseen. Myös sydänkappaleen etupuolella on 7 mm pitkä ja halkaisijaltaan 10 mm oleva keskitystappi, jota vasten myöskin roottorin sisempi laakeri asettuu. Roottori on laakeroitu akselille 58 mm matkalta, jonka päähän on tehty 1 mm leveä ura roottorin laakerin lukitusrenkaalle. Ylimääräistä 8 mm akselitappia jää roottori-

kuoren ulkopuolelle 20 mm, joka oli hyvin tarpeellinen generaattoria kiinnitettäessä pyörityskoetta varten.

Akselirunko valmistettiin perinteisesti manuaalisorvilla osapiirustuksen mukaan. Sydänkappaleen halkaisijan olisi alkuperäisen piirustuksen mukaan pitänyt olla tasan 40 mm, mutta koska käämien eristerullan sydäntä vasten tuleva sisähalkaisija suunniteltiin luonnollisesti saman mitan mukaan, aiheutti 3D-tulostimella valmistetun eristerullan keskireiän epätarkkuus sen, että halkaisija oli pienennettävä 39,4 millimetriin. Lisäksi eristerullan keskireikä oli hieman kartio, mikä oli huomioitava sorvauksessa. Teräksisestä akselistä oli helpompi sorvata materiaalia pois, kuin suurentaa hiomalla hauraan 3D-tulostuskappaleen keskireikää.

Sorvaustyön jälkeen vielä porattiin halkaisijaltaan 5 mm reiät akselin sydänkappaleen läpi staattorilevyjen kiinnitystä varten.

6.6 Käämien eriste

Käämitys tarvitsi ympärilleen tietenkin eristeen teräksisistä staattorilevyistä ja akselin sydänkappaleesta. Koska sopivan kokoista valmista sähköä johtamattomasta muovista valmistettua rullaa ei tietenkään löytynyt, päätin teettää käämien eristerullan samoin kuten roottorin kuorikappaleenkin, PLA-muovista 3D-tulostamalla Technobotnian laboratoriossa. PLA on sähköä johtamaton muovilaatu, joten se soveltuu hyvin tarkoitukseen. Se saa olla myös täysin liikkumattomassa tilassa staattorilevyjen välissä, joten materiaalin kova ja hiukan hauras rakenne ei estä käyttöä kyseiseen tarkoitukseen. Muovista valetaan seinämäpaksuudeltaan 2 mm rullamainen kappale, jonka sisäreiän halkaisija on suunniteltu olemaan 40 mm. Käämirullan ulkoreunojen halkaisija on 120 mm, joten siihen mahtuu 0,8 mm käämilankaa 38 mm paksuudelta. Käämirullan kokonaishalkaisija määräytyi staattorilevyjen koon perusteella. Käämiä kierrettiin staattorilevyjen väliin mahdollisimman paksu kerros, eli käytännössä siihen asti, mitä staattorilevyjen piikit taituvat magneettien suuntaisesti.

6.7 Käämintä

Käämilangan paksuudeksi on valittu 0,8 mm. Pyöreään muovirullaan porataan molemmille puolille noin 1,5 mm reikä siten, että toinen reikä on käämittävän rullan takapuolella sisimmäisellä kehällä, eli 2 mm rautasydämen yläpuolella. Tästä reiästä ulos tulevaan käämiin laitetaan eristeeksi sähköjohdon kuorta tai kutistesukkaa, joka ulottuu käämirullan seinämän läpi rullan sisäpuolelle vielä noin 10 mm. Rullan takapuolelta sisimmäiseltä kehältä ulostulevaan käämiin tinataan jatkoksi noin 1–1,5 mm² sähköjohto, ja jatkospaikka eristetään kutistesukalla. Vaikka käämilanka on eristetty käämilakalla, on se hyvä lisäeristää sellaisissa käyttöolosuhteissa, joissa sitä joutuu käsittelemään tai se hankautuu jotain pintaa vasten. Toinen reikä tehdään käämirullan etupuolelle, aivan rullan ulkokehälle, josta käämin pää maadoitetaan kaapelikenkää apuna käyttäen akselirungon pulttiin. Generaattorin tuottama sähkö mitataan nimenomaan käämirullan takapuolen sisimmäiseltä kehältä ulostulevan käämin, ja generaattorin rungon väliltä.

Käämintä pitää tehdä huolellisesti järjestyksessä siten, että käämilanka asettuu aina edellisen kierroksen viereen, ja se on pystyttävä pitämään koko ajan kireällä. Kiersin käämin myötäpäivään, eli samaan suuntaan pyörimissuuntaan nähden. Kiertosuunnalla ei kuitenkaan ole testaukseen perustuen toiminnallista merkitystä, sillä generaattori tuottaa sähköä pyöriessään sekä myötä- että vastapäivään.

Käämintä oli täysin käsityötä, ja sen onnistumiseksi tarvittiin kaksi apuvälinettä. Rullalle, josta käämilankaa kierretään varsinaiselle generaattorin muovirullalle, täytyi tehdä pöytään teline, jossa se pääsi vain mahdollisimman kankeasti pyörimään. Tämä sen takia että lanka pysyi koko ajan kireällä. Itse käämittävä muovirulla täytyi pitää omissa käsissä ja käämi täytyi sormin ohjata rullalle järjestykseen. Muovirulla vaati kuitenkin työn ajaksi 3 mm teräslevystä valmistetut tuet molemmin puolin, jotta käämi ei kiristyessään ala levittää heikkotekoista kahden millimetrin muoviseinämää, ja jottei kokoonpanon mitoitus näin menisi pieleen. Rulla oli myös helpompi pitää käsissä apuvälineen ansiosta.

Käämilankaa täytyi myös jatkaa kaksi kertaa, koska myynnissä ei ollut suurempia käämirullia. Käämilanka on päällystetty lakalla, joka piti huomioida jatkopaikkaa

tehdessä. Ensiksi jatkettavien käämien päät oli karhennettava hienoisella hiomapaperilla noin 15 mm matkalta, jonka jälkeen päät litistettiin vasaralla lyömällä. Tämä siksi, ettei jatkopaikka tinauksessa kasvaisi muuta käämiä kovin paljoa suuremmaksi, mikä voisi häiritä virran kulkua. Litistetyt käämien päät tinattiin yhteen, ja mahdolliset epätasaisuudet hiottiin tasaiseksi. Lopuksi jatkopaikkaan suihkutettiin käämilakkaa, jota käytetään myös piirilevyissä. 0,8 millin käämilankaa mahtuu rullaan arviolta noin 500 metriä, koska valmistaja ilmoittaa yhdessä rullassa olevan 220 m. Yhteensä käämilankaa tarvittiin noin kaksi ja puoli rullaa.



Kuva 6. Kääminnässä käytetty apuväline.

6.8 Prototyypin kokoaminen

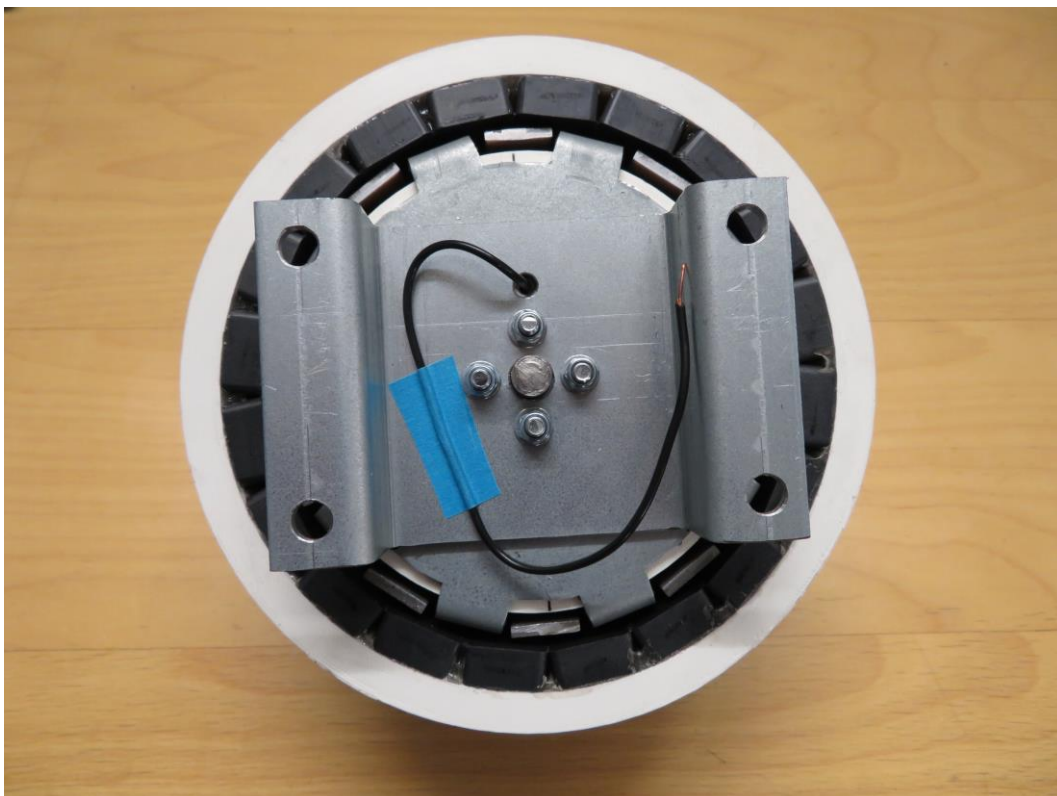
Generaattorin kokoaminen oli varsin yksinkertainen operaatio, mikä oli tarkoituksinkin tätä prototyyppiä suunniteltaessa. Komponenttien liittäminen toisiinsa tehdään neljällä uppokantaisella M5x 60 mm koneruuvilla sekä lukkomuttereilla. Koonpano on hyvin yksinkertainen: Staattorilevyt kiinnitetään akselirungon sydämkappaleen molemmin puolin siten, että M5x 60 mm koneruuvit lävistävät ko-

ko sydänkappaleen. Vaihtoehtoisesti sydänkappaleeseen olisi voitu molemmin puolin porata neljä kierrereikää, jolloin olisi voitu käyttää lyhyempiä ruuveja. Tämä olisi kuitenkin lisännyt epätarkkuutta reikien paikoituksessa, mikä olisi vaikuttanut staattorilevyjen piikkien asemoinnissa kohdalleen. Oli siis helpompi porata ainoastaan neljä reikää koko sydänkappaleen läpi, mikä helpotti staattorilevyjen paikalleen asennusta. M5x 60 mm uppokantaiset koneruuvit ovat melko harvinaisia pitkän pituutensa vuoksi. Ruuvien kannat oli pakko upottaa etupuolen staattorilevyyn, koska tilaa staattorilevyn ja pyörivän roottorikuoren väliin ei jäänyt kuin 4 mm, jolloin normaali kuusiokolopultin kanta ei olisi mahtunut olemaan tilassaan.

Merkittävä haaste kokoamistyössä muodostui täyteen käämitystä muovirullasta. Muovirulla oli täyteen käämittyinä valmiina aputelineessä, josta kappaleessa 4.7 mainittiin. Rulla oli kiristetty tiukasti kahden 3 mm levyn väliin, jotka oli kiristetty toisiinsa keskiakselinsa M-12-muttereilla. Muovirullan rautasydäntä vasten oleva sisähalkaisija oli myös 3D-tulostuksen seurauksena hiukan kartio, mikä oli huomioitu akselirungon sydäntä sorvatessa. Muovirulla oli asennettava ensimmäiseksi akselirungon sydänosan päälle, ja kartiomaisuuden vuoksi sen pystyi painamaan paikoilleen ainoastaan akselin toiselta puolelta. Tämän jälkeen staattorilevyt voitiin kiristää käämirullan molemmin puolin, mikä piti lopullisesti käämirullan kasassa. Irrottaessani käämirullaa apuvälinetelineestä, käämin kireydestä johtuen alkoi rulla puristuksesta vapauduttuaan välittömästi laajenemaan leveys-suunnassa. Oli toimittava todella nopeasti; ensiksi rullan työntäminen akselirungon sydänosan päälle, jonka jälkeen ripeästi staattorilevyjen asennus akselirungon molemmin puolin ja neljän M-5-ruuvien muttereiden kiristys. Rulla ei kuitenkaan päässyt liikaa laajenemaan, eikä käämitys mennyt epäjärjestykseen, joten käämirulla asettui paikoilleen staattorilevyjen väliin ruuvien kiristämisen jälkeen. Käämin pää maadoitettiin staattorin etupuolen staattorilevyn kiinnitysruuvien kannan alle kaapelikengällä. Staattorilevyjen piikkien ilmaväli oli säädettävä tarkoin samansuuruiseksi ennen ruuvien kiristämistä.

Kun staattori oli kokonaan kasattu, voitiin liittää roottori paikoilleen. Ulkohalkaisijaltaan 22 mm laakerit painettiin ensiksi roottorikuoren laakeripesiin. Tämän

jälkeen roottori työnnettiin paikoilleen akselirungon 8 mm akseliin ja lukkorengas kiinnitettiin paikoilleen. Työ ei ollut aivan helppo sillä magneetit vetivät kovasti staattoria puoleensa. Vasta kun roottorin ulomman laakeri oli työnnetty akseliin, alkoi se pysyä paikoillaan, eikä roottoriin jäänyt liikaa välystä.



Kuva 7. Valmiiksi koottu generaattori takapuolelta.

7 PROTOTYYPIN TOIMINNAN TESTAUS

7.1 Testauksen suunnittelu

Generaattori vaati testausten ja pyörittämissä kannalta melko massiiviset apurakenteet, joiden avulla sen pyörittämisestä tuli ylipäättään mahdollista. Apulaitteiden ja -rakenteiden tarkempaa suunnittelua ei ole käsitelty tässä projektissa, mutta niiden rakentamisen fyysisen työn määrästä muodostui melko iso osa tätä opinnäytetyötä. Apurakenteista ei ole olemassa esimerkiksi virallisia piirustuksia, vaan ne ovat valmistettu käsityönä.

Kuten aiemmin on kerrottu, ei roottorikuoreen ole suunniteltu minkäänlaisia kiinnitysmahdollisuuksia siipien kiinnitykselle, ja jos näin olisi, kuoren ulkomuodon olisi pitänyt olla täysin erilainen. Myöskin staattorin kiinnitystä runkoon olisi pitänyt vielä jatkojalostaa, mikäli generaattorista olisi valmistettu varsinainen tuuli-voimalaitos ja voimanlähteenä olisi hyödynnetty tuulienergiaa. Lisäksi testauksessa oli oltava tarkasti tietoinen generaattorin pyörimisnopeudesta tietyillä ajanhetkillä, mikä ei olisi onnistunut tuulen ollessa voimanlähteenä.

7.2 Generaattorin pyörittystapa

Paras keino generaattorin pyörittämiseen oli tietenkin normaali oikosulkumoottori taajuusmuuttajalla ohjattuna. Koska generaattorissa on 20 magneettia eli se on 20 – napainen, sen pyörimisnopeuden voidaan katsoa olemaan melko alhainen tuulikäytössä suuren napaluvun ansiosta. Oikosulkumoottorin ja generaattorin välille oli laitettava riittävästi välitystä, ja voimansiirtoon moottorilta generaattorille käytettiin kiilaurahihnaa. Testauksessa generaattorin pyörimisnopeutta olisi tarkoitus nostaa 0–500 1/ min nostaessa pyörimisnopeutta 50 1/ min kerrallaan. 500 1/ min pyörimisnopeus olisi tuulivoimakäytössä jo liiankin kova pyörimisvauhti ottaen huomioon siipien kärkien kehänopeuden. Lisäksi oli ehdottomasti huomioitava prototyypin PLA-muovista 3D-tulostamalla valmistettu roottorin kuori, joka ei luonnollisestikaan kestä yhtä kovia pyörimisnopeuksia kuin jos kyseinen kappale olisi valmistettu koneistamalla esimerkiksi alumiinista.

Generaattorin kuoren ulompaan päähän, johon myös siivet tulisi tositarkoituksessa asentaa, oli asennettava kiilahihnapyörä. Generaattorin päähän hankittiin jakohalkaisijaltaan 160 mm, ja moottorin akselille 80 mm kiilahihnapyörät, koska alun perin suunnittelin käyttäväni pyörikykseen 4 kilowatin 4-napaista oikosulkumoottoria välityssuhteen ollessa 2/1. Tällöin moottorin pyörimisnopeus olisi generaattoriin verrattuna kaksinkertainen. Se olisi kuitenkin ollut liian pieni välityssuhde ja moottorin ohjaaminen taajuusmuuttajalla niin matalilla kierroksilla olisi ollut hankalaa. Moottorin akselille ei liioin olisi sopinut enää pienempi hihnapyörä, ja puolestaan generaattorin hihnapyörän halkaisija ei olisi lisääntyvän painon takia voinut olla suurempi kuin 160 mm.

Päädyin käyttämään generaattorissa jakohalkaisijaltaan 160 mm XPA-profiilin kiilahihnalle tarkoitettua pyörää. Kiilahihnapyörän keskireikä täytyi sorvata suuremmaksi ja hihnapyörän ja kuorikappaleen välille oli sorvattava sovitinholkki, jolla voima saatiin välitettyä hihnapyörältä roottorille. Kiilahihnapyörä on hitsattu kiinni sovitinholkkiin, joka puolestaan on puristettu kolmella M6-kuusiokoloruuvilla kiinni roottorin kuorikappaleeseen.

Välityssuhdetta oli pakko nostaa, jotta generaattorista saatiin mittaustietoa myös matalilla mittauskierroksilla ja että käyttömoottorin pyörimisnopeus olisi saatu pidettyä kohtuullisena. Ongelma ratkesi kulmavaihteen avulla, jonka välityssuhde on 7/1 eli vetomoottorin pyörimisnopeus on seitsemän kertaa suurempi kuin generaattorin. Tällöin kulmavaihteen vetoakselissa oli käytettävä jakohalkaisijaltaan samaa 160 mm kiilahihnapyörää.

7.3 Pyörimisnopeuden säätö

Kulmavaihteena käytetään Hydromec-merkkistä kulmavaihdetta ja käyttömoottorina kulmavaihteeseen integroitua 0,37 kW:n oikosulkumoottoria. Moottoria käytetään Vacon NXS-sarjan taajuusmuuttajalla ja pyörimisnopeutta voidaan portaattomasti säätää Vacon NC Drive-ohjelmistolla kytkemällä taajuusmuuttaja tietokoneeseen. NC Drive-ohjelmisto näyttää tarkasti pyöritettävän moottorin pyörimisnopeuden, virran tai minkä tahansa muun parametrin moottorista, mitä halutaan tarkastella. Pyörimisnopeutta ei voi kuitenkaan ohjelmassakaan suoraan mää-

ritellä, vaan se täytyy tehdä prosenttia nostamalla tai vähentämällä. Kun moottorille säädetään esimerkiksi pyörimisnopeus 1050 1/ min, on generaattorin todellinen pyörimisnopeus tällöin tästä seitsemäsosa eli 150 1/ min.

7.4 Kiinnitysrakenteet

Generaattori ja kulmavaihdemoottori piti kiinnittää jonkinlaiseen alustaan pyörityskokeen ajaksi. Kiilahihnapyörät ja käytössä oleva 1500 mm pitkä kiilahihna määrittivät generaattorin ja kulmavaihteen vetopyörän akselikeskipisteiden väliksi noin 475 mm. Generaattori ja kulmavaihdemoottori piti ankkuroida lujasti johonkin alustaan ja generaattorin akselin oli kestettävä myös kiilahihnan kiristyksen aiheuttama vetojännitys. Apurakenteiden kaikki osat on valmistettu 3 mm paksuisesta sinkitystä teräspellistä, ja osien jäykisteet on tehty särmäämällä. Mitään apurakenteiden osia ei alusta pitäen suunniteltu käyttötarkoitustaan varten, vaan ne muokattiin valmiiksi särmätyistä osista. Alustaksi generaattorin ja moottorin kiinnittämiseksi valitsin 1100 mm pitkän, 295 mm leveän ja 70 mm korkean 3 mm kuumasinkitystä pellistä särmätyn palkin.

7.4.1 Generaattorin kiinnitys alustaan

Kuten jo aiemmin on todettu, piti jo generaattorin kokoamisvaiheessa huomioida sen tukeva kiinnitystapa pyörityskoetta varten. Staattorin ainoa luonnollinen kiinnityspiste olivat neljä 5 mm pulttia, joilla staattorilevyt on puristettu yhteen ja jotka pitävät käämipakan paikoillaan eristemuovirullan välissä. Ulommaiseen staattorilevyyn oli kiinnitettävä erillinen sovitinkappale, jonka avulla se saatiin kiinnitettyä vertikaalisesti kyljellään olevaan 3 mm pellistä särmättyyn U-palkkiin, joka oli puolestaan pultattu kiinni alustapalkkiin. U-palkki oli muuhun käyttötarkoitukseen alun perin suunniteltu valmiiksi uritettu osa, jota päätin hyödyntää kiinnityksessä. Urat mahdollistivat säädettävyyden, vaikka olivatkin 13 mm leveitä ja M-12-pultille tarkoitettuja. Palkin avulla mahdollistettiin horisontaalinen säädettävyys, jota tarvittiin akselin toisen puolen eli kuoren pään ja johon kiilahihnapyörä oli asennettu, kiinnityksessä.

Generaattorin molemmille puolille asennettiin samanlaiset uritetut 390 mm pitkät, 150 mm korkeat ja 50 mm syvät U-palkit, ja ne kiinnitettiin alustapalkkiin kolmella M-12-pultilla.

Kiilahihnan kiristys aiheuttaa akselirunkoon suuren vääntörasituksen staattorin kiinnityspisteisiin nähden. Lisäksi raskaan roottorikuoren pyöriminen rasittaa akselia, joten se täytyi tukea myös etupuolelta eli roottorin puolelta. Akselirunko ylettyy 20 mm roottorikuoren laakerin sokan ulkopuolelle. Akseli tuettiin V-mallisella kiristimellä, joita käytetään kiinteiden kappaleiden kiinnittämiseen pyöreää pintaa vasten kaikissa mekaniikan sovelluksissa. Kiristimen ja U-palkin välille tarvittiin säädettävä kappale, jolla akseli saatiin kiinnitettyä U-palkkiin. Sovitinpala valmistettiin samasta palkista, mistä myös staattoriraudan pidike oli tehty.



Kuva 8. Generaattori kiinnitettynä "testauspenkkiin".

7.4.2 Kulmavaihdemoottorin kiinnitys alustaan

Koska itse generaattori oli kiinnitetty alustaan liikkumattomaksi, täytyi kiilahihnan kiristyssäätö huomioida kulmavaihdemoottorin kiinnityksessä alustapalkkiin. Kiinnitys tehtiin kahdella 3 mm pelistä särmätystä U-muotoisesta profiilista tehdyllä palkilla, jotka kiinnitettiin kulmavaihteen molemmin puolin sen tehdastekoiisiin kiinnityspisteisiin M8-pulteilla. Profiilien alapuolelle leikattiin 12,5 mm leveät ja 50 mm pitkät hahlot, jotka mahdollistivat kulmavaihteen liikuteltavuuden hihnan kiristyssuunnassa, ja näin ollen mahdollistivat hihnan kiristyksen. Kulmavaihteen kiinnitys alustaan tehtiin neljällä M-12-pultilla.

7.5 Generaattorin pyörityskoe

Kun hihna oli kiristetty generaattorin ja kulmavaihdemoottorin kiilahihnapyörien välille ja kaikki osat olivat paikallaan, voitiin varsinainen pyörityskoe suorittaa. Generaattoria pyöritettiin kymmenellä eri nopeudella 50 1/ min- 500 1/ min nostuen nopeutta 50 1/ min kerrallaan. Ensimmäinen testauksessa mitattiin pelkkä jännite kuormittamattomasta generaattorista. Mittaustulokset ilmenevät taulukoista 1, 2 ja 3.

8 MITTAUSTULOKSET

8.1 Mittaustulokset

Taulukossa 1 on esitetty generaattorin tuottama jännite ilman kuormaa kymmenellä eri pyörimisnopeudella.

Taulukko 1. Generaattorin tuottama jännite ilman kuormaa.

Generaattorin pyörimisnopeus 1/min	Jännite V
50	39,5
100	62,4
150	79,7
200	94,4
250	106,8
300	118,0
350	128,2
400	137,8
450	146,6
500	154,8

Seuraavassa taulukossa on mitattu kymmenellä eri pyörimisnopeudella generaattorin tuottama jännite ja virtapiirissä kulkeva virta käytettäessä kuormana 74Ω vastusta. Viimeisessä sarakkeessa on laskettu generaattorin tuottama teho.

Taulukko 2. Generaattorin tuottama jännite, virta ja teho 74Ω kuormalla.

Generaattorin pyörimisnopeus 1/ min	Jännite V	Virta I/ mA	Teho P/ W
50	6,1	92	0,56
100	6,56	95,8	0,63
150	6,77	98	0,66
200	6,92	99,5	0,69
250	7,0	100,5	0,70
300	7,08	101,3	0,72
350	7,12	101,9	0,73
400	7,16	102,4	0,73
450	7,19	102,7	0,74
500	7,21	102,9	0,74

Taulukon lukuarvoista voidaan havaita, että jännitteen ja virran muutokset ovat melko pieniä pyörimisnopeuteen verrattuna. Viimeinen mittaus tehtiin samalla tavalla, mutta nyt kuormana käytettiin 230V 40W:n hehkulamppua, jonka resistanssi mittarilla mitattuna on $112,5 \Omega$.

Taulukko 3. Generaattorin tuottama jännite, virta ja teho, kun kuormana on 40W:n hehkulamppu.

Generaattorin pyörimisnopeus 1/ min	Jännite V	Virta I/ mA	Teho P/ W
50	18,5	69,0	1,28
100	25,1	74,6	1,87
150	28,9	77,3	2,23
200	31,7	79,3	2,51
250	33,66	80,6	2,71
300	35,36	81,6	2,89
350	36,74	82,5	3,03
400	37,88	83,2	3,15
450	38,78	83,8	3,25
500	39,56	84,3	3,33

Hehkulamppu on lähtökohtaisesti jännitteeltään ja teholtaan generaattorille liian suuri kuorma, kun tehon tuottoa tutkii vastuksella mitattujen arvojen pohjalta. Kuitenkin maksiminopeudella pyöriessään 500 1/ min generaattorin tuottama teho kasvoi 4,5 kertaiseksi. Jos generaattoria pyöritettäisiin ilman kuormaa esimerkiksi 1000 1/ min, jännite todennäköisesti kohoaisi huomattavasti vielä 154,8 voltista, mutta muovinen roottori ei välttämättä kestäisi niin suurta pyörimisnopeutta. Kaksinkertaistettaessa pyörimisnopeus, jännite ei kuitenkaan todennäköisesti kaksinkertaistuisi, koska jännitteen nousu hidastui korkeimmilla kierroksilla asteittain nopeutta nostettaessa.

9 YHTEENVETO

Generaattorin suunnittelu ja rakentaminen oli mielenkiintoinen aihe opinnäytetyöksi. Aihe ei tietenkään ollut minkään uuden suunnittelemista, koska kaikenkoisia ja kaikenlaisia kestopagneettigeneraattoreita on käytetty monissa tekniikan sovelluksissa jo pitkään. Työ oli täysin omana suunnittelemana tehdyn ja käytännössä valmistetun laitteen rakentamista ja testaamista. Koska kyseessä pitikin alun perin ollakin vain prototyyppi, tärkeintä oli saada havainnollistettua sähkön tuottaminen kestopagneettien avulla.

Jos laitteesta tehtäisiin virallinen tuotannossa valmistettava tuote, olisi sitä jatkojalostettava etenkin kääminnän ja laakeroinnin suhteen. Myöskin roottori täytyisi ulkoisesti muotoilla uudella tavalla, mikäli roottoriin kiinnitettäisiin esimerkiksi tuulimyllyn siivet. Jos lopputulos olisi ollut mieluisin mahdollinen, eli sellainen, johon käytännössä tähdättiin, olisi generaattorin jännitteen tuotto ollut esimerkiksi 12–40 voltin välillä, mutta ennen kaikkea tehontuotto olisi voinut olla vähintäänkin useita kymmeniä watteja.

Vähintään 50 % opinnäytetyöhön käytetystä työmäärästä liittyi generaattorin osien valmistukseen, sen kokoamiseen ja testauslaitteiston rakentamiseen. Testausrakenteiden rakentamisessa oli kohtuuttoman suuri työ siihen nähden, miten nopea operaatio itse pyörityskoe lopuksi oli. Itse generaattorin kokoamisessa työläimpiä vaiheita olivat magneettien kiinnittäminen roottoriin sekä käämintä. Osien 3D-mallit ja osapiirustukset vastasivat hyvin todellisuutta.

LÄHTEET

/1/ Ahoranta, J. 2004. Sähkötekniikka. Helsinki. WSOY.

/2/ Robert Bosch GmbH. 1989. Vaihtosähkögeneraattorit. Suomi. Autoalan koulutuskeskus Oy.

/3/ Hietalahti, L. 2010. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere. Tammertekniikka

/4/ Kauppinen, J. 2018. Turbiinitekniikka. Tampere. Tammertekniikka

/5/ Korpela, A. 2016. Tuulivoiman perusteet. Vantaa. Amk- Kustannus Oy, Tammertekniikka

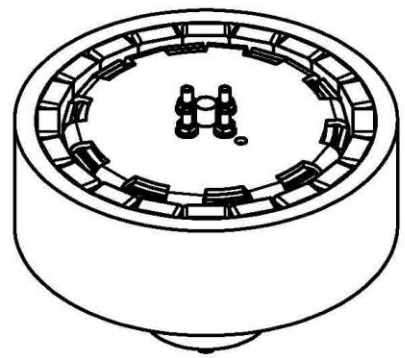
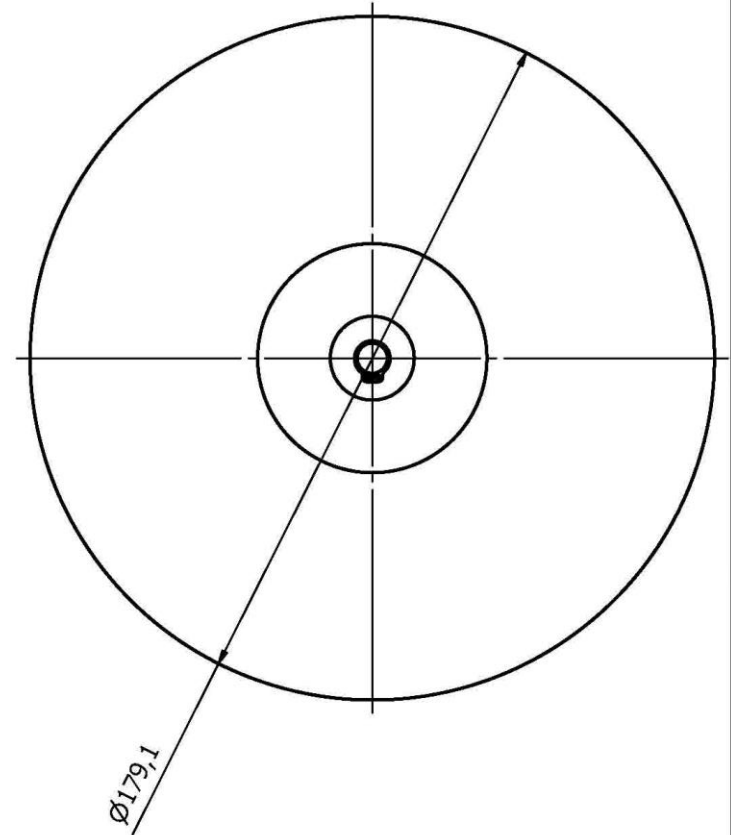
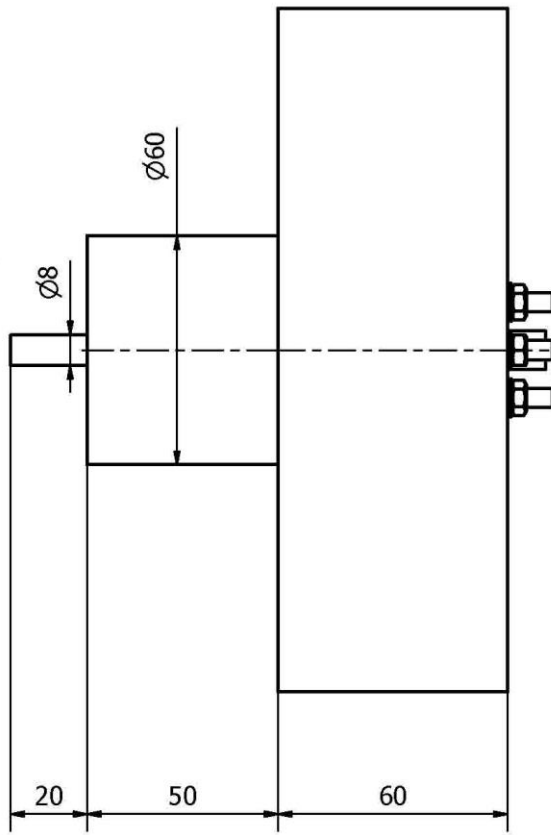
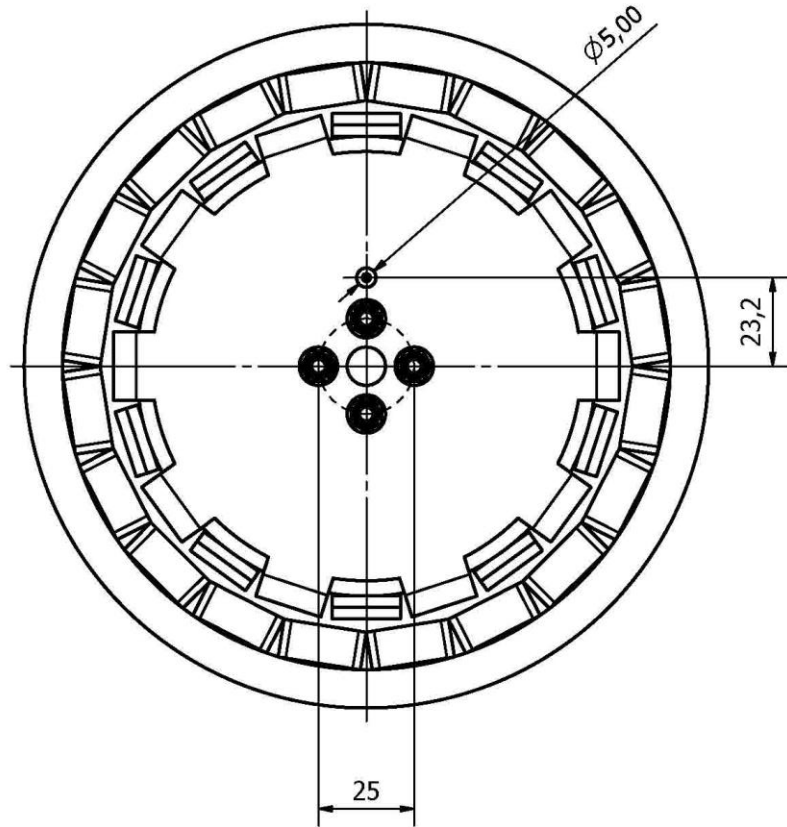
/6/ Jokamiehen opas pientuulivoiman käyttöön. 2021. Viitattu 11.11.2021.
https://www.motiva.fi/files/6010/Joka_miehen_opas_pientuulivoiman_kaytoon.pdf

LIITTEET

Liite 1. Generaattorin kokoonpanopiirustus

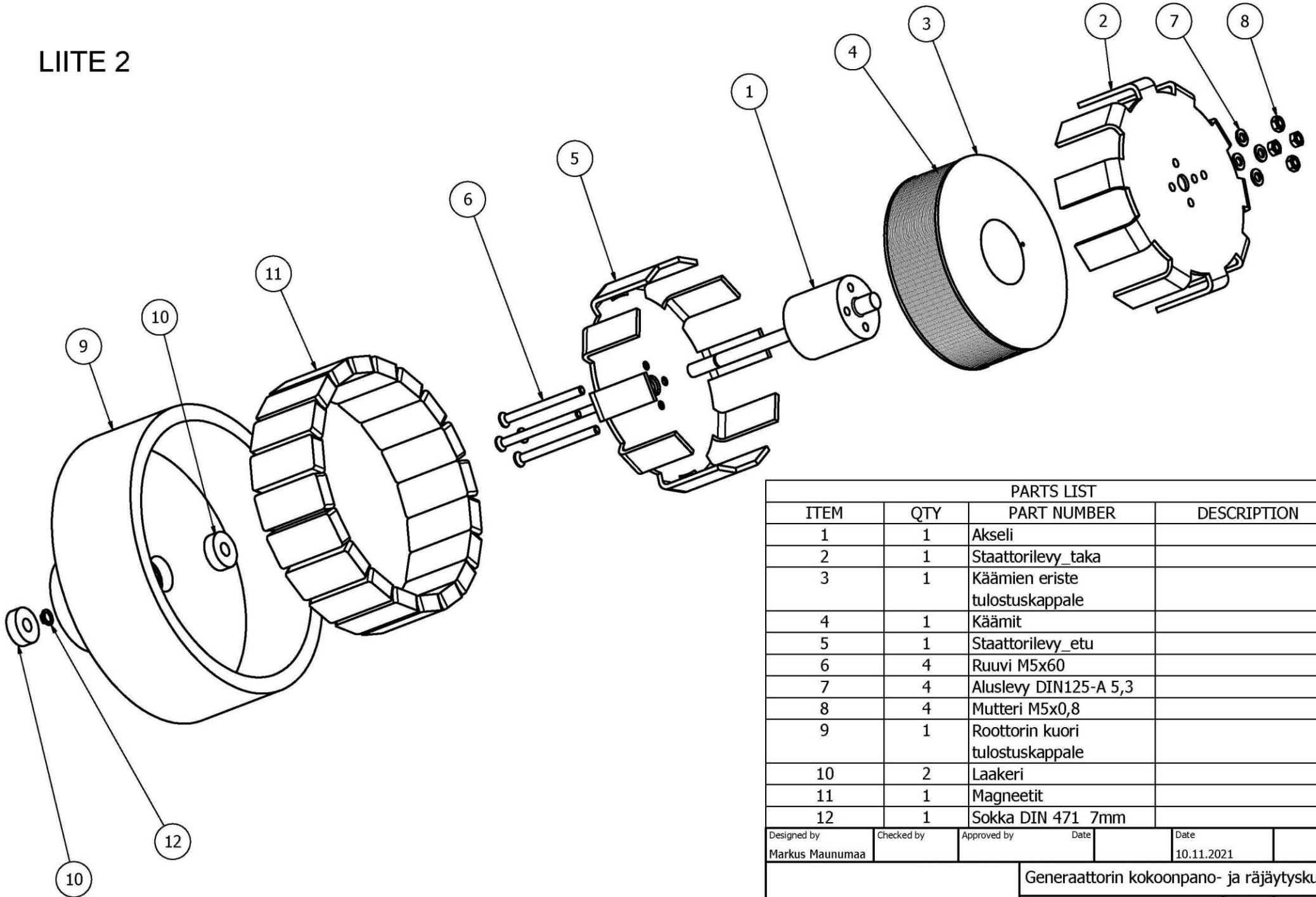
Liite 2. Generaattorin räjäytyskuva

LIITE 1



Designed by	Checked by	Approved by	Date	Date	
Markus Maunumaa				10.11.2021	
			Generaattorin kokoonpano- ja räjäytyskuva		
			Generaattorikokoonpano		Sheet 1 / 2
			Edition A		

LIITE 2



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Akseli	
2	1	Staattorilevy_taka	
3	1	Käämien eriste tulostuskappale	
4	1	Käämit	
5	1	Staattorilevy_etu	
6	4	Ruuvi M5x60	
7	4	Aluslevy DIN125-A 5,3	
8	4	Mutteri M5x0,8	
9	1	Roottorin kuori tulostuskappale	
10	2	Laakeri	
11	1	Magneetit	
12	1	Sokka DIN 471 7mm	

Designed by	Checked by	Approved by	Date	Date
Markus Maunumaa				10.11.2021
Generaattorin kokoonpano- ja räjäytyskuva				
Generaattorikokoonpano			Edition A	Sheet 2 / 2