

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

Opinnäytetyö

Vesa Hippula

PIENTUULIVOIMALAN SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN

Työn ohjaaja
Tampere 2009

DI Eerik Mäkinen

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikka

Sähkövoimatekniikka

Hippula, Vesa

Tutkintotyö

Työn ohjaaja

Huhtikuu 2009

Hakusanat

Pientuulivoimalan suunnittelu ja rakentaminen

70 sivua

DI Eerik Mäkinen

tuulivoima, tuulivoimala, pientuulivoimala

TIIVISTELMÄ

Työn tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa pientuulivoimala. Tarkoituksena oli myös kirjata ylös tuulivoimalaitoksen materiaali- ja rakennuskustannukset ja verrata summaa Suomen markkinoilla oleviin saman kokoluokan pientuulivoimalaitoksiin.

Työssä kuvattiin pientuulivoimalan suunnittelun ja rakentamisen eri työvaiheita sekä teoreettisesti, että kattavilla kuvasarjoilla. Kuvasarjoissa näytetään joitakin rakennusvaiheita metallitöistä lähes valmiiseen pientuulivoimalaan. Voimalasta puuttuu vain masto ja lopullinen johdotus.

Kustannuksista kirjattiin taulukkoon hankittujen materiaalien kokonaishinnat.

Hinnat sisältävät tuotteiden arvonlisäveron ja mahdolliset kuljetusmaksut.

TAMPERE UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electric Engineering

Electrical power engineering

Hippula, Vesa

Planning and construction of small wind turbine

Engineering thesis

70 pages

Thesis Supervisor

M.Sc. Eerik Mäkinen

April 2009

Keywords

wind power, wind turbine, small wind turbine

ABSTRACT

The purpose of the thesis was to plan and construct a small wind turbine. The purpose was also to book material and construction costs of the small wind turbine. And compare the costs to the prices of same sized small wind turbines in the Finnish markets.

The thesis illustrates different phases of the planning and construction of small wind turbine. Phases are illustrated theoretically and pictorially. Pictorials illustrate some of the construction phases from metal work to almost ready small wind turbine. The small wind turbine lacks tower and final wiring.

The booked costs were booked as inclusive prices. The prices include materials VAT and the transportation fees.

ALKUSANAT

Kiitän isääni ja setääni heidän tekemistään metalli- ja puutöistä, jotka mahdollistivat tämän opinnäytetyön tekemisen.

Tampereella 7.4.2009

Vesa Hippula

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO	5
1 JOHDANTO	6
2 PIENTUULIVOIMA	7
3 KESTOMAGNEETTIGENERAATTORIN TYYPPI	9
3.1 Aksiaalivuogeneraattori	10
3.2 Generaattorin toteutus	11
4 ROOTTORI	17
4.1 Roottorin suunnittelu	17
4.2 Roottorin rakentaminen	19
5 STAATTORI	27
5.1 Staattorin suunnittelu	27
5.2 Staattorin rakentaminen	31
6 AKUSTO JA INVERTTERI	37
7 TASASUUNTAAJA	38
8 GENERAATTORIN TESTAUS	41
8.1 24 V akun lataus	43
8.2 12 V akun lataus	45
8.3 Tyhjäkäynti	47
9 LATAUSSÄÄDIN	49
9.1 Zen-logiikka	49
9.2 Ohjelma	52
10 POTKURI	54
10.1 Potkurin suunnittelu	54
10.2 Potkurin rakentaminen	57
11 MYRSKYSUOJAUS	62
12 MASTO	66
13 KUSTANNUKSET	68
14 TUULIVOIMALAN JATKOKEHITYS	69
LÄHDELUETTELO	70

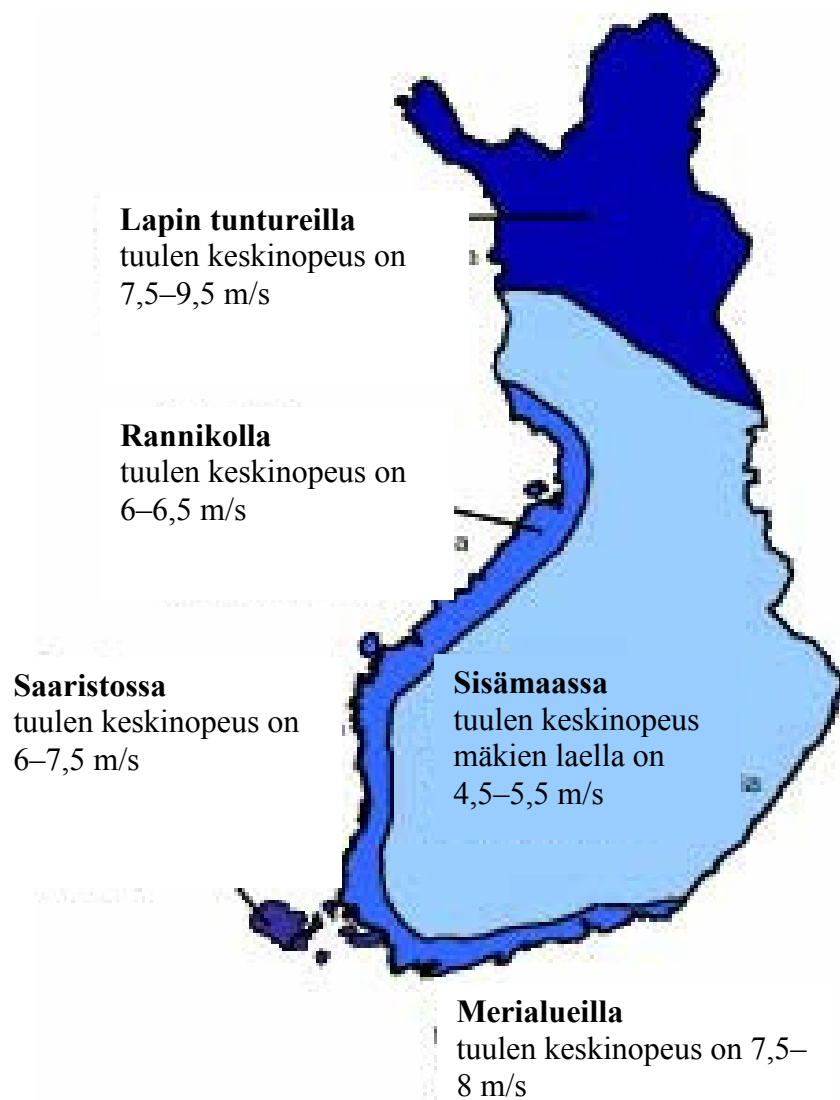
1 JOHDANTO

Työn tavoitteena oli suunnitella pientuulivoimala, jonka teho olisi noin 1 kW. Pientuulivoimalan magneetteina käytetään neodymium kestopagneetteja. Voimalan suunniteltu sijoituspaikka on sisämaassa.

Voimalan kuormana on ajateltu käyttää pihavalaistusta. Myöhemmin mahdollisesti esimerkiksi ilmalämpöpumppua tai muuta sähkölaitetta, riippuen siitä miten voimala tulee toimimaan sen valmistuttua.

2 PIENTUULIVOIMA

Suomessa parhaat tuulivoimaloiden sijoituskohteet ovat rannikkoalueet ja Lapin tunturit. Näillä alueilla keskimääräinen vuotuinen tuulen voimakkuus on suurempi kuin sisämaassa, Lapin tuntureilla 7,5-9,5 m/s, rannikolla 6-6,5 m/s ja sisämaassa 4,5-5,5 m/s. Rannikkoalueilla ei ole maastoesteitä ja mereltä tuleva tuuli on voimakasta. Lapin tunturit ovat korkeita ja niillä on vähän kasvustoa, joka estäisi tuulen kulkua. Kuvasta 1 näkee vuonna 1991 arvioidut Suomen tuuliolosuhteet/1/.



Kuva 1 Suomen tuuliolot /1/

Pientuulivoimalan rakennuslupa on Suomessa kuntakohtainen. Rakennuskunnasta riippuen saattaa tarvita rakennusluvan, toimenpideluvan tai sitten riittää pelkkä ilmoitus. Tämän voi selvittää kunnan internet-sivuilta tai kysymällä kunnan rakennusvalvonnalta. Tämä pientuulivoimala tullaan sijoittamaan Marttilaan. Marttilan kunnan internet-sivuilta selviää, että pientuulivoimalan rakentaminen vaatii toimenpideluvan.

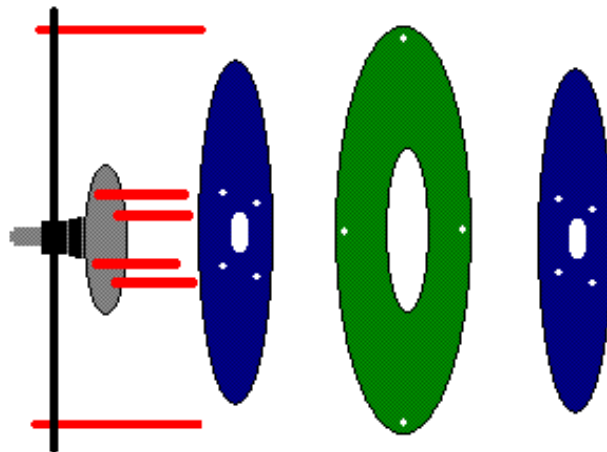
Internetistä löytyy kohtalaisen hyvin pientuulivoimalan rakentamisesta kertovia sivuja ja foorumeita. Sivut ovat yleensä englanninkielisiä. Alla olevassa listassa on joitakin tutkittuja ja lähteenä käytettyjä pientuulivoimala-sivuja, joilla kerrotaan tuulivoimaloista ja niiden rakentamisesta.

- http://www.otherpower.com/otherpower_wind.shtml
- www.scoraigwind.com/
- <http://windesol.fi/windesol/Luokka:Tuulivoima>
- <http://www.tiede.fi/keskustelut/tekniikka-ja-energia-f1/oma-tuuligeneraattori-t14293.html>
- <http://www.newhousefarm.tv/forum/viewtopic.php?t=7186>

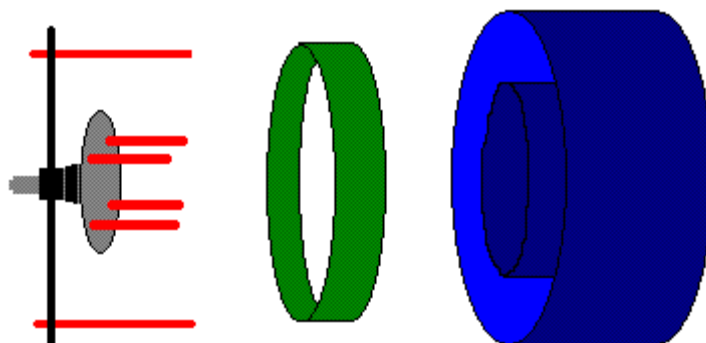
3 KESTOMAGNEETTIGENERAATTORIN TYYPPI

Tuulivoimalan suunnittelu lähti alkuun päätöksellä valita generaattorin rakennetyypiksi aksiaalivuogeneraattori, koska se on helpompi rakentaa kuin radiaalivuogeneraattori. Rakentaminen on helpompaa, koska aksiaalivuogeneraattorin valmiina rakennuspohjana voi käyttää esimerkiksi levyjarruilla varustettua auton pyörän napaa.

Alla olevista kuvista 2 ja 3 selviää generaattorityyppien ero. Niissä siniset osat ovat roottoreita, vihreät staattoreita ja punaiset ovat kierretankoja. /2/



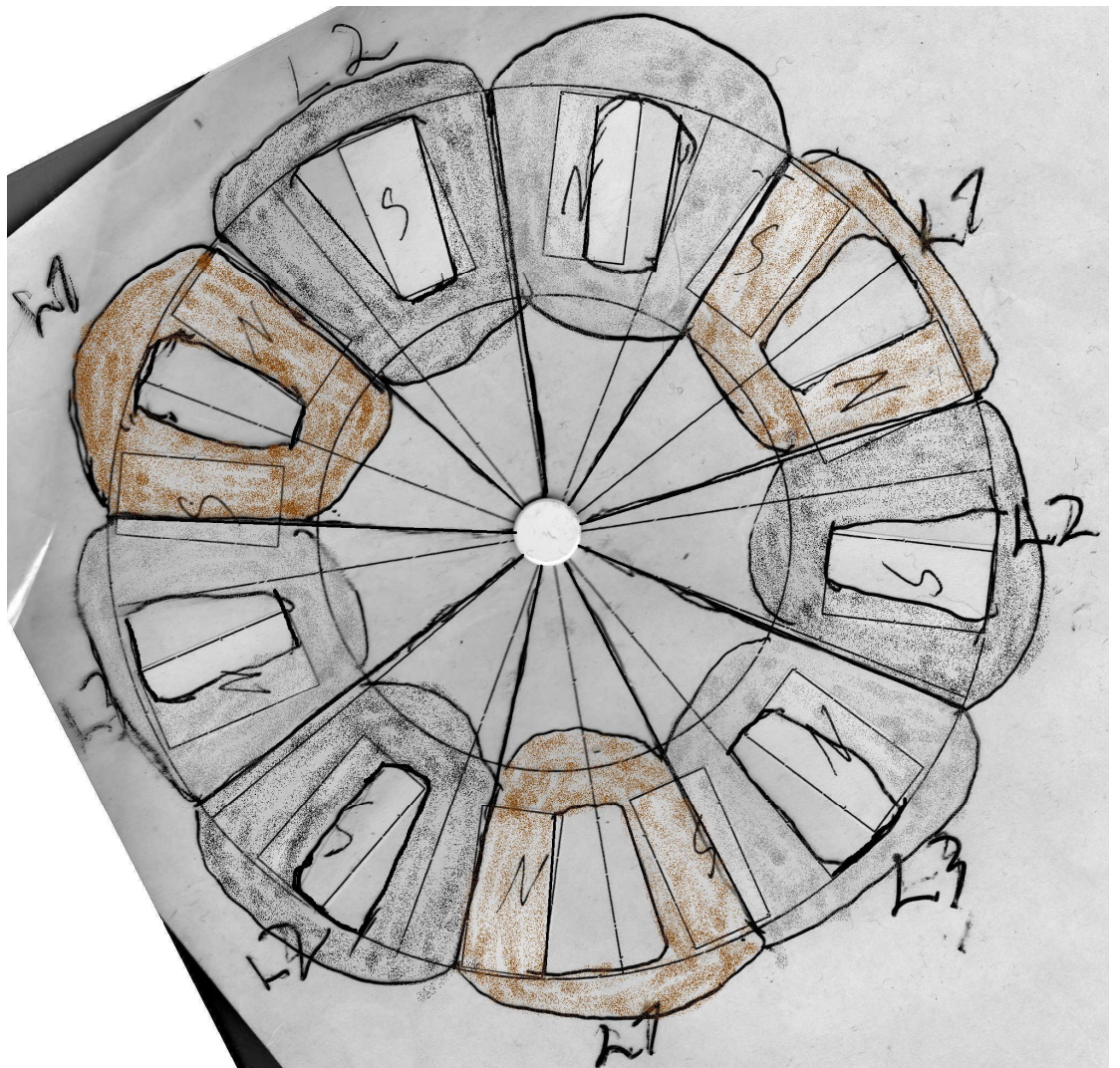
Kuva 2 Aksiaalivuogeneraattori /2/



Kuva 3 Radiaalivuogeneraattori /2/

3.1 Aksiaalivuogeneraattori

Aksiaalivuogeneraattorin ulostulojännitteen sinimuotoisuus saadaan aikaan siten, että siihen asennetaan käämejä suhteella 3:4 magneetteihin nähden /2/. Kuten kuvasta 4 selviää tällä suhteella yhden vaiheen käämit osuvat aina samaan aikaan ja samankohtaisesti magneetteihin, jolloin syntyy kolmivaiheinen sinimuotoinen jännite.



Kuva 4 Käämitys ja magneetti kaavio

3.2 Generaattorin toteutus

Rakentamisen helpottamiseksi generaattorin pohjana käytettiin auton pyörän napoja ja jarrulevyjä. Tähän tarkoitukseen valittiin LT 28 Volkswagenin etupyörän navat, koska omassa pihassa olevista autoista sen jarrulevyjen ulkopinnan halkaisija oli suurin, noin 28 cm.

Kuvissa 5 ja 6 on LT Volkswagenin kummankin etupyörän navat.



Kuva 5 LT Volkswagenin etupyörän napa irtonaisena



Kuva 6 Toinen napa osina

Metallitöitä tehtäessä jarrulevyjen sijasta magneettilevyinä päätettiin käyttää vanhoja Saabin vauhtipyöriä, koska ne olivat kevyemmät kuin jarrulevyt. Vauhtipyöriä käyttämällä generaattorista saataisiin myös lyhyempi kuin siitä olisi saatu jarrulevyjen kanssa. Kuvassa 7 on kaksi Saabin vauhtipyörää eri puolilta kuvattuna.



Kuva 7 2 kpl Saabin vauhtipyöriä

Magneettilevyjen väliholkki päätettiin tehdä yhdestä kiinteästä kappaleesta. Tämän kappaleen pohjana käytettiin jo aiemmin käytettäväksi suunniteltua napaa, sillä navassa oli jo valmiina navan akseliin sopiva laakeripesä. Kuvassa 8 on napa ennen muokkausta ja kuvassa 9 napa sen jälkeen, kun se on sorvattu magneettilevyjen väliin sopivaksi suurin piirtein oikean mittaiseksi holkkiksi.



Kuva 8 LT Volkswagenin napa



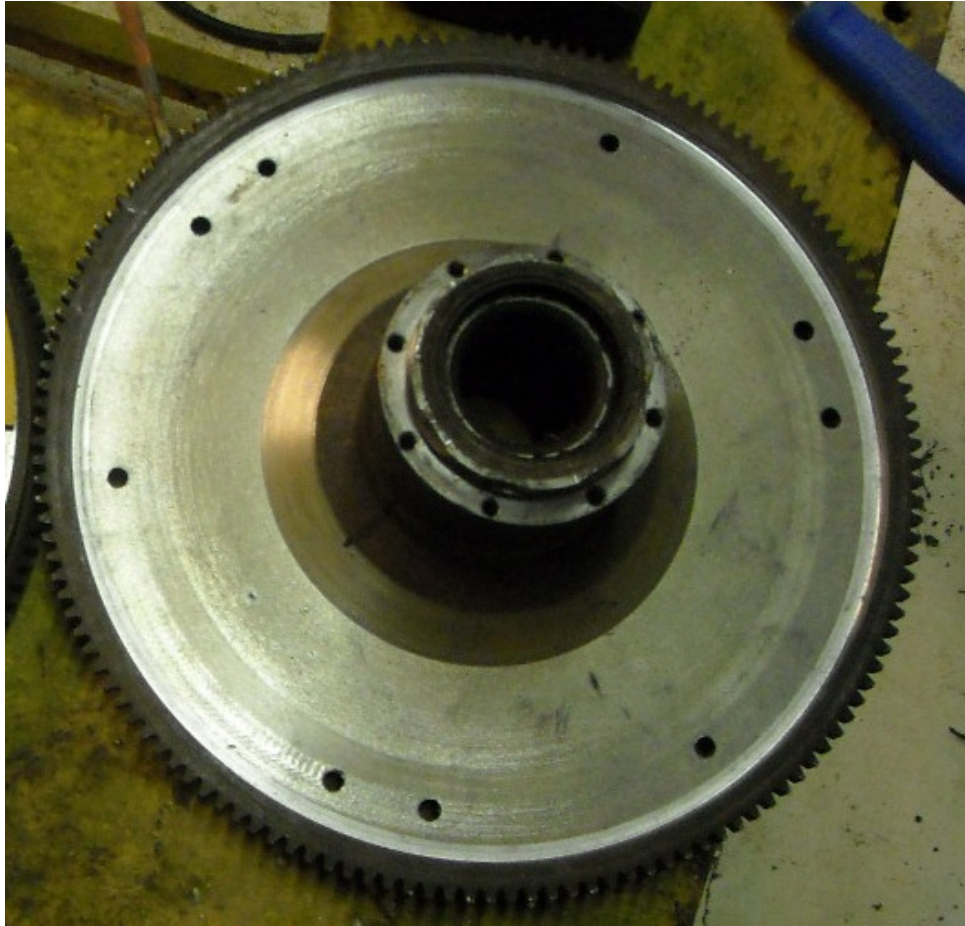
Kuva 9 Muokattu napa

Vauhtipyörät muokattiin magneettilevyiksi sorvaamalla toisen levyn etupintaan ja toisen levyn takapintaan magneeteille sileä alusta. Kuvassa 10 on ulommaksi magneettilevyksi sorvattu vauhtipyörä.



Kuva 10 Ulompi magneettilevy

Kuvassa 11 on ulompi magneettilevy, johon väliholkki on laitettu paikalleen.



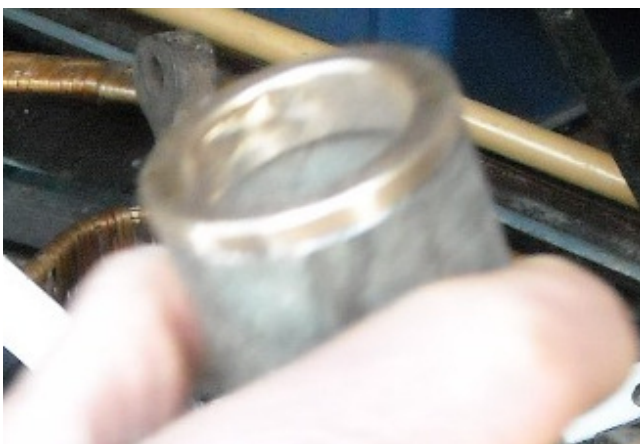
Kuva 11 Ulompi magneettilevy väliholkin kanssa

Kuvassa 12 on valmiiksi hitsattu generaattorin runko. Rungossa on hitsattu suoraan metalliputkeen etunapa, jossa on staattorin kiinnitystuet ja peräsimen akseli noin 20 ° kaltevuudessa ja 45 ° kulmassa etunapaan nähden.



Kuva 12 Generaattorin runko

Kuvassa 13 on rungon putken sisään tulevan laakeriputken yläpää, jossa on messinkilaakeri paikallaan.



Kuva 13 Laakeriputken yläpää

4 ROOTTORI

4.1 Roottorin suunnittelu

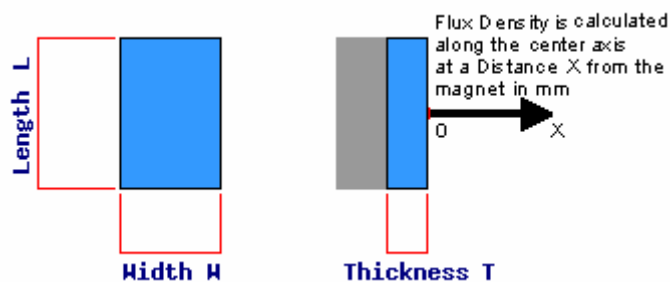
Roottorien suunnittelu lähti alkuun tutkimalla saatavilla olevia magneetteja.

Magneetteja tutkittiin siltä pohjalta, että niitä olisi yhdessä levyssä 12 kappaletta ja ne olisivat noin 51 mm pitkiä ja noin 25 mm leveitä. Magneeteista löytyi tietoja niiden hinnasta, koosta, magneettiasteesta ja remanenssivuontiheysi B_{\max} . Arvot on merkitty taulukkoon 1.

Taulukko 1 Magneettitaulukko

	1	2	3	4
magneetti	2x1x1xn42	2x1x0,75xn50	2x1x0,24xn52	40-20-10-N42
Brmax/T	1,31	1,41	1,48	1,31
hinta 24 kpl	166	257	200	106

Magneettien vuontiheys eri roottorien väleille selvitetään soveltamalla teoreettista laskukaavaa (1), joka perustuu kuvassa 14 esitettyyn tilanteeseen. Kaavaa sovellettaessa sen tulo kerrottiin kahdella. Tämä siitä syystä, että generaattorin roottorilevyjen magneetit ovat vastakkain toisiaan kohti erinapaisesti, toisessa levyssä N-napa ja toisessa S-napa kohdakkain. Arvot on kirjattu taulukkoon 2.



Kuva 14 Kuva vuontiheys laskukaavan laskutilanteesta

$$B = \frac{B_r}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{W * L}{2x\sqrt{4x^2 + W^2 + L^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{W * L}{2(x + 2T)\sqrt{4(x + 2T)^2 + W^2 + L^2}} \right) \right] \quad (1)$$

B on magneettivuontiheys (T)

B_r on remanenssivuontiheys (T)

W on magneettien leveys (mm)

L on magneettien pituus (mm)

x on matka magneetista (mm)

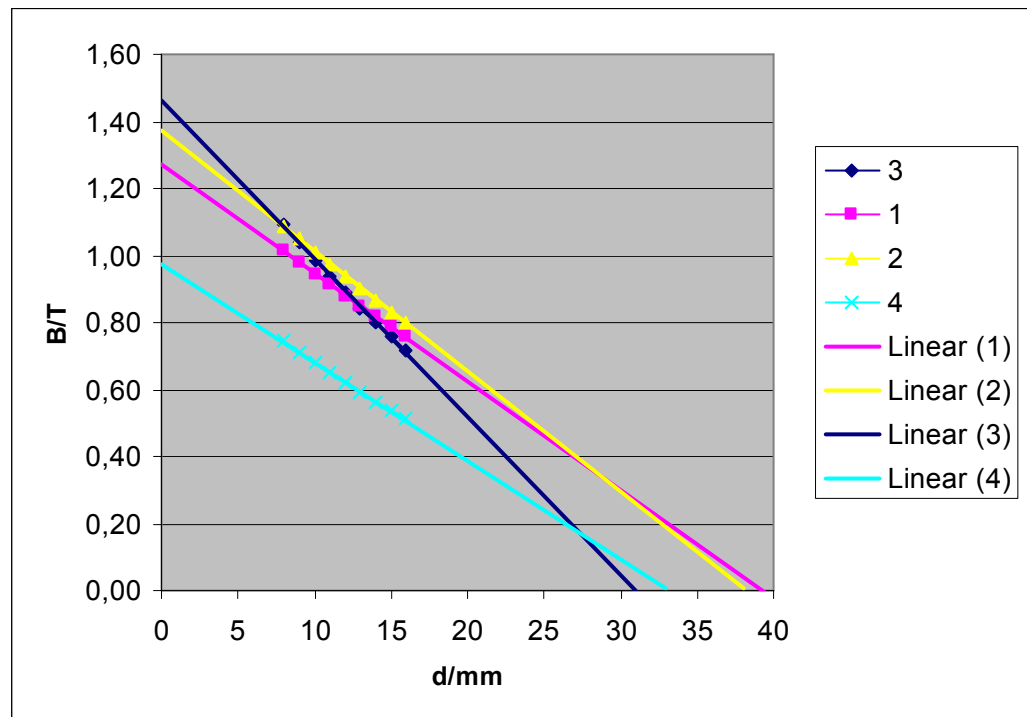
T on magneetin paksuus (mm) /3/

Taulukossa 2 on magneettien välinen vuontiheys eri magneettien välisille välimatkoille.

Taulukko 2 Magneettien vuontiheystaulukko eriväleille

d/mm	B/T			
	1	2	3	4
8	1,02	1,09	1,09	0,75
9	0,98	1,05	1,04	0,71
10	0,95	1,01	0,99	0,68
11	0,91	0,97	0,94	0,65
12	0,88	0,94	0,89	0,62
13	0,85	0,90	0,84	0,59
14	0,82	0,87	0,80	0,56
15	0,79	0,83	0,76	0,54
16	0,76	0,80	0,72	0,51

Taulukon 2 perusteella piirrettiin kuvaan 15 magneettivuontiheyden kuvaajat eri magneettilevyjen väleille.



Kuva 15 Magneettivuontiheyden kuvaajat

Selvitettyjen tietojen ja piirrettyjen magneettivuontiheyskuvaajien perusteella valittiin 2”x1”x1” N42 magneetit. Ne saatiin USA:sta UPS:n kuljetuksena noin kahden viikon kuluttua tilauksesta. Magneetit toimitettiin suoraan kotiovelle.

4.2 Roottorin rakentaminen

Roottoreita alettiin rakentaa tekemällä magneettilevyiksi muokatuille vauhtipyörille 12-reikäinen asettelu-sabluuna, jonka avulla magneetit voitiin asetella oikeille paikoilleen. Sabluunaa apuna käyttäen leikattiin lasikuitumatosta valuvahvikkeet magneettilevyille. Lasikuituisilla valuvahvikkeilla valusta tulee kestävämpi.

Kuvassa 16 on sisempi magneettilevy sabluunan kanssa.



Kuva 16 Sisempi magneettilevy magneettien asettelu-sabluunan kanssa

Magneettien pintoihin kirjoitettiin napaisuus kompassia apuna käyttäen. Magneetit aseteltiin sabluunan kanssa magneettilevyyn (kuva 17).



Kuva 17 Sisempi magneettilevy sabluunan kanssa magneetteja asettaessa

Magneettien ollessa paikoillaan sabluuna irrotettiin ja magneettien ympärille laitettiin superliimaa pitämään niitä paikoillaan (kuva 18).



Kuva 18 Sisempi magneettilevy ilman sabluunaa

Kuvassa 19 on sisempi magneettilevy valmisteltuna valua varten. Magneettilevyn keskellä on silikonilla kiinnitetty muoviastia, ja magneettilevyn ympärillä on metallinen lista.



Kuva 19 Sisempi magneettilevy valmiina valua varten

Valumassa valmistettiin polyesterihartsista sekoittamalla siihen kovete purkissa olleen ohjeen mukainen määrä eli noin kaksi prosenttia hartsinkovetetta.

Kuvassa 20 on sisempi magneettilevy valettaessa sen jälkeen, kun valuun on upotettu sabluunan avulla leikattu lasikuitumaton pala.



Kuva 20 Sisempi magneetti valettaessa

Kuvassa 21 on sisempi magneettilevy valun kuivuttua. Kuvasta näkee, että valu on kuivunut liian nopeasti ja halkeillut. Tämän takia seuraavaan valuun päätettiin sekoittaa vähemmän hartsinkovetetta.



Kuva 21 Sisempi magneettilevy valun kuivuttua

Kuvassa 22 on sisemmän magneettilevyn korjausvalu. Kuivuneen valun päälle on lisätty vahvikkeeksi lasikuitumatonta paloja peittämään halkeamia ja estämään uusia halkeamia.



Kuva 22 Sisemmän magneettilevyn korjausvalu

Kuvissa 23–25 on ulomman magneettilevyn valun eri vaiheita samalla lailla kuin edellä sisemmän levyn valusta. Valussa poikettiin aiemmasta vain muuttamalla hartsinkovetteen määrää puoleen aiemmasta.



Kuva 23 Ulompi magneettilevy valmiina valua varten

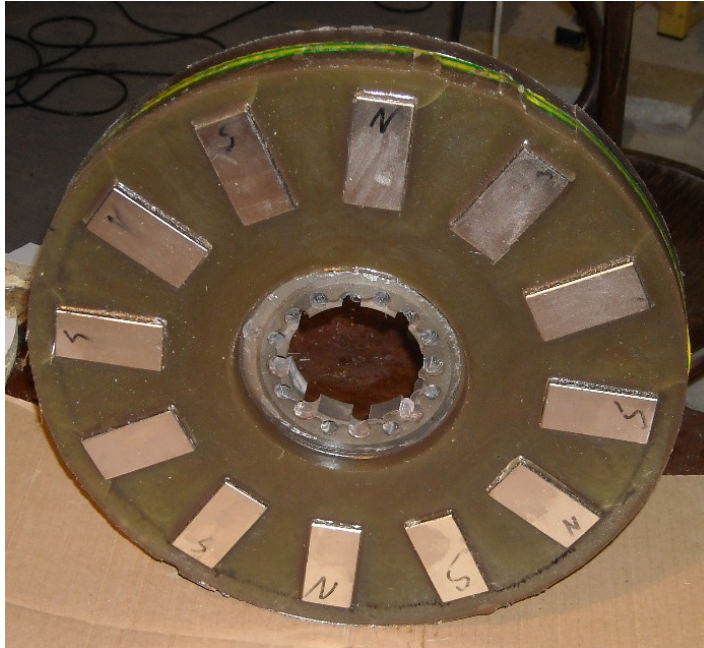


Kuva 24 Ulompi magneettilevy lasikuitumattoa lisättäessä



Kuva 25 Ulompi magneettilevy valun valmistumista odottaessa

Kuvasta 26 näkee, että kovetteen määrän vähennys auttoi. Levyyn ei enää tullut kuivumisen aikana halkeamia.



Kuva 26 Ulompi magneettilevy kuivana

Kuvissa 27 ja 28 ovat magneettilevyt valmiina päällystettyinä topgoatilla, joka suojaa hartsivalua kosteudelta.



Kuva 27 Ulompi magneettilevy valmiina



Kuva 28 Sisempi magneettilevy valmiina

5 STAATTORI

5.1 Staattorin suunnittele

Staattorin valmistus alkoi laskemalla tarvittava käämityksen kierrosmäärä. Oletuksena oli, että tasasuuntaus tehdään 6-pulssisillalla. Kuvassa 29 on periaatteellinen kytkentäkaavio, johon on merkitty laskemisessa selvitettyjä suureita, joita ovat.

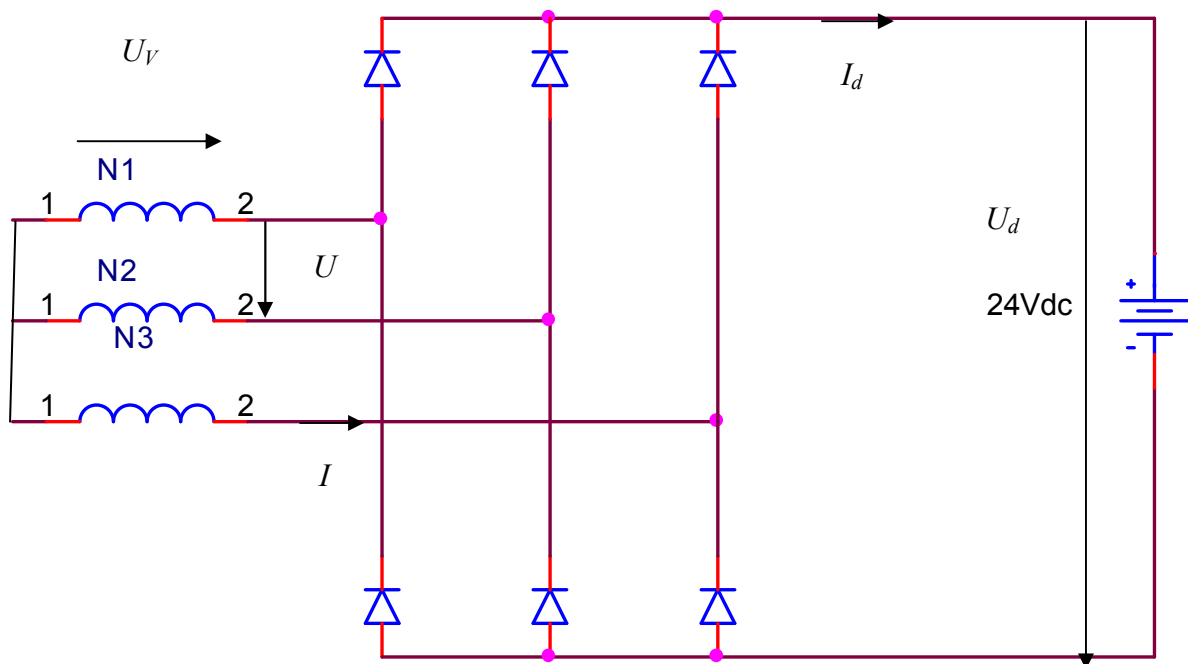
U_V on vaihejännite (V)

U on pääjännite (V)

I on käämeissä kulkeva virta (A)

I_d on tasasuunnattu virta (A)

U_d on tasasuunnattu jännite (V)



Kuva 29 Kytentäkaavio

Ensin laskettiin käämin yli oleva huippujännite \hat{u}_V , olettamalla, että akun jännite olisi välillä 24-28 V. Koska käytössä on 6-pulssisilta ja generaattoria suunniteltaessa on oletettu, että jännite on sinimuotoista. Jännitteet lasketaan seuraavasti:

$$U_V = \frac{U_d}{2,34} = \frac{24\text{V}}{2,34} = 10,3\text{V}$$

$$U_V = \frac{28\text{V}}{2,34} = 11,97\text{V}$$

$$\hat{u}_V = \frac{U_d}{2,34} * \sqrt{2} = \frac{24\text{V}}{2,34} * \sqrt{2} = 14,5\text{V}$$

$$\hat{u}_V = \frac{28\text{V}}{2,34} * \sqrt{2} = 16,9\text{V}$$

$$U = U_V \sqrt{3} = 10,3\text{V} \sqrt{3} = 17,8\text{V}$$

$$U = 11,97\text{V} \sqrt{3} = 20,7\text{V}$$

Näistä lasketuista arvoista käytetään käämityksen kierrosten laskemiseen 28 V:n kohdalla saatua käämin huippujännitettä.

Käämin yhdessä kierroksessa syntyvä jännite lasketaan alla olevalla kaavalla 2.
Kaavassa magneetin nopeus v lasketaan säteen r ollessa magneetin keskipisteeseen noin 11,4 cm ja käämin pituuden l ollessa kaksi kertaa magneetin pituus L , koska käämi osuu yhtä aikaa kahteen erinäpaiseen magneettiin. Generaattorin kierrosnopeuksina n laskussa käytettiin 60, 100 ja 140 min⁻¹.

$$E = vB = (2\pi rn)(2L) * B = (2\pi 0,114m * n) * 2(2 * 0,0254m) * B \quad (2)$$

Käämin kierrosmäärä yhdessä vaiheessa N_V lasketaan alla olevalla kaavalla.

$$N_v = \frac{\hat{u}_v}{E} \quad (3)$$

Koska magneetteja on 12, käämejä pitää olla yhteensä yhdeksän.

Kolmivaiheisuuden takia yhdessä vaiheessa on kolme käämiä. Yhden käämin kierrosmäärä lasketaan seuraavasti:

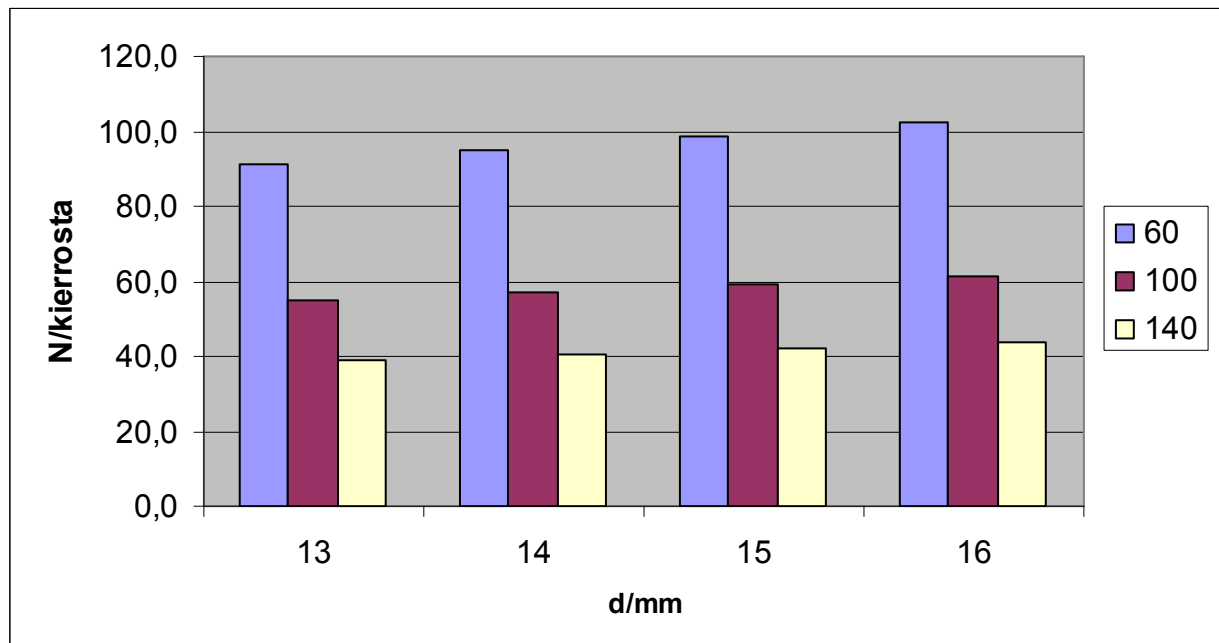
$$N_{käämi} = \frac{\hat{u}_v}{E * 3} \quad (4)$$

Lasketut arvot on kirjattu taulukkoon 3.

Taulukko 3 Käämin kierrokset eri väleillä ja nopeuksilla

d/mm	B/T	60 rpm		100 rpm		140 rpm	
	1	E/V	N(käämi)	E/V	N(käämi)	E/V	N(käämi)
8	1,02	0,074	76,3	0,123	45,8	0,173	32,7
9	0,98	0,071	79,0	0,119	47,4	0,167	33,9
10	0,95	0,069	81,9	0,115	49,2	0,161	35,1
11	0,91	0,066	84,9	0,111	51,0	0,155	36,4
12	0,88	0,064	88,1	0,107	52,9	0,149	37,8
13	0,85	0,062	91,4	0,103	54,9	0,144	39,2
14	0,82	0,059	94,9	0,099	56,9	0,139	40,7
15	0,79	0,057	98,5	0,095	59,1	0,134	42,2
16	0,76	0,055	102,3	0,092	61,4	0,129	43,8

Kuvassa 30 on palkkikuvaajat käämin kierroksista oletetuimmille magneettilevyjen välimatkoille (13–16 mm) laskuissa käytetyillä nopeuksilla.



Kuva 30 Käämin kierrosmäärä eri nopeuksilla ja eri magneettilevyjen välimatkoilla

Generaattorin nopeudeksi valittiin 140 min^{-1} , joten käämiin piti saada noin 40 kierrosta käämilankaa. Käämilangan poikkipinta-ala määritettiin virran perusteella, kun tehon arvioitiin olevan huipussaan 1-1,5 kW. Virrat laskettiin seuraavasti:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U} = \frac{1\text{kW}}{\sqrt{3}(20,7\dots17,8\text{V})} = 27,9\dots32,4\text{A}$$

$$I_d = \frac{I}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}} = \frac{27,9\dots32,4\text{A}}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}} = 34,1\dots39,7\text{A}$$

$$I = \frac{1,5\text{kW}}{\sqrt{3}(20,7\dots17,8\text{V})} = 41,8\dots48,7\text{A}$$

$$I_d = \frac{41,8\dots48,7\text{A}}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}} = 51,2\dots59,6\text{A}$$

Käämin haluttiin kestävän 1,5 kW:n tuotto, joten sen virran keston piti olla noin 50 A. 50 A:n virran kestoisuus oletettiin saatavan käämimällä rinnakkain kahta 1,5 mm käämilankaa. Näillä langoilla pitäisi saada käämien hetkellinen virrankesto noin 100 ampeeriin.

5.2 Staattorin rakentaminen

Staattorin valmistus aloitettiin rakentamalla käämintälaite, jolla käämit voitaisiin valmistaa. Kuvassa 31 on käämintälaite, joka on tehty vanhasta auton vesipumpusta.



Kuva 31 Käämintälaite

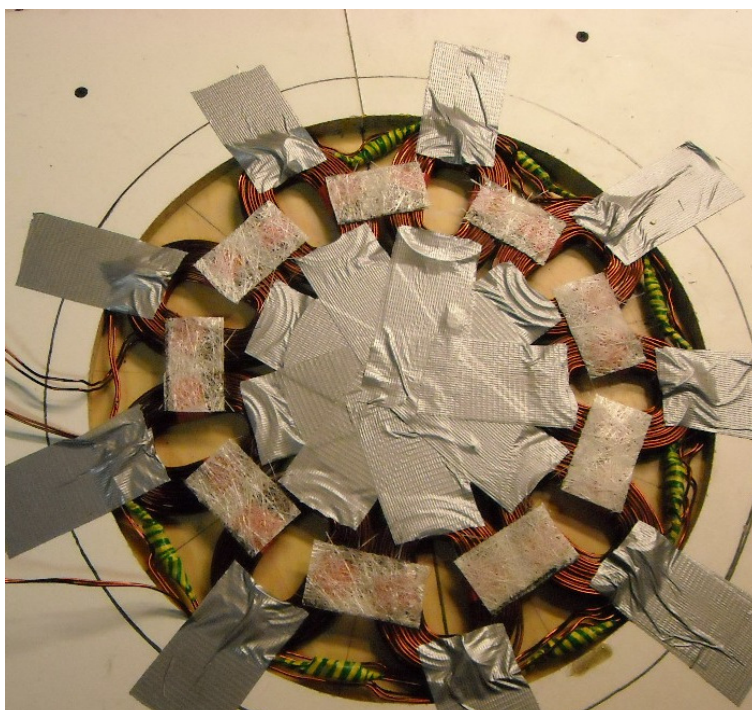
Käämintä aloitettiin testaamalla saataisiinko käämiin tarvittava kierrosmäärä. Käämiin saatiin 44 kierrosta, ja päätettiin tehdä kaikki käämit tämän kokoisiksi.

Kuvassa 32 on valmiit käämit juotettuina toisiinsa oikeissa vaiheissa.



Kuva 32 Käämit juotettuina vaiheisiinsa

Kuvassa 33 on käämit teipattuina muottiin, jotta ne saataisiin kiinnitettyä toisiinsa lasikuitumaton paloilla ja superliimalla.



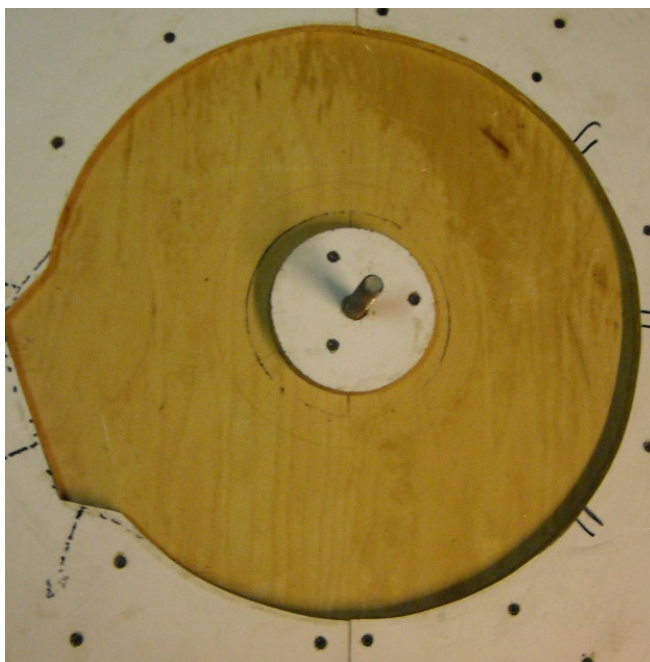
Kuva 33 Käämien liimaus toisiinsa

Kuvassa 34 on käämit nostettuna muotista sen jälkeen, kun käämit on kiinnitetty toisiinsa lasikuitumaton paloilla.



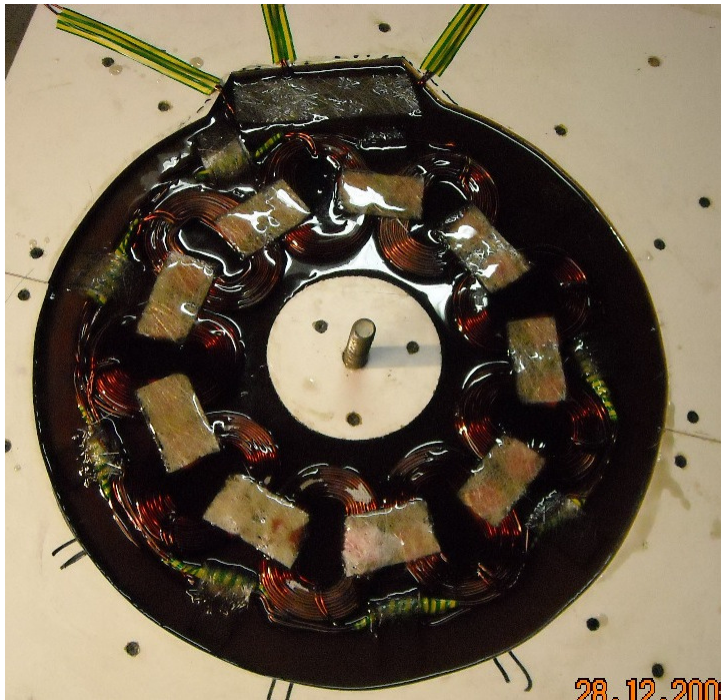
Kuva 34 Käämit irrotettuna muotista

Kuvassa 35 on muotti valmisteltuna staattorin valamista varten ja voideltuna puuvahalla.



Kuva 35 Muotti valmiina valua varten

Valaminen aloitettiin sekoittamalla polyesterihartsia ja kaksi prosenttia hartsin kovetetta. Valun pohjalle kaadettiin vähän hartsia ja laitettiin muotin muotoinen lasikuitumaton pala. Tämän jälkeen käämit nostettiin muottiin (kuva 36). Muottiin lisättiin vielä hartsia ja upotettiin toinen lasikuitumaton pala päällimmäiseksi valuun.



Kuva 36 Käämit upotettuna hartsiin

Kuvassa 37 on valumuotti suljettuna vingoilla ja jätettynä kuivumaan.



Kuva 37 Muotti kiinnitettynä

Kuvissa 38 ja 39 on muotti aukaistuna ja käämilevy irrotettuna muotista. Kuvista näkee, että suljetussa muotissa kaksi prosenttia hartsin kovetetta ei ole liikaa.



Kuva 38 Muotti aukaistuna



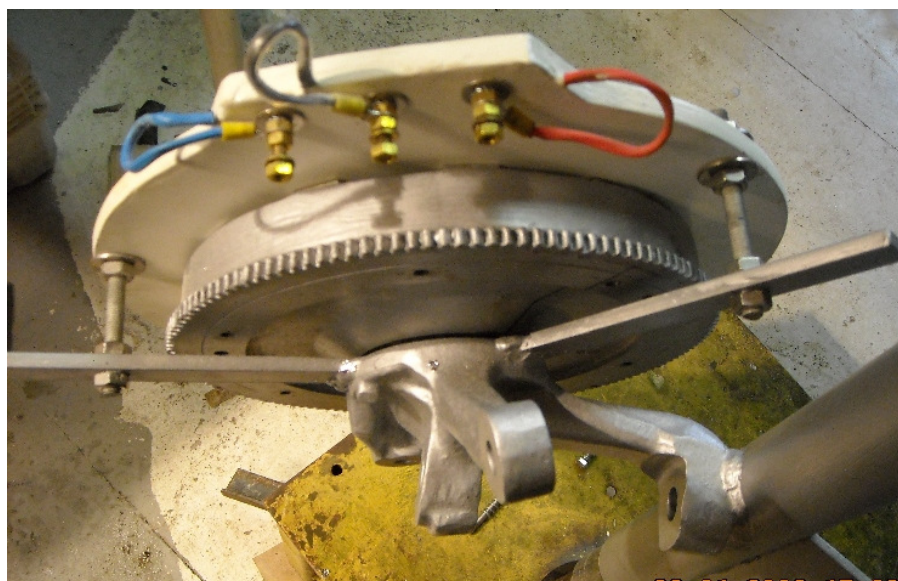
Kuva 39 Käämilevy irrotettuna muotista

Kuvassa 40 on staattori lähes valmiina päällystettynä topgoatilla.



Kuva 40 Staattori päällystettynä topgoatilla

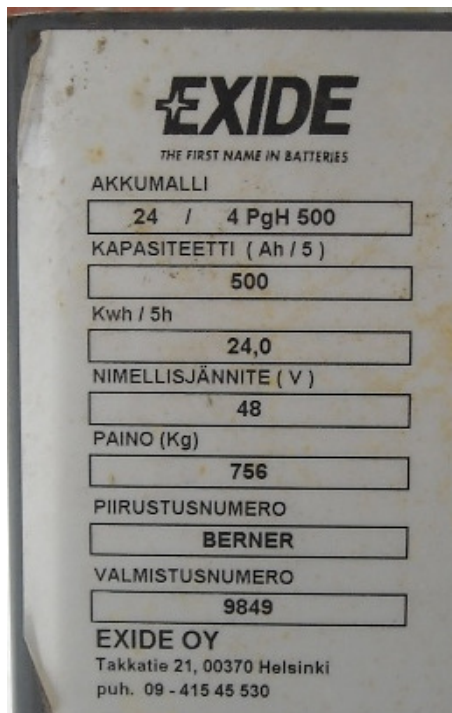
Kuvassa 41 on koottu generaattori, jossa staattori on paikallaan. Roottorien väli on noin 14,2 mm.



Kuva 41 Staattori paikallaan kootussa generaattorissa

6 AKUSTO JA INVERTTERI

Voimalan akustoksi hankittiin vanha 48 V, 500 Ah trukin akku. Akussa on 24 kappaletta 2 V akkukennoa (kuva 42). Akku kytkettiin halutuksi 24 V akuksi kytkemällä niin, että akkukennoja oli sarjassa 12 kappaletta ja toinen samanlainen sarja rinnalla.



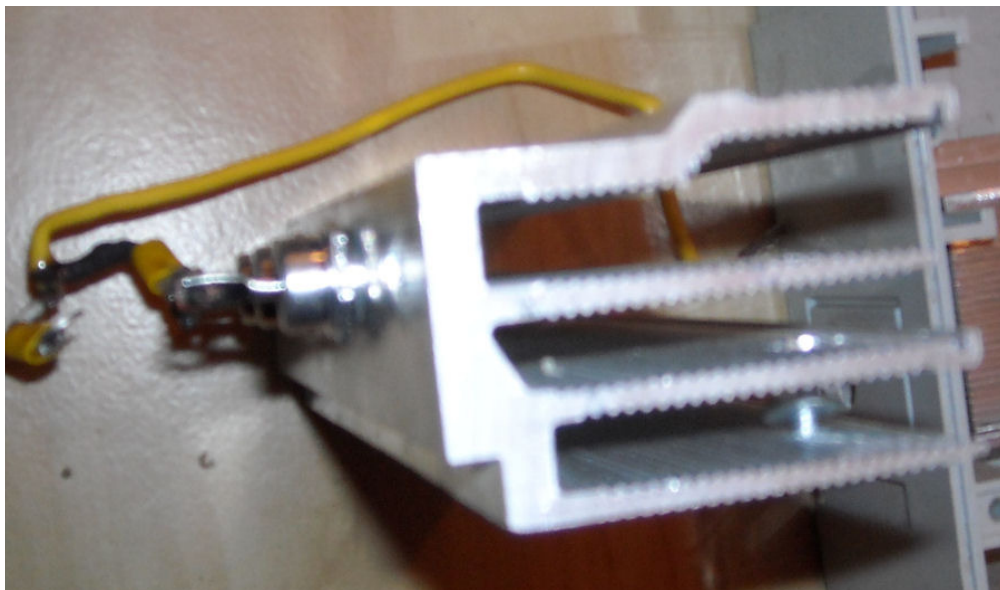
Kuva 42 Akun arvokilpi

Invertterinä käytetään 24 V Profitexx 2000/4000W invertteriä, jonka käyttöteho 2 kW ja hetkellinen huipputeho 4 kW.

7 TASASUUNTAAJA

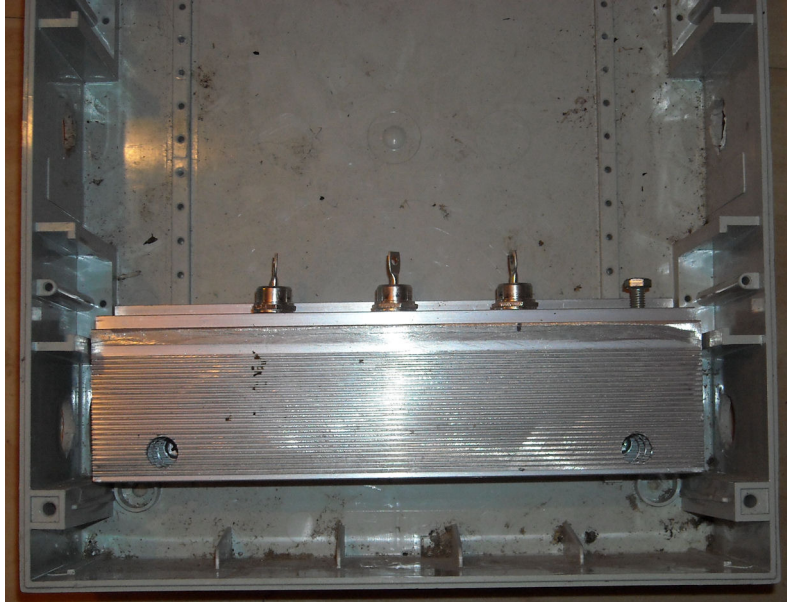
Generaattorin tasasuuntaajaksi rakennettiin 6-pulssisilta käyttäen 70HF120- ja 70HFR120-pulttidiodeja. Diodit kestävät 70 A ja 1200 V, joten niiden pitäisi kestää generaattorin laskuissa käytetty 1,5 kW maksimiteho. 70HF120 diodissa pulttikanta on katodi ja 70HFR120 diodissa se on anodi.

Kuvassa 43 on toinen diodien kiinnitykseen ja jäähdytykseen käytetyistä alumiinielementeistä. Elementtejä käytetään myös suuntaajan plus ja miinus napoina.



Kuva 43 Diodien kiinnitys/jäähdytyslementti

Kuvissa 44 ja 45 on toinen diodisillan kiskoista ja generaattorin ja akun johdotuksen kiinnityspiste paikoillaan sähkökaapissa.

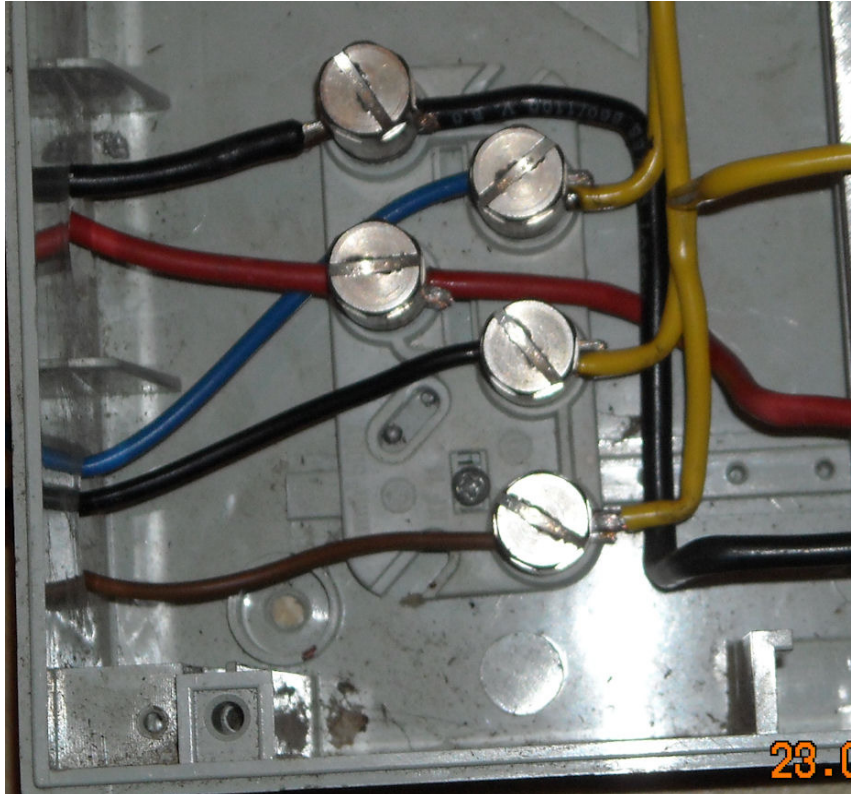


Kuva 44 Diodien kiinnityselementti sähkökaapissa



Kuva 45 Generaattorin ja akun johdotuksen kiinnityspiste

Kuvissa 46 ja 47 on diodien väliset, akun ja generaattorin johdotukset paikoillaan.



Kuva 46 Generaattorin ja akun liitosjohdot paikoillaan



Kuva 47 6-pulssisillan johdotus

Kuvassa 48 on 6-pulssisiltaan kiinnitettyt jännite- ja virtamittarit, joiden asteikot ovat 100 V ja 100A.



Kuva 48 Virta- ja jännitemittarit kiinnitettyinä siltaan

8 GENERAATTORIN TESTAUS

Generaattoria testattiin pyörittämällä sitä 800 W laastin- ja maalinsekoituskoneella. Generaattorin kuormana käytettiin 24 V akkua, 12 V akkua ja tyhjäkäyntiä. Kuvassa 49 on sekoituskone kiinnitettyä generaattoriin.



Kuva 49 Generaattorin pyöritys

Kuvassa 50 on joitakin mittauksessa käytetyistä mittalaitteista, mm. yleismittari, pihtimittari ja oskilloskooppi.



Kuva 50 Mittalaitteet

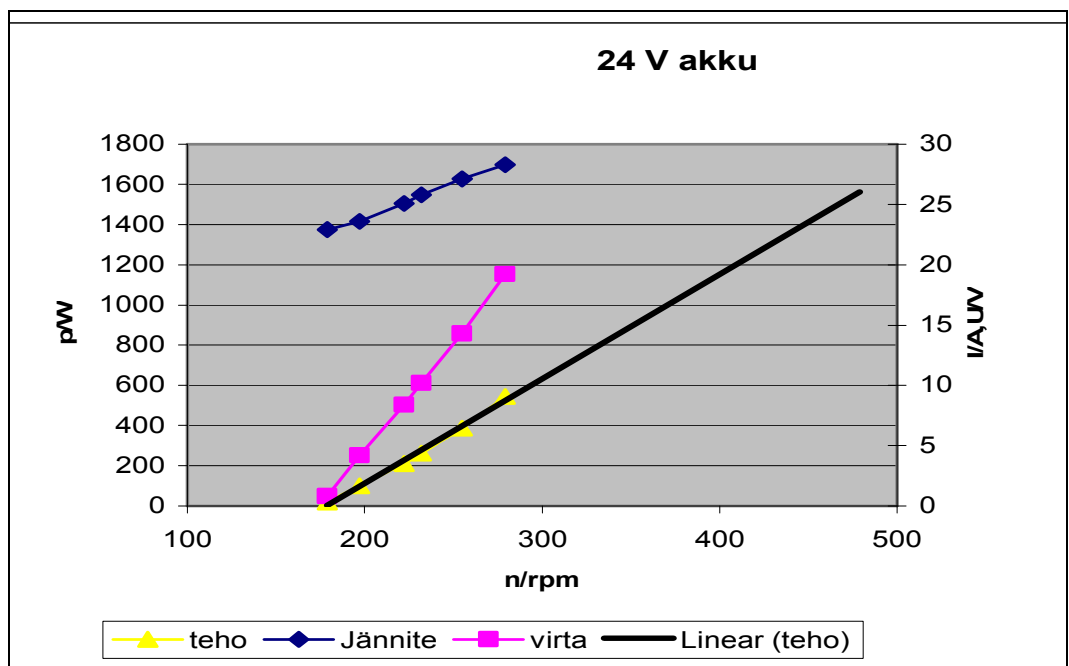
8.1 24 V akun lataus

Akkuna käytettiin hankitun akun kennoista 12 kappaletta, jolloin akuston jännitteeksi saatiin 24 V. Taulukossa 4 on mittaustulokset sekoituskoneen jaksamaan maksiminopeuteen asti.

Taulukko 4 24 V akun testauksen tulokset

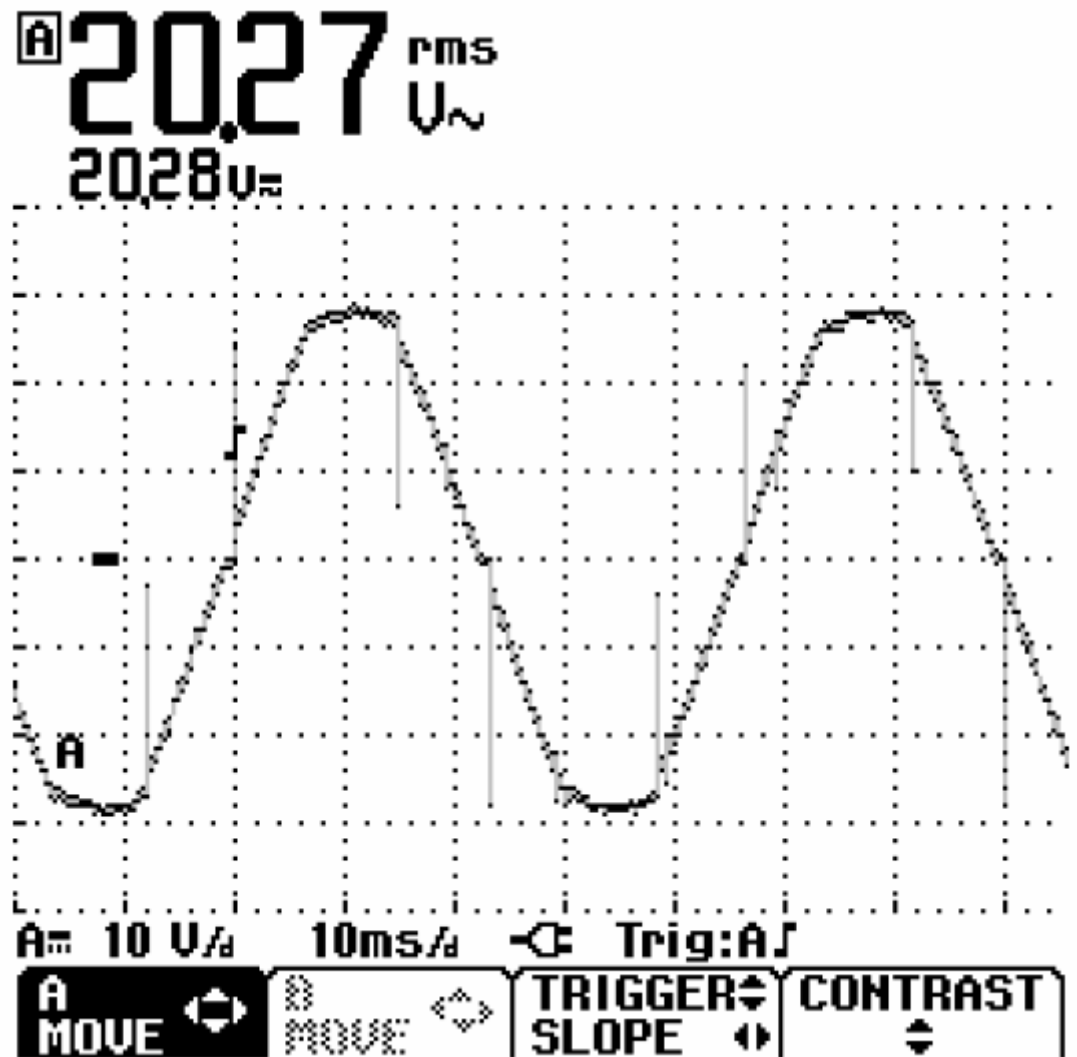
n/rpm	Udc/V	Idc/A	P/W
179	22,9	0,8	18,32
197	23,6	4,2	99,12
222	25,1	8,4	210,84
232	25,8	10,2	263,16
255	27,1	14,3	387,53
279	28,3	19,2	543,36

Kuvassa 51 on mittaustuloksista piirretyt kuvaajat. Kuvaajista näkee, että jännitteen, virran ja tehon kuvaajat kasvavat lineaarisesti. Oletetulla trendiviivalla näkee, että 1 kW teho syntyy, kun nopeus on noin 400 min^{-1} . Mittaustuloksista näkee myös, että käämityksen koon määrittämiseen käytetyissä laskuissa on virhe, sillä latauksen olisi pitänyt alkaa laskujen mukaan pyörimisnopeudella 140 min^{-1} . Todennäköisin virhelähde on magneettivuontiheyden laskenta.



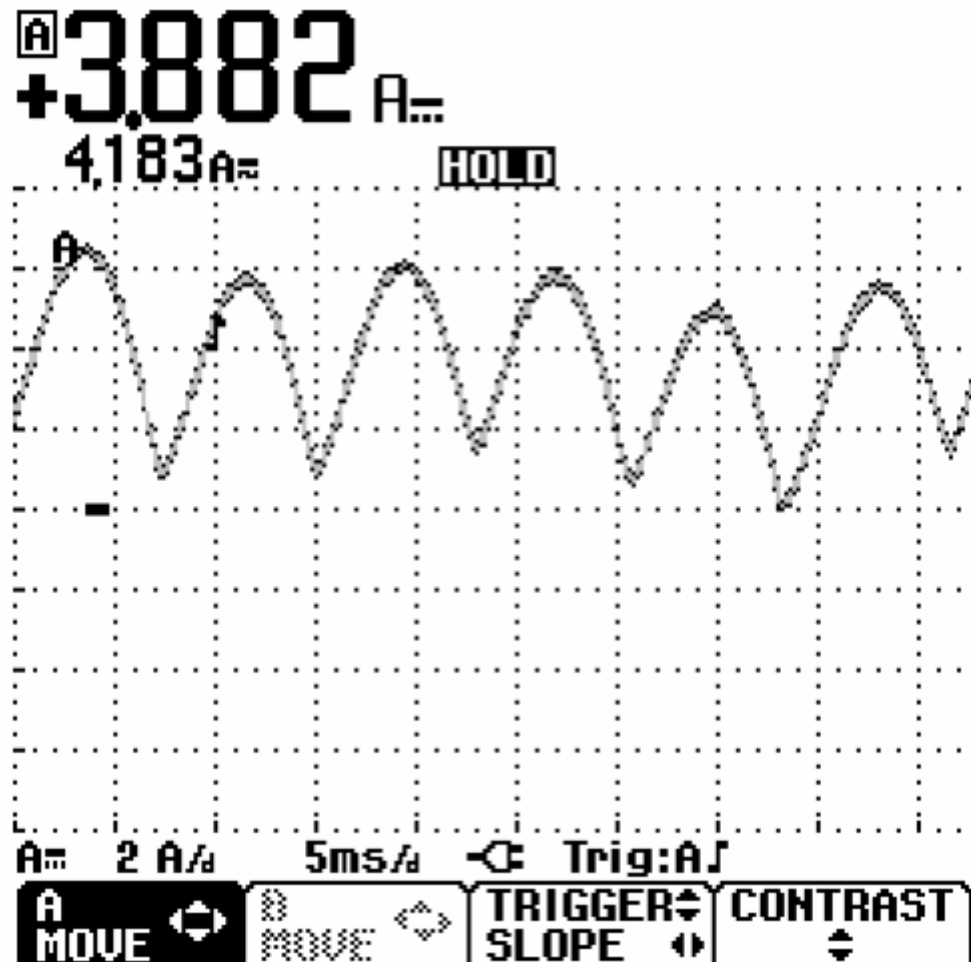
Kuva 51 24 V akun mittaustulosten kuvaajat

Kuvasta 52 näkee, että kappaleessa viisi laskettu pääjännite vastaa likipitään oskilloskoopilla mitattua arvoa. Kuvasta ilmenee myös, että jännite on lähes sinimuotoista, kuten sen on oletettukin olevan.



Kuva 52 Generaattorin pääjännitteen kuvaaja 24 V akustolla

Kuvasta 53 nähdään oskilloskoopilla otetun 6-pulssisillan tasasuunnatun virran kuvaaja. Kuvaajassa on aaltomaisuutta, joka johtuu siitä, että sillan jälkeen ei ole kelaa tasoittamassa virtaa.



Kuva 53 Generaattorin tasasuunnatun virran kuvaaja 24 V akustolla, 210 min⁻¹

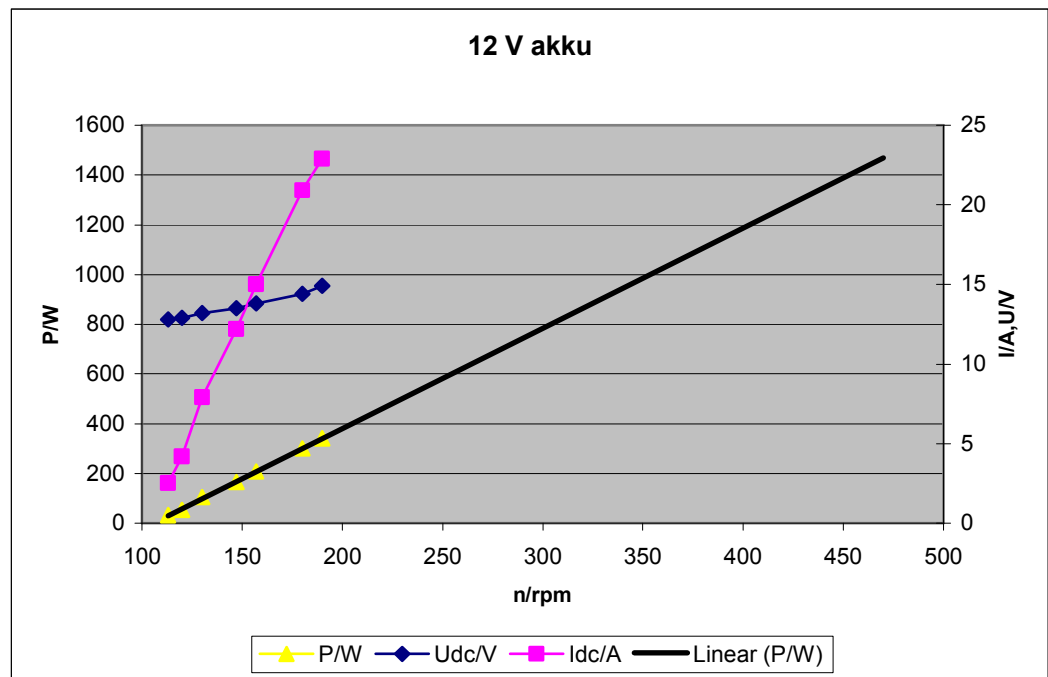
8.2 12 V akun lataus

Akkuna käytettiin hankitun akun kennoista kuusi kappaletta, jolloin akuston jännitteeksi saatiin 12 V. Taulukossa 5 on mittaustulokset sekoituskoneen mahdollistamaan maksiminopeuteen asti 12 V akustolla.

Taulukko 5 12 V akun testauksen tulokset

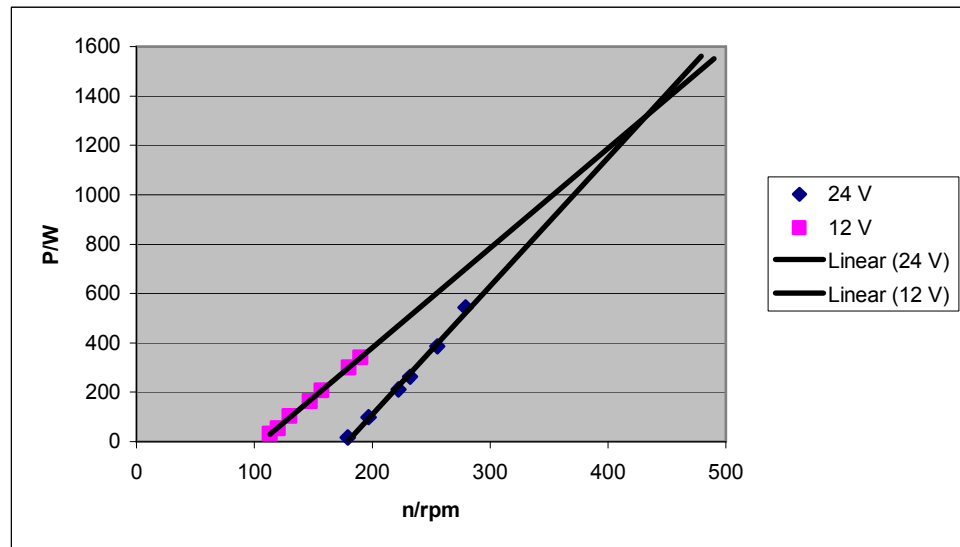
n/rpm	Udc/V	Idc/A	P/W
113	12,8	2,5	32
120	12,9	4,2	54,18
130	13,2	7,9	104,28
147	13,5	12,2	164,7
157	13,8	15	207
180	14,4	20,9	300,96
190	14,9	22,9	341,21

Kuvassa 54 on mittaustuloksista piirretyt kuvaajat, joista näkee, että jännitteen, virran ja tehon kuvaajat kasvavat lineaarisesti.



Kuva 54 12 V akun mittaustulosten kuvaajat

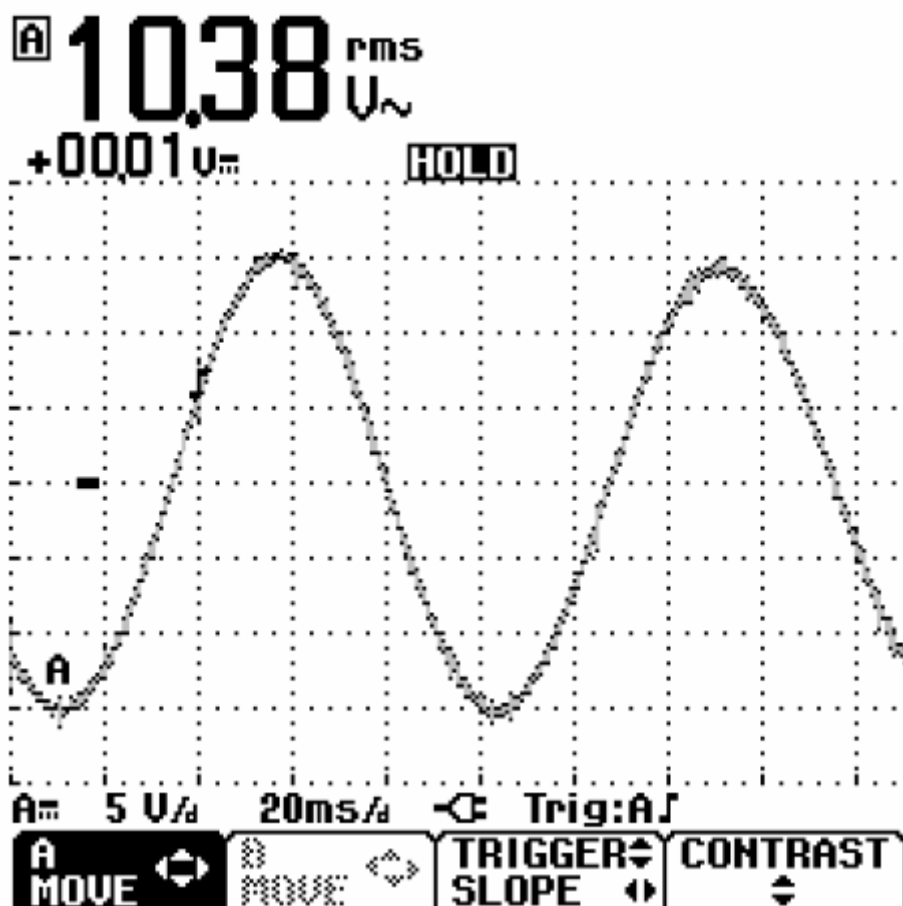
Kuvassa 55 on tehokuvaajat kummallakin akuston koolla. Kuvaajista näkee, että 24 V akustolla syntyy enemmän tehoa suurilla kierroksilla kuin 12 V akustolla.



Kuva 55 12 ja 24 V akkujen lataustehon kuvaajat nopeuden funktiona

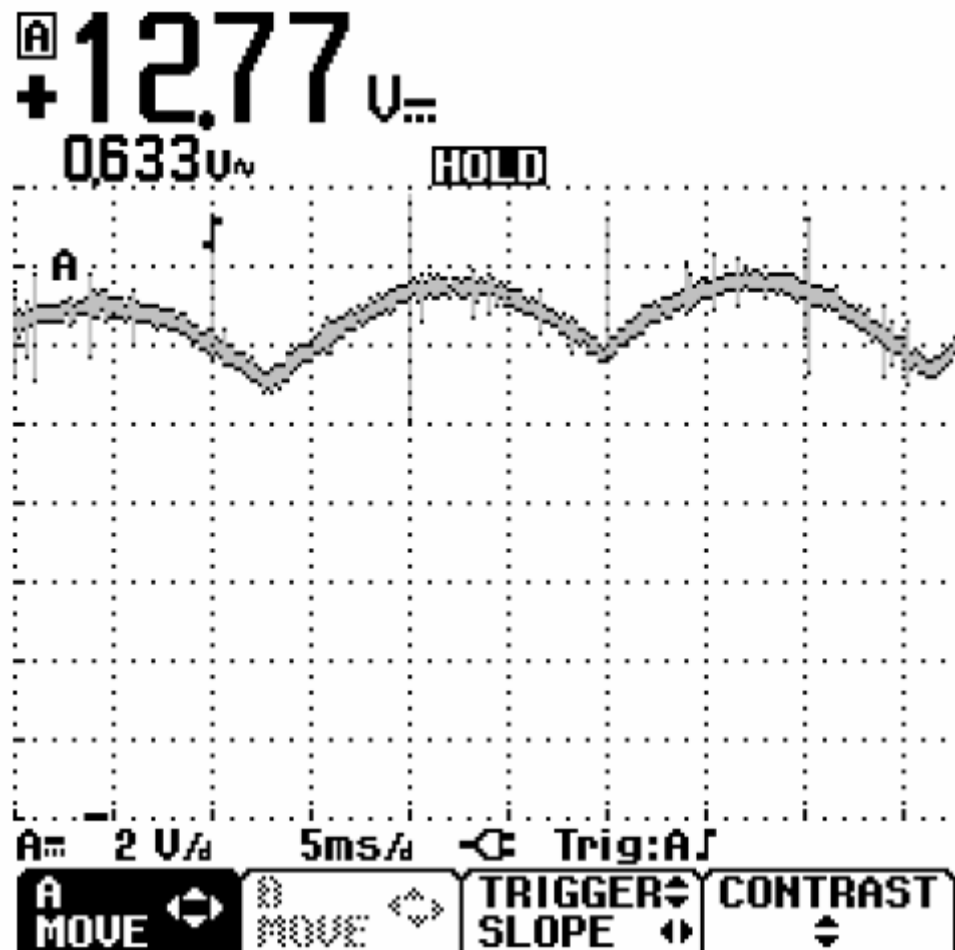
8.3 Tyhjäkäynti

Tyhjäkäyntimittauksesta otettiin vain kaksi oskilloskooppikuvaa (kuvat 56 ja 57), generaattorin pääjännitteen kuvaaja ja 6-pulssisillan tasasuunnatun jännitteen kuvaaja. Kuvasta 56 näkee, että tyhjäkäynnillä generaattorista saadaan sinimuotoisempaa jännitettä kuin 24 V akustolla.



Kuva 56 Generaattorin pääjännite tyhjäkäynnillä, 100 min^{-1}

Kuvasta 57 näkee, että tasasuunnatun jännitteen taso vaihtelee jonkin verran.



Kuva 57 Generaattorin tasasuunnattu tyhjäkäyntijännite pyörimisnopeudella 100 min⁻¹

9 LATAUSSÄÄDIN

9.1 Zen-logiikka

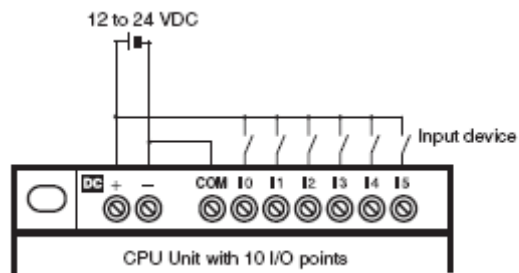
Lataussäätimenä käytetään Omronin ZEN 24/10 -logiikkaa (kuva 58). Logiikassa on kuusi sisääntuloa, joista kaksi on analogisia, ja neljä ulostuloa, joilla voi ohjata kontakteita. Analogiset sisääntulot mittaavat jännitettä välillä 0-10 V.

Säädin toimii niin, että logiikka ohjaa kontakteita kytkemään generaattorille lisää kuormaa. Kuormana on suunniteltu käytettäväksi invertterin perässä sähkölaitetta ja akun rinnalla kuorma-auton lamppuja.



Kuva 58 Zen pienoislogiikka

Kuvassa 59 on kytkentäohje sisääntulopuolelle. Sisääntuloporteista I4 ja I5 ovat analogisia, ja niiden vastus on noin 100 k Ω .



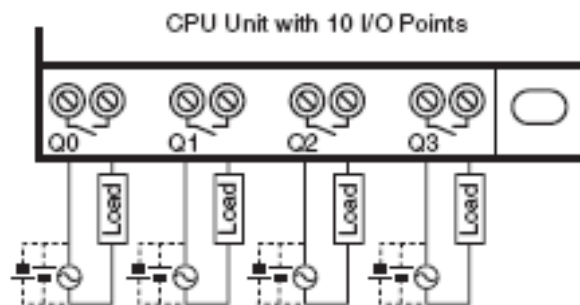
Kuva 59 Jännite ja sisääntulo-kytkentä

Taulukossa 6 on jännitteen jaolla laskettu logiikan analogisen sisääntulon jännite, kun siihen on kytketty 240 k Ω :n etuvastus. Etuvastuksen tarkoituksena on tuoda sisääntulon mittausta paremmalle käyttöalueelle.

Taulukko 6 Jännitejako logiikan ja 240 k Ω :n vastuksen välillä

U_d/V	U_1/V
19	5,59
20	5,88
21	6,18
22	6,47
23	6,76
24	7,06
25	7,35
26	7,65
27	7,94
28	8,24
29	8,53
30	8,82
31	9,12
32	9,41
33	9,71
34	10,00

Kuvassa 60 on kytkentäohje ulostulopuolelle.



Kuva 60 Lähtöjen kytkentä

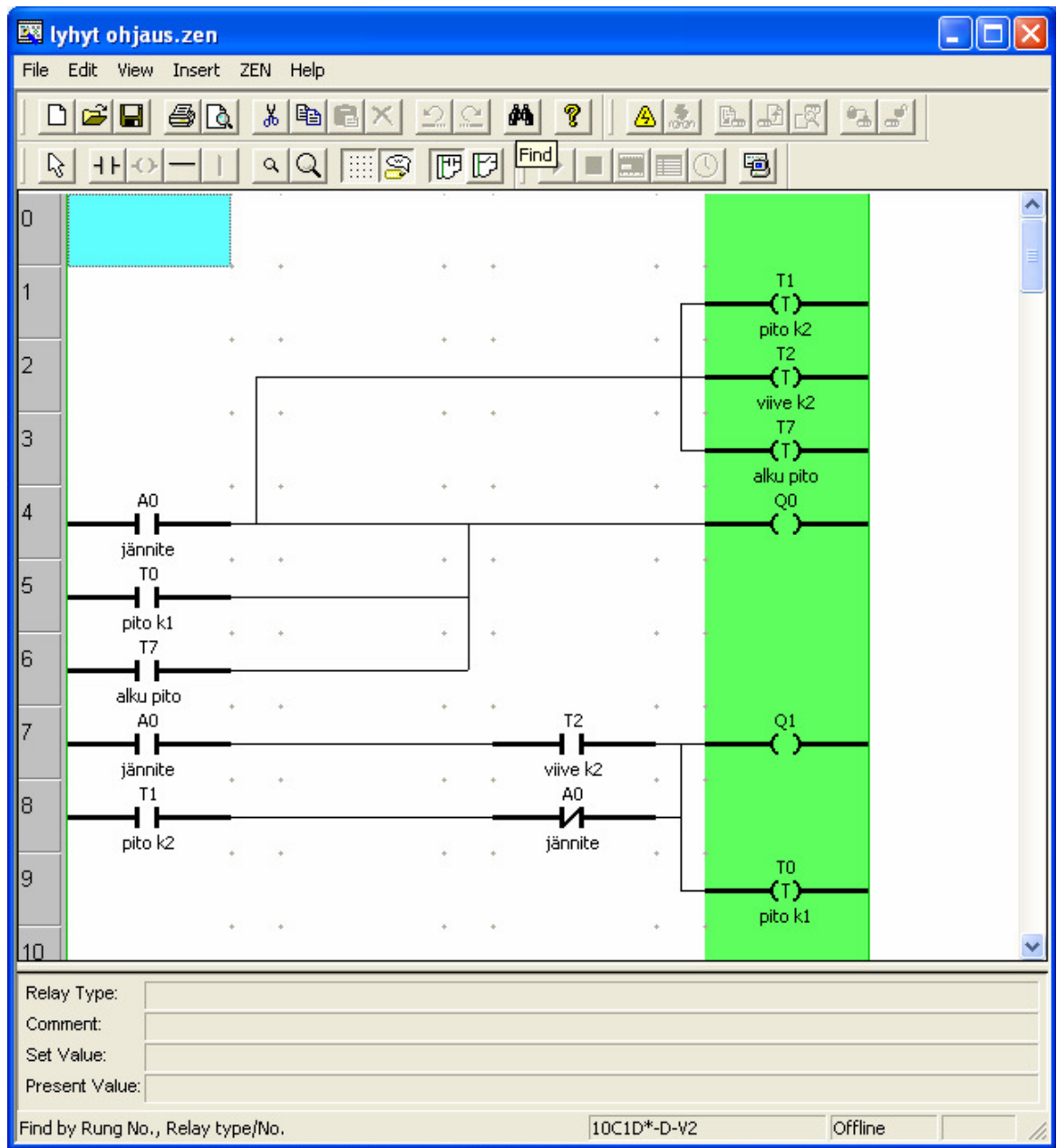
9.2 Ohjelma

Kuvassa 61 on Zen-ohjelman ohjelmointi-ikkuna ja suunniteltu lataussäätö-ohjelma, joka on tehty ladder-kielellä. Taulukossa 7 on ohjelmassa käytetty I/O-luettelo.

Taulukko 7 I/O-luettelo

A0	analoginen vertailu	jännitteen mittaus
T0	ajastin 0	pito-kytkin
T1	ajastin 1	pito-kytkin
T2	ajastin 2	viive-kytkin
T7	ajastin 7	pito-kytkin
Q0	ulostulo 0	kontaktorin ohjaus
Q1	ulostulo 1	kontaktorin ohjaus

Ohjelmassa A0 toiminta vertaa akun jännitettä toiminnalle annettuun arvoon välillä 0-10 V, verrattava todellinen arvo löytyy taulukosta 6. Kun vertaus toteutuu, niin T1, T2, T7 ja Q0 kytkeytyvät päälle. Tämä tarkoittaa sitä, että kellot käynnistyvät ja ensimmäinen kontaktori kytkeytyy ja pysyy päällä T7:lle merkityn ajan, silloin kun A0 vertaus menee nollassi. Jos vertaus pysyy totena, Q1 kytkeytyy T2:lle annetun ajan kuluttua. Q1 pysyy päällä T1:lle annetun ajan verran, jos vertaus menee nollassi. Tämän jälkeen Q0 pysyy vielä päällä T0:lle annetun ajan verran.



Kuva 61 Zen ohjelman ohjelmointi-ikkuna ja suunniteltu lataussäädön ohjelma

Zen-pienoislogiikan monimuotoisen käytön heikkoutena on ohjelmallinen analogisten vertailujen vähyys, sillä niitä on vain neljä kappaletta.

10 POTKURI

10.1 Potkurin suunnittelu

Potkuri päätettiin tehdä itse puusta kolmilapaisena. Potkuria suunniteltaessa sen hyötysuhteena laskuissa käytettiin 35 % /4/, jonka mainittiin joillakin keskustelufoorumeilla olevan optimistinen arvio omatekoiselle kolmilapaiselle potkurille. Potkurin tuulesta ottama teho lasketaan alla olevalla kaavalla. Tulokset on kirjattu taulukkoon 8, jossa potkurin tehot on merkitty potkurin säteellä.

$$P = 0,5 * C_p \rho_0 * A * v^3$$

P on teho (W)

C_p on hyötysuhde (%)

ρ_0 on ilmantiheys (1,23 kg/m³)

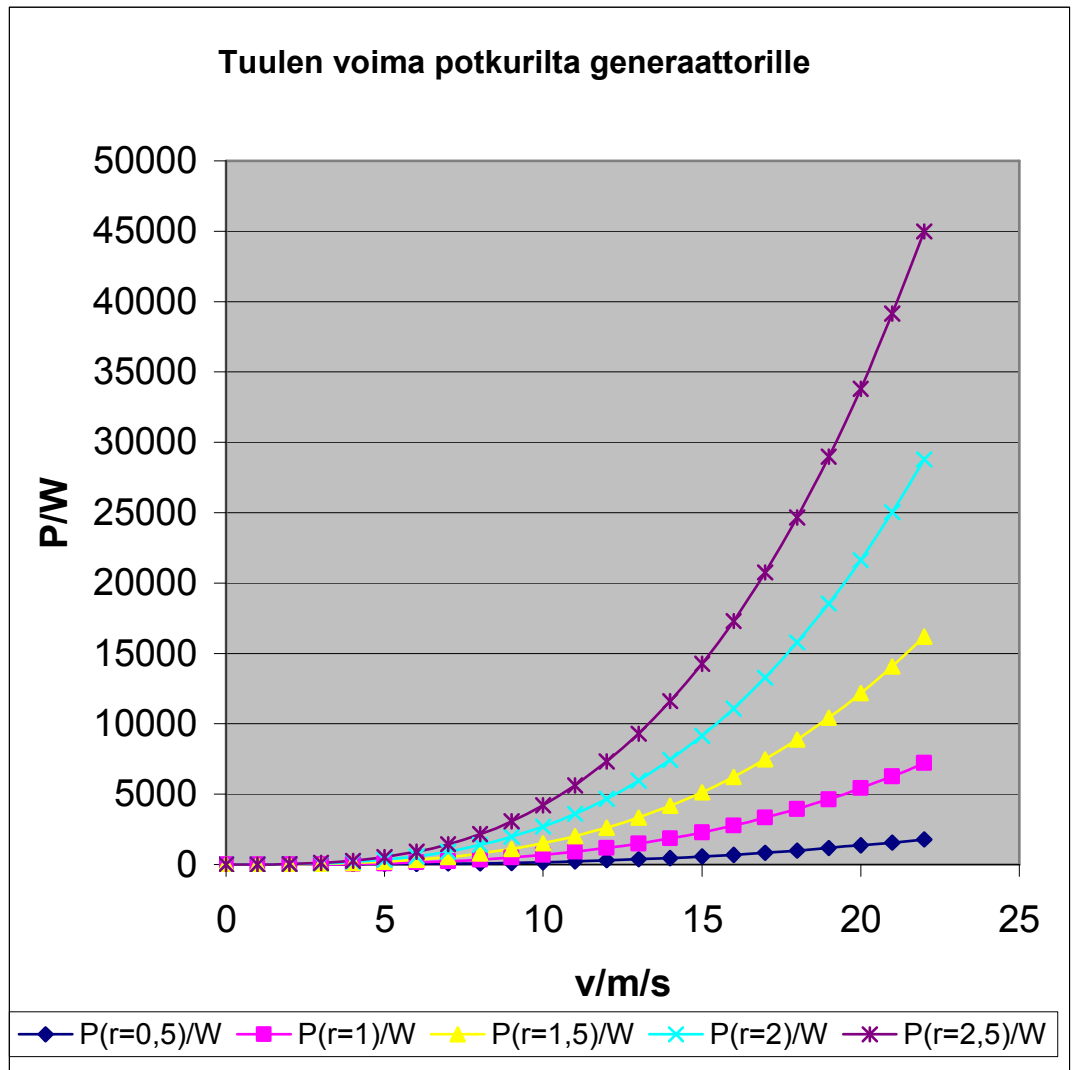
A on potkurin leikkauspinta ala (m²)

v on tuulen nopeus (m/s)

Taulukko 8 Tehotaulukko eri potkuri-mitoille 35 % hyötysuhteella

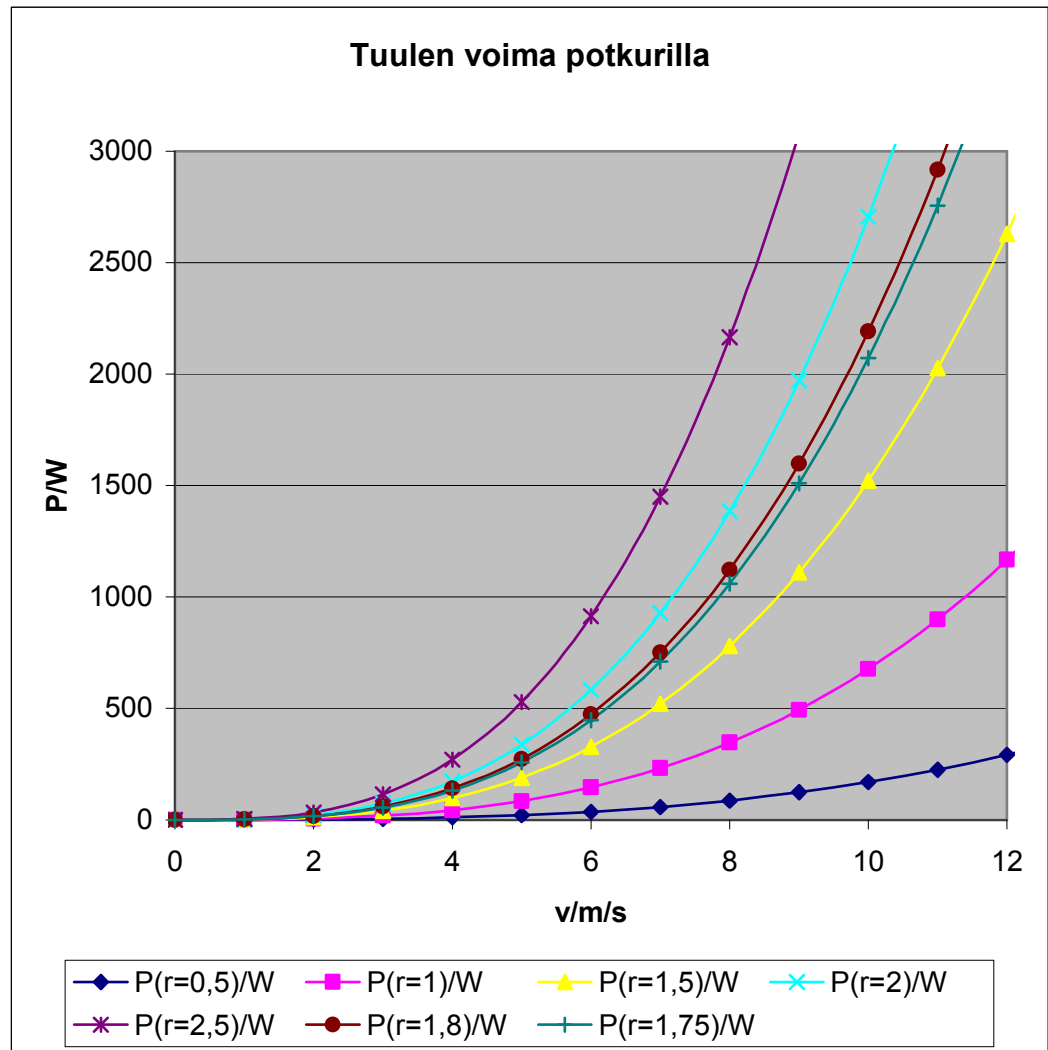
v/m/s	P(r=0,5)/W	P(r=1)/W	P(r=1,5)/W	P(r=2)/W	P(r=2,5)/W	P(r=1,8)/W	P(r=1,75)/W
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,17	0,68	1,52	2,70	4,23	2,19	2,07
2	1,35	5,41	12,17	21,64	33,81	17,53	16,57
3	4,56	18,26	41,08	73,03	114,11	59,16	55,92
4	10,82	43,28	97,38	173,11	270,49	140,22	132,54
5	21,13	84,53	190,19	338,11	528,30	273,87	258,87
6	36,52	146,07	328,65	584,26	912,91	473,25	447,32
7	57,99	231,95	521,88	927,78	1449,66	751,51	710,34
8	86,56	346,23	779,01	1384,91	2163,93	1121,78	1060,33
9	123,24	492,97	1109,18	1971,88	3081,06	1597,22	1509,72
10	169,06	676,23	1521,51	2704,91	4226,42	2190,98	2070,95
11	225,01	900,06	2025,13	3600,24	5625,37	2916,19	2756,43
12	292,13	1168,52	2629,17	4674,09	7303,26	3786,01	3578,60
13	371,42	1485,67	3342,76	5942,69	9285,45	4813,58	4549,87
14	463,89	1855,57	4175,03	7422,28	11597,31	6012,04	5682,68
15	570,57	2282,27	5135,10	9129,08	14264,18	7394,55	6989,45
16	692,46	2769,83	6232,12	11079,32	17311,43	8974,25	8482,60
17	830,58	3322,31	7475,19	13289,23	20764,42	10764,28	10174,57
18	985,94	3943,76	8873,46	15775,04	24648,50	12777,78	12077,77
19	1159,56	4638,25	10436,05	18552,99	28989,04	15027,92	14204,63
20	1352,46	5409,82	12172,10	21639,29	33811,39	17527,83	16567,58
21	1565,64	6262,55	14090,73	25050,18	39140,91	20290,65	19179,05
22	1800,12	7200,47	16201,07	28801,90	45002,96	23329,54	22051,45

Kuvassa 62 on joidenkin taulukon 8 tehojen perusteella tehtyjä tehokäyriä. Käyristä näkee, että teho kasvaa kolmanteen potenssiin verrannollisena tuulen nopeuteen nähden.



Kuva 62 Tehokuvaajat erimittaisille potkureille

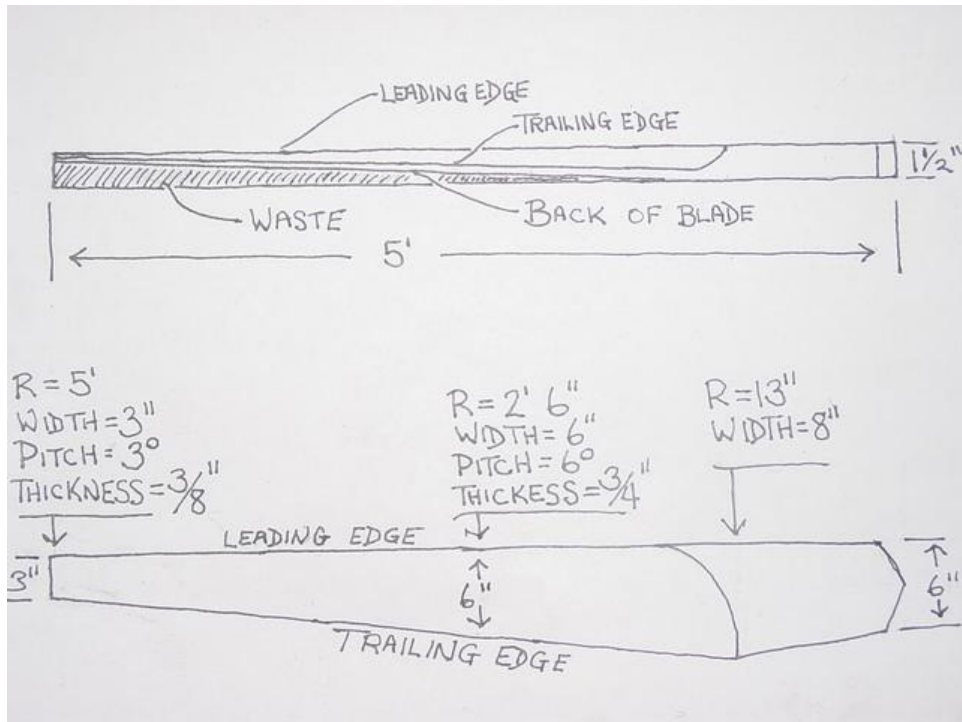
Kuvassa 62 tuulen voimakkuus on piirretty Suomessa harvoin esiintyviin tuulen voimakkuuksiin asti, joten tarkempi tehokuvaaja pienemmille tuulille on kuvassa 63. Kuvasta näkee, että potkurin teho nousee yli yhden kilowatin ennen 10 m/s yli 1,5 metrisillä lavoilla. Tämän ja tutkittujen internet-sivujen perusteella potkurista päätettiin tehdä potkuri, jonka lapojen pituus on 1,8 m, jotta se tuottaisi 1 kW tehon noin 8 m/s:n tuulessa.



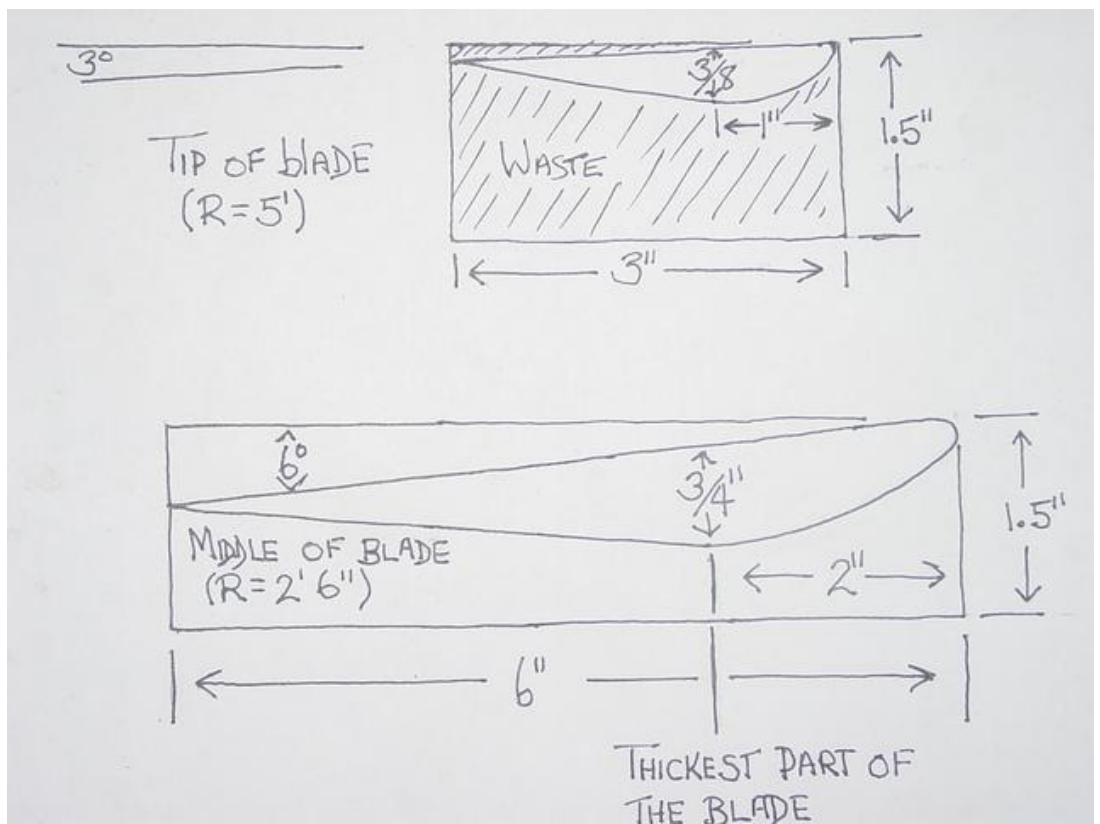
Kuva 63 Tehokuvaajat

10.2 Potkurin rakentaminen

Potkurin rakentamisessa ohjeena käytettiin kuvia 64 ja 65 kertomalla kaikki kuvien mitat 1,4:llä. Kuvissa on kymmenen jalan potkurin viiden jalan mittaisten lapojen veisto-ohjeet profiilista ja poikkileikkauksesta nähden.



Kuva 64 Potkurin profiilin veisto-ohje /5/



Kuva 65 Potkurin poikkileikkauksen veisto-ohje /5/

Lapojen puumateriaalina päätettiin käyttää kertopuuta (kuva 66), jotta lapojen mahdollinen kiertyminen ja halkeileminen olisi mahdollisimman vähäistä. Lapojen etupuoli jyrättiin alajyrsimellä käyttäen apuna puisia ohjaimia, jotka pidettiin paikoillaan, kunnes kaikki lavat oli jyrätty. Takapuoli leikattiin vannesahalla suoraksi ja lapojen samankaltaisuus varmistettiin hiomalla ja punnitsemalla lavat niin, että painovaihtelut olivat alle 2 g. Lopuksi lavat maalattiin vielä ulkokäyttöön tarkoitetulla erikoismaalilla.

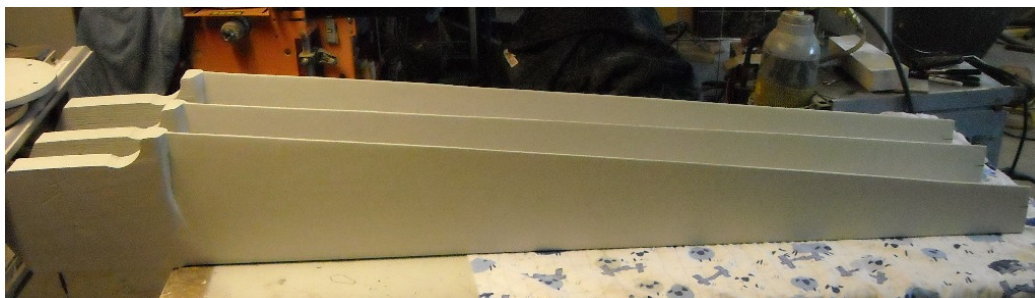


Kuva 66 Kolme 2 metristä kertopuuta

Kuvissa 67 ja 68 on valmiit maalatut potkurin lavat.

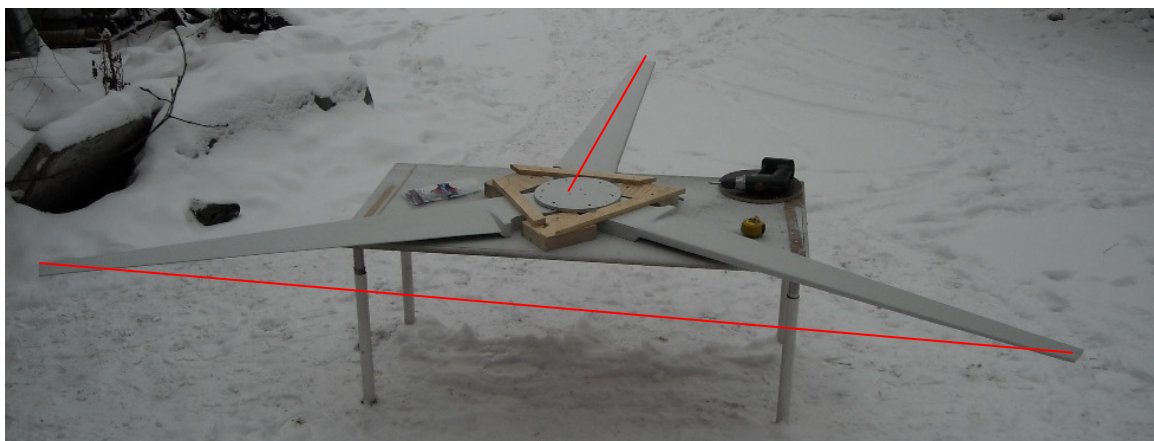


Kuva 67 Potkurin lapa päästä katsottuna



Kuva 68 Potkurin lavat

Kuvassa 69 potkuri on kokoamispöydällä. Potkurin kokoamisessa mitattiin kuvassa olevien viivojen mukaisia mittoja kaikista lavoista niin, että potkuri saatiin symmetriseksi.



Kuva 69 Potkuri kokoamispöydällä

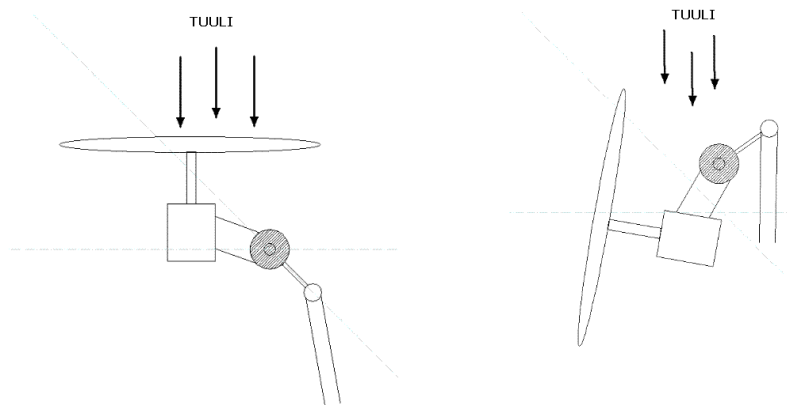
Kuvassa 70 on valmis potkuri takaa katsottuna.



Kuva 70 Valmis potkuri takaa katsottuna

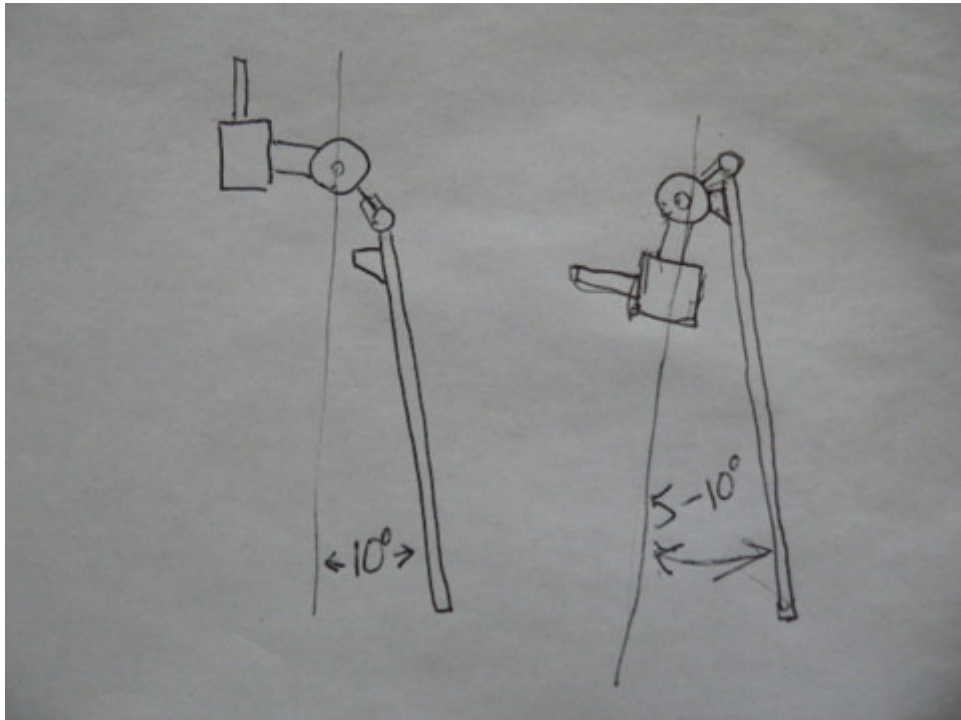
11 MYRSKYSUOJAUS

Myrskysuojaus toteutetaan peräsimmellä, jonka toimintaperiaate selviää kuvista 71–74. Ohjeena peräsimmelle löytyi, että sen rungon pituuden tulee olla yhtä suuri kuin potkurin lavan pituus $/5/$. Kuvassa 71 on peräsimen toiminnan kuvaaja tuulessa.



Kuva 71 Myrskysuojauksen toiminta tuulessa/1/

Kuvassa 72 on peräsimen toiminnan varmistamiseksi tarvittavien kulmien suuruuksia, joita ovat peräsimen suoran asennon kulma potkuriin nähden ja peräsimen myrskyasennon kulma potkuriin nähden.



Kuva 72 Peräsimen kulman rajoitus ohje /5/

Kuvissa 73 ja 74 on keskeneräinen peräsimen runko kiinni generaattorissa suorassa ja myrskyasennossa. Kuvista näkee, kuinka myrskyssä peräsimen pitää nousta vaakasuorasta asennosta yläviistoon, jolloin myös painovoima vaikuttaa peräsimeen.



Kuva 73 Peräsimen runko myrskyasennossa



Kuva 74 Peräsimen runko suorana

Kuvassa 75 on peräsimen levy kiinnitettyä peräsimen runkoon.



Kuva 75 Peräsimen levy kiinni peräsimessä

Kuvissa 76 ja 77 on valmis peräsin ääri-asennoissaan kiinni generaattorissa.



Kuva 76 Peräsin suorana



Kuva 77 Peräsin myrskyasennossa

Peräsimen toimintaa pitää vielä tarkistaa, jotta se toimii halutulla tavalla tietyllä tuulella. Toimintaa säädetään tuulen nopeuden mukaan muuttamalla peräsimen levyn pinta-alaa ja painoa.

12 MASTO

Maston runkorakenteena suunnitellaan käytettäväksi noin 15 m mittaista männyn runkoa, johon lisättäisiin vielä muutama metri metallirunkoa generaattorin kiinnitystä varten. Kuvissa 78 ja 79 on valmis tuuligeneraattori paikallaan testimastossa.



Kuva 78 Testimasto



Kuva 79 Tuuligeneraattori valmiina

13 KUSTANNUKSET

Taulukossa 9 on pääasialliset materiaalikustannukset. Taulukosta puuttuvat vielä ainakin kontaktorit, kaapelit ja harusvaijerit. Näin ollen tuulivoimalan hinta tulisi periaatteessa olemaan kokonaisuudessaan noin 1500 €. Kun vertaa hintaa Suomen markkinoilla oleviin 1 kW pientuulivoimaloihin havaitsee, että itse rakennettu laitteisto on ihan kilpailukykyinen.

Esimerkiksi tuulivoimala.com WP1000W-voimala maksaa 2100 € ilman akkua ja mastoa. St1:n St1 Haukka 1000 maksaa 1750 € ilman akkua. Kodin energian Tuulivoimalapaketti 1000W maksaa 2490 € ilman akkua.

Taulukko 9 Kustannustaulukko

Tuote	Hinta/€
Magneetit	
<i>Magneetit 25 kpl</i>	177,07
<i>UPS kuljetus</i>	212,00
<i>tulli ja palvelumaksut</i>	50,17
Käämi lanka	65,00
Polestrihartsi 3x1kg	29,70
Hartsinkovete 4x20g	9,40
lasikuitumatto 1m ²	4,90
topgoat 1kg	11,90
Virta- ja jännitemittari	75,00
kertopuu 6m	70,00
6 kpl diodeja	60,00
Omron Zen	240,00
akku	50,00
kontaktori 2 kpl	40,00
invertteri	200,00
YHT.	1295,14

14 TUULIVOIMALAN JATKOKEHITYS

Tuulivoimalan yhtenä kehitysmahdollisuutena on tehdä Zen logiikalla ohjaus, joka vaihtaa kuorman syötön generaattorilta verkkoon silloin, kun generaattorin akustosta loppuu teho, ja takaisin, kun tehoa riittää. Generaattorin tehon tuottoa voisi myös lisätä tekemällä generaattoriin kolmannen roottorin ja toisen samanlaisen staattorin.

LÄHDELUETTELO

1. Ilmatieteen laitos [www-sivu]. [viitattu 30.3.2009] Saatavissa:
http://www.fmi.fi/tutkimus_yhteiskunta/yhteiskunta_9.html
2. Tommi Ollikainen, Tuulivoimalan suunnittelu ja konstruointi.
Sähkötekniikan opinnäytetyö, Savonia-ammattikorkeakoulu tekniikka
Kuopio, 2008.
3. IMS Magnet Trading, [www-sivu]. [viitattu 16.3.2009] Saatavissa:
<http://www.imstrading.com/magnet-formula.html#sr>
4. [www-sivu]. [viitattu 16.2.2009] Saatavissa:
<http://www.dongrays.com/burningman2008/windbasics.html>
5. Otherpower [www-sivu]. [viitattu 10.3.2009] Saatavissa:
<http://www.otherpower.com/blades.html>
6. Otherpower [www-sivu]. [viitattu 10.1.2009] Saatavissa:
http://www.otherpower.com/otherpower_wind.shtml