



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOONAS RANTANEN
INKREMENTAALIPULSSIAN TURIN KÄYTTÖ NOPEASTI PYÖRI-
VÄSSÄ OIKOSULKUMOOTTORISSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Teuvo Suntio
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 1. helmi-
kuuta 2017

TIIVISTELMÄ

JOONAS RANTANEN: Inkrementaalipulssianturin käyttö nopeasti pyörivässä oikosulkumoottorissa
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 72 sivua
Elokuu 2017
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Tehoelektroniikka
Tarkastaja: professori Teuvo Suntio

Avainsanat: pulssianturi, inkrementaali, optinen pulssianturi, magneettinen pulssianturi

Diplomityön tavoitteena oli tutkia eri pulssianturitekniikoiden käyttöä nopeasti pyörivässä oikosulkumoottorissa nopeuden mittauksessa. Työssä nopeasti pyörivä moottori on määritelty maksiminopeuden perusteella, joka on 9000 rpm. Työssä selvitettiin nostinkäytössä olevan sähkömoottorikäytön toimintaperiaate sekä takaisinkytketyssä säädössä tarvittavan pulssianturin käyttötarve. Erityistä tarkkuutta vaativissa nostinkäytöissä tarvitaan takaisinkytketty säätömenetelmä moottorin säätöä varten, jolloin takaisinkytkentänä taajuusmuuttajalle tuodaan pulssianturin mittaama moottorin nopeus.

Työssä esiteltiin pulssiantureiden toimintaperiaatteet, jotka voidaan jakaa inkrementaali- ja absoluuttipulssiantureihin. Tämän työn kannalta inkrementaalianturi on tärkein näistä, sillä se on riittävä nopeuden mittausta varten. Se on myös edullisempi verrattuna absoluuttianturiin. Pulssianturit jaetaan toteutusteknologian perusteella optisiin, magneettisiin, kapasitiivisiin ja mekaanisiin pulssiantureihin. Näistä yleisimmin moottorisäädössä käytössä olevat ovat optinen ja magneettinen pulssianturi.

Työssä vertailtiin optista ja magneettista pulssianturia nopeasti pyörivässä moottorissa käytännön mittausten perusteella. Mittaukset suoritettiin testijärjestelyssä, jossa ohjattiin taajuusmuuttajalla oikosulkumoottoria open-loop säädöllä, jotta pulssiantureiden mitaustarkkuus verrattuna moottorin nopeuteen voitiin määrittää. Anturien ulostulosignaalit vietiin taajuusmuuttajalle 50 metrin häiriösuojatulla signaalikaapelilla. Mittauksissa todennettiin antureiden toimintakykyä koko nopeusalueella sekä eri suuruisilla kaapelipituuksilla. Lisäksi testattiin antureiden sähköisten häiriöiden kestoisuutta.

Mittausten perusteella magneettiseen mittaukseen perustuva pulssianturi suoriutui kaikista mittauksista hyväksytysti. Optisen pulssianturin mitaustarkkuus oli samaa luokkaa magneettianturin kanssa 50 metrin kaapelilla, mutta 200 metrin kaapelipituudella optisen anturin virransyöttökyky ei ollut riittävä ja ulostulosignaalista alkoi pudota pulsseja pois. Hintatasoltaan vertailuun valittu magneettianturi oli noin 30 % kalliimpi kuin optinen anturi. Käyttökohteessa tarvittavan signaalikaapelipituuden ollessa maksimissaan 50 metriä voi kyseinen optinen pulssianturi olla mahdollinen vaihtoehto. Antureiden elinikää tai mekaanista kestävyyttä ei työssä testattu.

ABSTRACT

JOONAS RANTANEN: Incremental rotary encoder in high speed induction motor
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 72 pages
August 2017
Master's Degree Programme in Electrical Engineering
Major: Power Electronics
Examiner: Professor Teuvo Suntio

Keywords: rotary encoder, incremental, optical encoder, magnetic encoder

Goal of the master thesis was to study different kind of rotary encoder technologies, which can be used with high speed induction motor for speed measuring. In the thesis, high speed induction motor is determined according to the maximum speed of the motor, which is 9000 rpm. In the thesis, it was studied operation principles of the electrical drive systems in hoist application and requirements for the rotary encoder in closed-loop control system. In high accuracy and smart feature hoists require electrical drive system with closed-loop control, when measured speed information of the rotary encoder is needed for the frequency converter.

Operation principles of the different rotary encoder were presented in the thesis, which can be divided into incremental and absolute rotary encoders. Incremental encoder is adequate for speed and direction measurement. In addition, incremental encoders are less expensive comparing to the absolute encoders, which are usually used for position and angle measurement. Rotary encoders can be categorized regarding the technology in optical, magnetic, capacitive and mechanical encoders. The most used rotary encoder technologies in motor speed measuring are optical and magnetic ones.

In this thesis, a comparison between two rotary encoders was performed and for the comparison practical measurements were utilized to verify the performance of the selected encoders. One optical and one magnetic encoder were selected for the comparison. Measurements were done with test setup, which consisted of high speed induction motor that were controlled with frequency converter in open-loop control mode. By using open-loop control mode, it was possible to compare the encoder's measured speed value and motor's real speed value. In tests, encoders' outputs were connected to 50 m shielded signal cable. With measurements, the performance of the encoder was tested in whole speed range up to 9000 rpm with different cable lengths. In addition, electrical noise tolerance was tested with encoders.

According to the measurement results, the magnetic encoder passed all the implemented tests. Optical encoder could measure speed with 50 m cable, but in 200 m cable its current supply capability was not sufficient causing loss of some of the output pulses. The selected magnetic encoder was 30 % more expensive than optical one. From the cost point of view the optical encoder could be used, if signal cable length is limited to 50 meters. Encoder's mechanical or lifetime tests were limited out of this thesis.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Konecranes Global Oy:n tutkimusosastolle kevään ja kesän 2017 aikana. Työn tarkastajana on toiminut professori Teuvo Suntio ja työn ohjaajana DI Kimmo Aarnio.

Kiitän Kimmo Aarniota ja Lauri Hietasta mielenkiintoisen aiheen esittelystä sekä avusta työn aikana. Kiitos myös esimiehilleni Teemu Puustiselle ja Matti Kemppaiselle mahdollisuudesta tehdä tämä työ sekä neuvoista työn aikana.

Suuri kiitos tyttöystävälleni Hennalle sekä vanhemmilleni kannustuksesta ja tuesta koko opiskelujeni ajan.

Hämeenlinnassa, 30.6.2017

Joonas Rantanen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SÄHKÖMOOTTORIKÄYTTÖ NOSTIMESSA	3
2.1	Nostimen rakenne.....	3
2.2	Oikosulkumoottorin rakenne ja toimintaperiaate	4
2.3	Nopeasti pyörivä moottori.....	6
2.4	Taajuusmuuttaja	8
2.4.1	Taajuusmuuttajan rakenne ja toimintaperiaate	8
2.4.2	Vaihtosähkömoottorin säätömenetelmät.....	10
2.5	Pulssianturi takaisinkytkennässä	13
2.6	Jarrun rakenne ja toimintaperiaate	14
3.	PULSSIANTURITEKNIikka	16
3.1	Inkrementaalianturi	17
3.2	Absoluuttianturi.....	21
3.3	Magneettinen pulssianturi	22
3.4	Pyörimisnopeuden laskenta.....	26
4.	PULSSIANTURIN OMINAISUUDET.....	30
4.1	Ulostulosignaali-topologiat	30
4.2	Pulssitaajuus ja pyörimisnopeus.....	32
4.3	Signaalin siirto.....	34
4.4	Pulssianturin virransyöttökyky.....	35
4.5	Häiriötekijät ja virhelähteet	36
4.5.1	Kaapelin kapasitanssi	36
4.5.2	Ulkoiset magneettikentät.....	37
4.5.3	Laakerivirrat.....	37
4.6	Mekaaniset ominaisuudet.....	38
4.6.1	Kiinnitys ja kotelointi.....	39
4.6.2	Asennettavuus ja huolto	40
5.	PULSSIANTURIMITTAUKSET.....	41
5.1	Mittausjärjestely	42
5.2	Mittaukset.....	43
5.2.1	Pulssianturin toiminta ja mittaustarkkuus	43
5.2.2	Pulssisignaalin laatu	44
5.2.3	Virran mittaus	44
5.2.4	Sähköisten häiriöiden kestoisuus	45
6.	TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI.....	46
6.1	Hyvyyskriteeristön määrittely	46
6.2	Pulssianturi 1:n mittaustulokset	47
6.2.1	Pulssianturin toiminta ja mittaustarkkuus.....	48
6.2.2	Pulssisignaalin laatu	49
6.2.3	Pulssianturin virransyöttökyky ja -kulutus	53

6.2.4	Sähköisten häiriöiden kestoisuus	55
6.3	Pulssianturi 2:n mittaustulokset	56
6.3.1	Pulssianturin toiminta ja mittaustarkkuus	56
6.3.2	Pulssisignaalin laatu	57
6.3.3	Pulssianturin virransyöttökyky ja -kulutus	61
6.3.4	Sähköisten häiriöiden kestoisuus	63
6.4	Tulosten analysointi	64
7.	YHTEENVETO	68
	LÄHTEET	70

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Sähkömoottori ja sen akseliin kytketty pulssianturi. [1]</i>	3
Kuva 2.	<i>Oikosulkumoottorin häkkikäämitys, johon kohdistuu voima pyörivän magneettikentän ansiosta. [muokattu lähteestä 4]</i>	5
Kuva 3.	<i>Oikosulkumoottorin momenttikäyrät eri pyörimisnopeusalueilla. [muokattu lähteestä 6]</i>	8
Kuva 4.	<i>Taajuusmuuttaja koostuu 3 osakokonaisuudesta: tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. [muokattu lähteestä 7]</i>	9
Kuva 5.	<i>Lohkokaavio taajuusmuuttajaohjattusta sähkömoottorikäytöstä. [muokattu lähteestä 8]</i>	10
Kuva 6.	<i>Vaihtosähkömoottorin säätömenetelmien jaottelu.</i>	11
Kuva 7.	<i>Skalaarisäädön peruseriaatetta kuvaava lohkokaavio. [muokattu lähteestä 10]</i>	11
Kuva 8.	<i>Pulssinleveysmodulointia havainnollistava kuva.</i>	12
Kuva 9.	<i>Lohkokaavio vuo-orientoidusta vektorisäädöstä. [muokattu lähteestä 10]</i>	12
Kuva 10.	<i>Lohkokaavio DTC-säädön toimintaperiaatteesta. [muokattu lähteestä 10]</i>	13
Kuva 11.	<i>Magneettilevyjarrun rakenne [muokattu lähteestä 2]</i>	14
Kuva 12.	<i>Pulssiantureiden luokittelu toimintaperiaatteen ja toteutusteknologian perusteella.</i>	17
Kuva 13.	<i>Optisen pulssianturin toimintaperiaate havainnollistettuna. [15]</i>	18
Kuva 14.	<i>Inkrementaalianturin kolmen kanavan A, B ja Z ulostulosignaalit [17].</i>	20
Kuva 15.	<i>Gray-koodausta käyttävä absoluuttipulssianturin kiekko [18].</i>	21
Kuva 16.	<i>Magneettianturi, joka koostuu magneettirenkaasta ja anturilukijasta. [muokattu lähteestä 20]</i>	22
Kuva 17.	<i>Kaksi tapaa hyödyntää Hall-antureita pyörimisliikkeen mittauksessa. [muokattu lähteestä 23]</i>	25
Kuva 18.	<i>Magneettirenkaan napojen synnyttämät magneettikentät läpäisevät Hall-anturit. [muokattu lähteestä 25]</i>	26
Kuva 19.	<i>Taajuusmittaukseen perustuvan nopeuden laskennassa käytetyt pulssisignaalit ja näytteenoton jaksonaika havainnollistettuna [muokattu lähteestä 28].</i>	28
Kuva 20.	<i>Korkeataajuinen kellosignaali ja pulssisignaalit. [muokattu lähteestä 28]</i>	29
Kuva 21.	<i>Vuorovaihevahvistintopologia, joka tuottaa HTL-jännitetason ulostulosignaalia. [muokattu lähteestä 29]</i>	31
Kuva 22.	<i>Avokollektoritopologian periaatekaavio. [muokattu lähteestä 30]</i>	31
Kuva 23.	<i>Sin/Cos -ulostulosignaali topologian periaatekaavio. [21]</i>	32

Kuva 24.	<i>Pulssianturin ulostulotaajuuden arvoja pyörimisnopeuden funktiona eri pulssilukumäärillä.</i>	33
Kuva 25.	<i>Pulssianturimittauksissa käytetty testijärjestely.</i>	42
Kuva 26.	<i>Pulssianturi 1:n kiinnitys mittauksia varten.</i>	47
Kuva 27.	<i>Pulssianturin 1 mittaama pyörimisnopeus (sininen) ja moottorin nopeus (vihreä) suuntaan S1.</i>	48
Kuva 28.	<i>Pulssianturin 1 mittaama nopeus moottorin pyöriessä maksiminopeudella.</i>	49
Kuva 29.	<i>Pulssianturin 1 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 10 Hz nopeudella tilanteessa 1.</i>	50
Kuva 30.	<i>Pulssianturin 1 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 300 Hz nopeudella tilanteessa 1.</i>	50
Kuva 31.	<i>Pulssianturin 1 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 10 Hz nopeudella tilanteessa 2.</i>	51
Kuva 32.	<i>Pulssianturin 1 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 300 Hz nopeudella tilanteessa 2.</i>	51
Kuva 33.	<i>Pulssianturin 1 mittaama nopeus (sininen) ja moottorin todellinen nopeus (vihreä) tilanteessa 2 300 Hz nopeudella.</i>	52
Kuva 34.	<i>Pulssianturin 1 A+(sininen) ja B+(punainen) pulssisignaalit sekä syöttövirta (vihreä) 10 Hz nopeudessa.</i>	54
Kuva 35.	<i>Pulssianturin 1 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit sekä syöttövirta (vihreä) nopeudessa 300 Hz.</i>	54
Kuva 36.	<i>Pulssianturin mittaama nopeus (sininen) ja moottorin todellinen nopeus (vihreä).</i>	55
Kuva 37.	<i>Pulssianturi 2 kiinnitettynä moottorin akseliin mittauksia varten.</i>	56
Kuva 38.	<i>Pulssianturin 2 mittaama pyörimisnopeus (sininen) ja moottorin nopeus (vihreä) suuntaan S1.</i>	57
Kuva 39.	<i>Pulssianturin 2 mittaama nopeus moottorin pyöriessä maksiminopeudella.</i>	57
Kuva 40.	<i>Pulssianturin 2 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 10 Hz nopeudella tilanteessa 1.</i>	58
Kuva 41.	<i>Pulssianturin 2 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 300 Hz nopeudella tilanteessa 1.</i>	58
Kuva 42.	<i>Pulssianturin 2 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 10 Hz nopeudella tilanteessa 2.</i>	59
Kuva 43.	<i>Pulssianturin 2 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 300 Hz nopeudella tilanteessa 2.</i>	59
Kuva 44.	<i>Pulssianturin 2 mittaama nopeustietoa (sininen) ja moottorin nopeus (vihreä).</i>	60
Kuva 45.	<i>Pulssianturi 2:n A+ ja B+ kanavien pulssisignaalit sekä virtakäyrä tilanteessa 2 10 Hz nopeudella.</i>	62

Kuva 46.	<i>Pulssianturi 2:n A+ ja B+ kanavien pulssisignaalit sekä virtakäyrä tilanteessa 2 300 Hz nopeudella.....</i>	<i>62</i>
Kuva 47.	<i>Pulssianturin mittaama nopeus (sininen) ja moottorin todellinen nopeus (vihreä).....</i>	<i>63</i>

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.	<i>Moottorin pyörimisnopeuksien arvoja eri napapariluvuilla ja syöttöjännitteen taajuuksilla.....</i>	<i>7</i>
Taulukko 2.	<i>Vertailuun valittujen pulssiantureiden tärkeimmät tekniset tiedot.....</i>	<i>41</i>
Taulukko 3.	<i>Pulssiantureiden vertailua varten tehty hyvyyskriteeristö.</i>	<i>46</i>
Taulukko 4.	<i>Kahden eri tilanteen pulssisignaalien perusteella lasketut nousu- ja laskuajat.</i>	<i>52</i>
Taulukko 5.	<i>Pulssianturin 2 syöttöjännitteet, maksimivirrat, keskiarvovirrat ja tehot kahdessa eri nopeudessa tilanteessa 2.</i>	<i>53</i>
Taulukko 6.	<i>Pulssianturin 1 kanavan A+ maksimivirrat tilanteissa 1 ja 2.....</i>	<i>55</i>
Taulukko 7.	<i>Pulssianturin 1 kanavan A+ maksimivirta häiriökondensaattori kytkettynä.....</i>	<i>56</i>
Taulukko 8.	<i>Kahden eri tilanteen pulssisignaalien perusteella lasketut nousu- ja laskuajat.</i>	<i>60</i>
Taulukko 9.	<i>Pulssianturin 2 syöttöjännitteet, maksimivirrat, keskiarvovirrat ja tehot kahdessa eri nopeudessa tilanteessa 2.</i>	<i>61</i>
Taulukko 10.	<i>Pulssianturin 2 kanavan A+ maksimivirrat tilanteissa 1 ja 2.....</i>	<i>63</i>
Taulukko 11.	<i>Pulssianturin 2 A+ kanavan maksimivirta häiriökondensaattori kytkettynä.....</i>	<i>64</i>
Taulukko 12.	<i>Pulssiantureiden suhteelliset ja absoluuttiset mittausrvirheet.....</i>	<i>64</i>
Taulukko 13.	<i>Pulssiantureiden ulostulotaajuuden vaihtelu kahdessa nopeudessa.....</i>	<i>64</i>
Taulukko 14.	<i>Pulssiantureiden virransyöttökyvyt 300 Hz nopeudella tilanteessa 1 ja 2.....</i>	<i>66</i>
Taulukko 15.	<i>Hyvyyskriteeristön perusteella tehty arviointi pulssiantureille.....</i>	<i>67</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet:

A/D	engl. analog-to-digital, analogisesta digitaaliseksi
ASIC	engl. application specific integrated circuit, sovelluskohtainen piiri
CAN	engl. controller area network, automaatioväylä
DTC	engl. direct torque control, suora momenttisäätö
HTL	engl. high threshold logic, korkeakynnyslogiikka
IGBT	engl. insulated gate bipolar transistor, eristetty bipolaaritransistori
IP-luokitus	engl. international protection markkin, kansainvälinen suojausluokitus
LED	engl. light emitting diode, hohtodiodi
MMV	magnetomotorinen voima
PPR	engl. pulses per revolution, pulssien lukumäärä per kierros
PWM	engl. pulse width modulation, pulssin leveys modulointi
SSI	engl. synchronous serial interface, väyläteknikka
TTL	engl. transistor-transistor logic, transistori-transistori logiikka

Merkinnät:

$A+$	pulssianturin kanava A
$A-$	pulssianturin kanava A invertoituna
B	magneettivuontiheys
$B+$	pulssianturin kanava B
$B-$	pulssianturin kanava B invertoituna
ε_ω	kulmanopeuden suhteellinen tarkkuus
f	jännitteen taajuus
ϕ	magneettivuo
I	virta
I_r	roottorivirta
K_H	Hall-vakio
n	roottorin pyörimisnopeus
n_s	oikosulkumoottorin tahtinopeus
N	pulssien määrä per kierros
m	pulssien määrä näytteistyksen jaksonajan aikana
ω	kulmanopeus
ω_r	oikosulkumoottorin kulmataajuus
p	oikosulkumoottorin napapariluku
P_m	oikosulkumoottorin mekaaninen teho

s	oikosulkumoottorin jättämä
t_{avg}	keskiarvoaika yhdelle pulssille
t_{rev_avg}	keskiarvoaika yhdelle pulssianturin kierrokselle
T	näytteistyksen jaksonaika
T_e	sähköinen vääntömomentti
T_{hf}	korkeataajuisen kellosignaalin jaksonaika
V_H	Hall-jännite
z	johtimen paksuus Hall-ilmiön yhteydessä
Z^+	pulssianturin kanava Z
Z^-	pulssianturin kanava Z invertoituna

1. JOHDANTO

Sähkömoottoreita käytetään lähes kaikilla teollisuuden aloilla. Monet sähkömoottorikäyttöjen sovelluskohteet vaativat erityistä tarkkuutta. Erityisesti nostimissa nostotaakkojen suuruuksien vaihdellessa sähkökäytön tulee taata tehokas ja turvallinen toiminta. Kevyitä kuormia nostettaessa tarvitaan suurempia nopeuksia kuin toimittaessa raskaiden taakkojen kanssa, jolloin noston turvallisuus ja tarkkuus korostuvat. Jotta sähkömoottorikäytössä voidaan taata riittävä tarkkuus, tulee käyttää takaisinkytkettyä moottorisäätöä. Takaisinkytketty moottorisäätö vaatii moottorin akselin pyörimisnopeuden mittaamisen pyörivällä pulssianturilla. Takaisinkytketty nopeustieto parantaa moottorin säädön nopeutta ja tarkkuutta. Tästä syystä pulssiantureita käytetään yleisesti useissa eri teollisuuden käyttökohteissa. Tässä työssä tutkittu käyttökohde on nostinkäyttö.

Työn tarkoituksena on tutkia inkrementaalipulssianturin käyttöä nopeasti pyörivässä oikosulkumoottorissa. Nopeasti pyörivä oikosulkumoottori on määritetty tässä työssä siten, että moottorin akselin maksimipyörimisnopeus on 9000 rpm. Lisäksi työssä suoritetaan vertailu erilaisilla tekniikoilla toteutetuilla pulssiantureilla. Vertailu toteutetaan antureiden lupaamien teknisten tietojen perustella sekä tekemällä käytännön mittauksia valituilla pulssiantureilla kytkettynä sähkökäyttöjärjestelmään. Testien tarkoituksena on selvittää eri pulssiantureiden soveltuvuutta nopeasti pyörivän moottorin käyttökohteeseen. Työn haasteena on sähkömoottorikäytön osa-alueiden laajuus sekä sopivien pulssiantureiden löytäminen valittuun käyttökohteeseen.

Luvussa 2 taustoitetaan työn aihetta esittämällä sähkömoottorikäytön teoriaa. Lisäksi perehdytään muutamaan yleisimmin käytettyyn moottorisäätömenetelmään sekä moottorin jarrun toimintaperiaatteeseen. Luvussa 3 esitellään erilaiset pyörivien pulssiantureiden tekniikat. Pulssiantureiden toimintaperiaatteen perusteella ne voidaan jakaa kahteen kategoriaan, jotka ovat inkrementaali- ja absoluuttipulssianturit. Inkrementaalianturit pystyvät mittaamaan moottorin akselin pyörimisnopeutta sekä -suuntaa. Absoluuttiantureilla voidaan mitata moottorin akselin asentokulmaa. Lisäksi luvussa esitellään neljä pulssianturitekniikkaa, joista yleisimmät ovat optiset ja magneettiset. Luvun lopussa perehdytään pyörimisnopeuden laskentamenetelmiin, joilla määritetään pyörimisnopeus pulssianturin ulostulosignaalin perusteella.

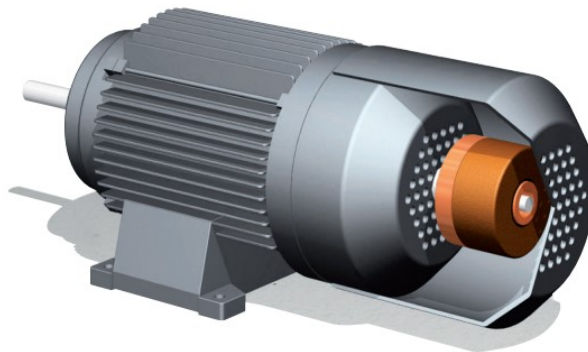
Luvussa 4 esitetään tarkemmin pulssiantureiden ominaisuuksia, ja niiden merkittävyyttä nopeasti pyörivän moottorin käyttökohteessa. Pulssiantureiden ominaisuuksia tarkastellaan jaettuna sähköisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Pulssianturin valinnassa on useita kriittisiä parametreja, jotka tulee huomioida. Ulostulosignaalin tyyppi on yksi merkittävä tekijä pulssianturin valinnassa, sillä siihen vaikuttaa käytössä oleva taajuusmuuttaja.

Luvussa 5 esitellään vertailtavat pulssianturit ja niiden tärkeimmät parametrit. Lisäksi esitellään mittausjärjestelmä, jossa pulssianturille tehdään mittaukset. Pulssiantureiden toimintaa testataan takaisinkytkennässä nopeasti pyörivän moottorin kanssa. Testit ja mittaukset suoritetaan kahdella eri pulssianturilla. Testeissä todennetaan molempien pulssianturien toimintakykyä kyseisessä käyttökohteessa. Lisäksi pulssianturien suorituskykyä testataan kahdella eri kaapelipituudella lisäkondensaattoreita hyödyntämällä. Antureiden häiriökestoisuutta testataan kytkemällä pulssianturikaapelin ja moottorikaapelin väliin häiriökondensaattori mallintamaan häiriötä. Luvussa 6 esitetään mittaustulokset sekä analysoidaan tulosten perusteella antureiden toimintakyky valitussa käyttökohteessa. Tulosten perusteella tehdään johtopäätökset, kuinka hyvin valitut pulssianturit soveltuvat testattuun käyttöön.

2. SÄHKÖMOOTTORIKÄYTTÖ NOSTIMESSA

Nostimen tärkeimmät toiminnot ovat nosto- ja siirtoliike, jotka toteutetaan sähkökäyttöillä. Sähkömoottorikäyttö käsittää järjestelmän, jonka tarkoituksena on muuttaa sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi. Tällainen järjestelmä koostuu sähkömoottorista, taajuusmuuttajasta, mittalaitteista sekä kuormasta. Mittalaitteilla tarkoitetaan moottorin akselin pyörimisnopeuden mittausta, lämpötilan mittausta sekä moottorin vaihevirtojen mittausta. Pulssianturilla toteutetaan moottorin akselin pyörimisnopeuden mittausta.

Ymmärtääkseen paremmin pulssianturin toimintaa sähkömoottorikäytön yhteydessä tulee käsitellä tarkemmin sähkömoottorikäytön toimintaa. Tässä työssä sähkömoottorilla tarkoitetaan kolmivaiheista oikosulkumoottoria, jonka toimintaperiaate käsitellään luvussa 2.2. Nostinkäytössä sähkömoottorin akselilla on tyypillisesti tuuletin riittävän jäähdytyksen takaamiseksi sekä jarru, jolla pyörivän akselin liike voidaan hidastaa ja pysäyttää. Näiden lisäksi pulssianturi on yleensä kiinnitetty samalle akselille. Nostomoottorin akseliin kiinnitetty sähkömagneettinen levyjarru ohjataan auki sähköisesti ja suljetaan mekaanisesti jousella. Jarrun toimintaperiaate esitellään tarkemmin luvussa 2.5. Kuvassa 1 on havainnollistettu tyypillinen ratkaisu pulssianturin käytöstä sähkömoottorissa.



Kuva 1. Sähkömoottori ja sen akseliin kytketty pulssianturi. [1]

Sähkömoottorikäytöt voidaan jakaa säädettyihin ja säätämättömiin järjestelmiin. Tässä työssä keskitytään säädettyihin sähkömoottorikäyttöihin ja erityisesti takaisinkytkettyyn käyttöön. Tässä luvussa esitellään kolmivaiheisen oikosulkumoottorin ja sitä ohjaavan taajuusmuuttajan toimintaperiaate. Lisäksi määritellään, mitä nopeasti pyörivä moottori tässä työssä tarkoittaa, ja kuinka se eroaa tavallisesta sähkömoottorikäytöstä. Takaisinkytketyn käytön periaate käsitellään luvussa 2.4 taajuusmuuttajan yhteydessä.

2.1 Nostimen rakenne

Nostin on laite, jolla voidaan nostaa, laskea ja pitää taakkoja ilmassa. Nostin on mitoitettu aina jollekin tietylle maksimikuormalle, jonka se pystyy nostamaan turvallisesti. Nostin

voidaan jakaa pääkomponentteihin, jotka ovat runko, nostomoottori, vaihde, jarru, köysitela, köysi sekä koukku. Nostomoottorin toiminnan edellyttävät sähkökomponentit ovat yleensä erillisessä sähkökaapissa nostimessa. [2]

Nostomoottorilla pyöritetään akselia, johon on kiinnitetty vaihteisto. Vaihteiston kautta nostimen köysitela on yhdistetty moottorin akseliin. Vaihteen välityksellä nostomoottorin nopeus ja vääntömomentti muuntuvat telalle. Köysi kelautuu telan ympärille kuormaa nostettaessa ja purkautuu kuormaa laskettaessa. Köyden päässä on koukku, johon nostettava taakka voidaan kiinnittää. [2]

2.2 Oikosulkumoottorin rakenne ja toimintaperiaate

Kolmivaiheinen oikosulkumoottori on yleisimmin käytetty moottorityyppi. Tämä johtuu oikosulkumoottorin rakenteen yksinkertaisuudesta, ja siinä ei ole mekaanisesti kuluvia osia, jotka vaatisivat säännöllistä huoltoa. Oikosulkumoottoria voidaan käyttää myös generaattorina, jota vaaditaan nostinkäytössä taakkaa laskettaessa. Oikosulkumoottori koostuu staattorista ja roottorista, joista roottorissa sijaitsee oikosuljettu häkkikäänitys. Tämä moottorityyppi perustuu pyörivän magneettikentän toimintaan, joka tuotetaan syöttämällä kolmivaiheista vaihtovirtaa moottoriin. [3]

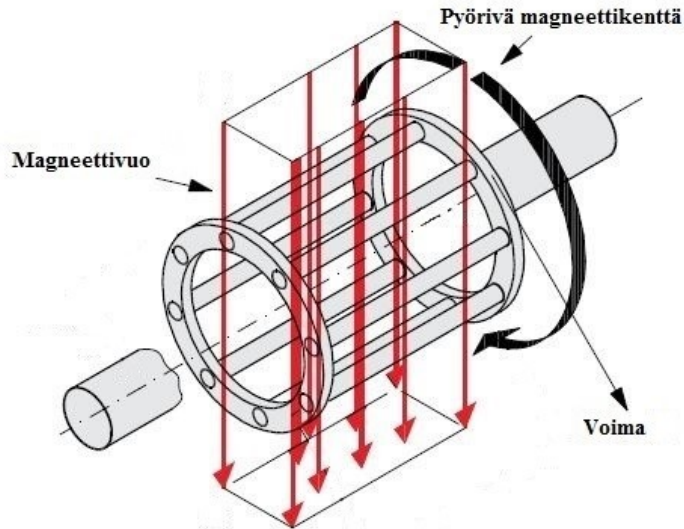
Oikosulkumoottorin staattorissa sijaitsee kolmivaihekäänitykset, joihin syötetään kolmivaiheinen vaihtojännite. Roottorissa on päistään oikosuljettu häkkikäänitys, joka on yleensä valmistettu joko kuparista tai alumiinista. Staattorin käämityksiin syöttämällä kolmivaiheista vaihtovirtaa synnytetään moottorin ilmaväliin muuttuva magnetomotorinen voima. Vaihtovirran tehollisarvo ja staattorin käämikierrosten lukumäärä vaikuttavat magnetomotorisen voiman suuruuteen. Lisäksi mmv:n aaltomuotoon vaikuttaa käämitysten ominaisuudet. Tämä magnetomotorinen voima tuottaa moottorin ilmaväliin sinimuotoisesti pyörivän magneettikentän. Magneettikentän vuontiheys ja vuon määrä riippuvat magnetomotorisesta voimasta. Pyörivän magneettikentän pyörimisnopeutta kutsutaan synkroniseksi nopeudeksi n_s . [3]

Magneettikentän pyörimisnopeus on riippuvainen moottoriin syötetyn vaihtovirran taajuudesta f sekä moottorin napapariluvusta p . Moottorin napapariluku on tyypillisesti 1 – 6 välillä. Kaavassa (1) on esitetty synkronisen pyörimisnopeuden kaava, jonka yksikkönä käytetään kierrosta minuutissa tai radiaania sekunnissa. [3]

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} [rpm] \quad (1)$$

Sinimuotoisesti pyörivä magneettikenttä indusoi roottorissa olevaan häkkikäänitykseen jännitteen. Koska häkkikäänitys on oikosuljettu, virta alkaa kulkea roottorissa. Pyörivä magneettikenttä ja roottorivirta yhdessä aiheuttavat roottoriin kohdistuvan tangentiali-

sen voiman, joka aiheuttaa roottorin pyörimisen. Kuvassa 2 on havainnollistettu häkkikäämityksen toimintaperiaatetta tietyllä ajan hetkellä, kun magneettivuon suunta on alaspäin.



Kuva 2. Oikosulkumoottorin häkkikäämitys, johon kohdistuu voima pyörivän magneettikentän ansiosta. [muokattu lähteestä 4]

Roottorin pyörimisnopeus n on normaalitilanteessa alhaisempi kuin magneettikentän pyörimisnopeus. Tätä nopeuseroa kutsutaan jättämäksi s , jota ilman moottori ei pystyisi kehittämään momenttia. Jättämä on määritetty kaavan (2) mukaisesti pyörimisnopeuden ja synkronisen nopeuden avulla. Nimellisistä pyörimisnopeuksista määritettyä jättämää kutsutaan nimelliseksi jättämäksi. Jättämä ilmoitetaan yleensä prosentiosuutena tahtinopeudesta, ja sen arvo vaihtelee 1 – 10 % välillä. [3]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Jättämän ollessa positiivinen oikosulkumoottori toimii moottorina ja sen ollessa negatiivinen generaattorina. Jättämä on verrannollinen moottorin tuottamaan vääntömomenttiin. Jättämän kasvaessa momentti kasvaa kuitenkin hidastuen kohti maksimimomenttia. Momenttikäyrä on määritetty maksimimomentin ja sitä vastaavan maksimijättämän perusteella, joka on suurempi kuin nimellinen jättämä. Tehokas toiminta-alue oikosulkumoottorille on $-s_{max} \dots s_{max}$ välillä, johon on mahdollista päästä taajuusmuuttajaohjauksella. [5]

Oikosulkumoottorin momentti T_e syntyy pyörivän magneettikentän ja roottorivirran aiheuttamasta voimasta kaavan (3) mukaisesti, jossa k on vakio, ϕ on magneettivuo ja I_r on roottorivirran arvo.

$$T_e \approx k\phi I_r \quad (3)$$

Moottorin teho P_m on määritetty tuotetun momentin ja pyörimisnopeuden suhteesta kaavan (4) mukaisesti, jossa ω_r on moottorin kulmanopeus ja n_r on moottorin pyörimisnopeus.

$$P_m = T_e \omega_r = \frac{T_e 2\pi n_r}{60} \quad (4)$$

Momentti voidaan vastaavasti kirjoittaa kaavan (5) mukaiseen muotoon.

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (5)$$

Epätahtikoneen nopeutta voidaan siis säätää muuttamalla syötettävän jännitteen taajuutta tai moottorin napaparien lukumäärää. Tässä työssä keskitytään taajuusmuuttajaohjattuihin sähkömoottorikäyttöihin, joissa nopeutta säädetään syötettävän jännitteen taajuutta muuttamalla. Taajuusmuuttajan nopeussäätöön perehdytään tarkemmin luvussa 2.4.2. [3]

2.3 Nopeasti pyörivä moottori

Nopeasti pyöriviä moottoreita on tyypillisesti käytetty kompressoreissa, puhaltimissa sekä nykyään myös autoteollisuudessa. Nopeasti pyörivä moottori on käsitteenä hankala johtuen sen määrittelystä. Nopeasti pyörivä moottori on määritelty usealla tavalla eri yhteyksissä perustuen pyörimisnopeuden suuruuteen. Tässä työssä nopeasti pyörivä moottori on määritelty tavallista korkeamman maksimi pyörimisnopeuden mukaan, joka on tässä työssä 9000 rpm. Tämä nopeus on siis synkronisen pyörimisnopeuden n_s maksimi, kun roottorin pyörimisnopeus n on kuormituksesta riippuen jättämän verran pienempi. Tällä hetkellä nostimissa käytettyjen oikosulkumoottorien maksimipyörimisnopeus on 1500 rpm – 4500 rpm välillä.

Moottorin pyörimisnopeusalueen kasvaessa nopeus asettaa moottorille vaatimuksia laakeroinnille sekä laakeroinnin tiivisteiden kestokyvyille. Lisäksi laajemman nopeusalueen takia moottorin roottori vaatii tarkemman tasapainotuksen, kun roottoriin kohdistuva keskeisvoima kasvaa nopeuden kasvaessa.

Oikosulkumoottorin pyörimisnopeus on määritelty kaavan (1) mukaan taajuuden ja napaparien lukumäärän perusteella. Moottorin napaparien lukumäärä on tyypillisesti 1 ja 6 välillä. Taulukossa 1 laskettu pyörimisnopeudet eri napaparilukumäärillä ja syöttöjännitteen eri taajuuden arvoilla verkkotaajuuden arvosta 50 Hz:stä 300 Hz:n taajuuteen. Moottorille syötetyn jännitteen taajuutta voidaan muuttaa taajuusmuuttajalla. Taulukossa 1 olevat nopeudet ovat siis tahtinopeuksia ja todellinen roottorin pyörimisnopeus on jättämän verran pienempi. Tyypillisimmät arvot oikosulkumoottorin nimellisille pyörimisnopeuksille on 1500 rpm tai 3000 rpm. Nopeuden kasvattaminen on mahdollista pienentämällä napaparien lukumäärää ja kasvattamalla syötettävän jännitteen taajuutta. [4]

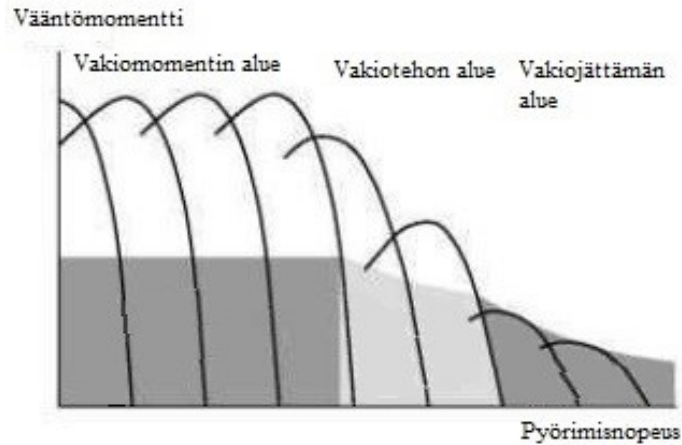
Taulukko 1. Moottorin pyörimisnopeuksien arvoja eri napapariluvuilla ja syöttöjännitteen taajuuksilla.

Moottorin syöttöjännitteen taajuus	Napapariluku (p)				
	1	2	3	4	6
50 Hz	3000	1500	1000	750	500
100 Hz	6000	3000	2000	1500	1000
150 Hz	9000	4500	3000	2250	1500
200 Hz	12000	6000	4000	3000	2000
250 Hz	15000	7500	5000	3750	2500
300 Hz	18000	9000	6000	4500	2000

Oikosulkumoottorin nopeuskäyttöalueet voidaan jakaa kolmeen alueeseen: vakiomomentin alue, vakiotehon alue ja vakiojättämän alue. Kuvassa 3 on esitetty nämä toiminta-alueet pyörimisnopeuden ollessa vaaka-akselilla ja vääntömomentti pystyakselilla. Moottorin toimiessa vakiomomentin alueella pyörimisnopeus on pienempi tai yhtä suuri kuin nimellinen pyörimisnopeus. Tällä alueella syötettävän jännitteen taajuus pysyy vakiona, mutta jännitteen suuruutta muuttamalla voidaan muuttaa pyörimisnopeutta nimelliseen nopeuteen asti. Moottorin tuottama maksimimomentti on suurimmillaan tällä alueella toimittaessa. Lisäksi teho kasvaa lineaarisesti kasvatettaessa jännitettä sen nimelliseen arvoon asti. [6]

Vakiotehon alueella toimittaessa pyörimisnopeus on yli nimellisen nopeuden. Tällöin syöttöjännitteen suuruutta ei voida enää kasvattaa johtuen käämitysten eristysten mitoittuksesta, joten jännitteen tulee pysyä vakiona. Lisäksi vakioita ovat staattorivirta sekä suhteellinen jättämä. Pyörimisnopeutta voidaan kuitenkin kasvattaa nostamalla syöttöjännitteen taajuutta. Tehon pysyessä vakiona ja nopeuden kasvaessa tulee tällöin kaavan (5) mukaan maksimivääntömomentin pienentyä. [6]

Vakiojättämän alueen pyörimisnopeusrajoja ei ole tarkasti määritelty, sillä se riippuu moottorin rakenteesta. Moottorin toimiessa vakiojättämän alueella suhteellisen jättämän arvo pienenee. Tällä alueella tehon arvo pienenee kääntäen verrannollisesti suhteessa pyörimisnopeuteen. Samalla maksimimomentti pienenee kääntäen verrannollisesti suhteessa nopeuden neliöön. Tässä työssä käsiteltävän moottorin pyörimisnopeus rajoittuu 9000 rpm:n arvoon. [6]



Kuva 3. Oikosulkumoottorin momenttikäyrät eri pyörimisnopeusalueilla. [muokattu lähteestä 6]

Tämän tyyppisen moottorikäytön eri nopeusalueita voidaan hyödyntää nostinkäytössä. Nostettaessa maksimikuormaa tarvitaan moottorilta maksimivääntömomentti, jolloin pyörimisnopeus on nimellinen ja siten myös nostonopeus on pienempi. Tällä tavalla voidaan taata turvallinen toiminta suurilla kuormilla, kun moottorin pyörimisnopeus ja sitä kautta nostonopeus on pienempi kuin maksiminopeus. Vastaavasti kevyitä nostotaakkoja nostettaessa voidaan saavuttaa korkeampi nostonopeus. Tällöin suurilla pyörimisnopeuksilla moottorista saatava momentti on pienempi.

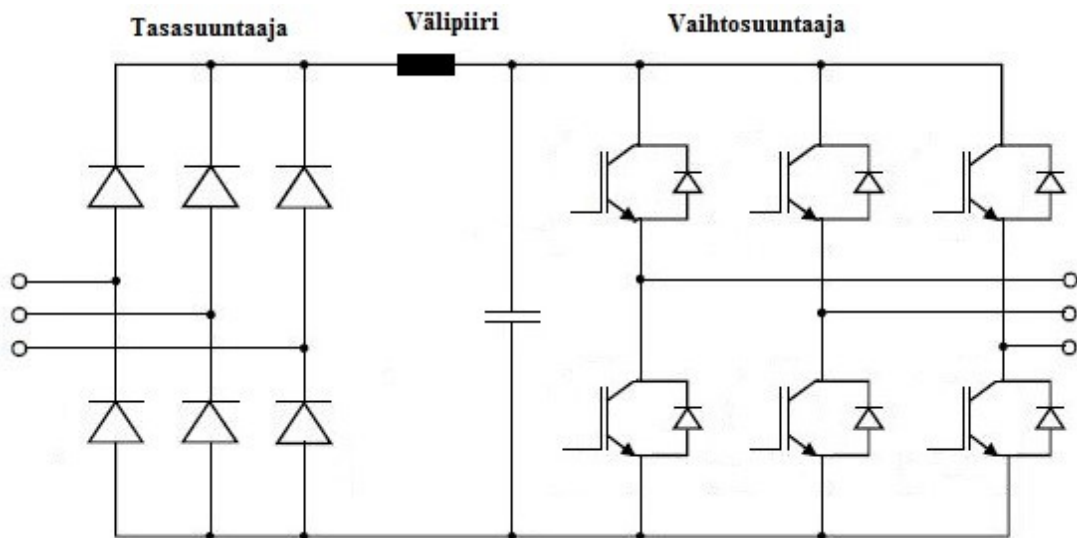
2.4 Taajuusmuuttaja

Sähkömoottorikäytöissä tärkeässä osassa on moottorin lisäksi taajuusmuuttaja, josta käytetään myös nimitystä invertteri. Taajuusmuuttaja on tehoelektroniikkalaite, joka muuttaa sähköverkosta syötettyä vaihtojännitettä halutun suuruiseksi ja taajuiseksi vaihtojännitteeksi. Taajuusmuuttajien käyttö on kasvanut merkittävästi johtuen tehoelektroniikan ja mikroprosessorien kehittymisestä. Taajuusmuuttaja mahdollistaa moottorin portaattoman nopeuden ja tarkan momentin säädön, jolloin käynnistykset ja pysäytykset tapahtuvat pehmeästi riippumatta moottorin kuormasta. Taajuusmuuttajan ohjaus on nykyään toteutettu sisäänrakennetulla ohjelmistolla, mikä mahdollistaa erilaisten ohjausmenetelmien käytön taajuusmuuttajassa. Lisäksi taajuusmuuttaja tuottaa moottorista diagnostiikkatietoa, jota voidaan käyttää apuna vikatilanteissa vian selvittämiseksi. [4]

2.4.1 Taajuusmuuttajan rakenne ja toimintaperiaate

Taajuusmuuttajat voidaan luokitella välipiirillisiin ja suoriin rakenteensa perusteella. Välipiirilliset voidaan jakaa vielä virta- ja jännitevälipiirillisiin taajuusmuuttajiin. Tässä työssä keskitytään ainoastaan jännitevälipiirillisiin taajuusmuuttajiin, joissa välipiiriin on kytketty kondensaattori. Taajuusmuuttaja muuttaa syötetyn kolmivaiheisen vaihtojännitteen ensin tasajännitteeksi ja sen jälkeen takaisin vaihtojännitteeksi. Taajuusmuuttajan

rakenne voidaan jakaa tasasuuntaus- ja vaihtosuuntauspuoliin, joiden välissä on välipiiri. Välipiirin kanssa rinnan on jarrukatkoja ja -vastus. Kuvassa 4 on esitetty taajuusmuuttajan piirikaavio, josta selviää sen kolme osakokonaisuutta. [4]



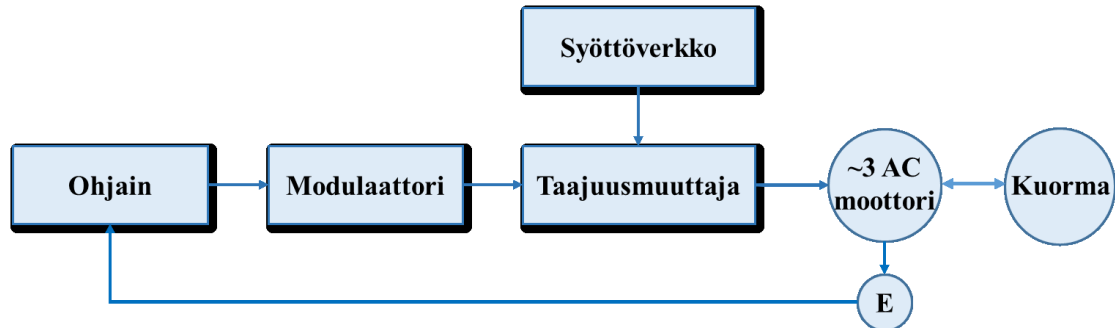
Kuva 4. Taajuusmuuttaja koostuu 3 osakokonaisuudesta: tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. [muokattu lähteestä 7]

Taajuusmuuttajaan syötetty kolmivaiheinen verkkotaajuinen vaihtojännite tasasuunnataan ensin tasajännitteeksi diodisillalla. Tasasuunnattu jännite vaihtosuunnataan sen jälkeen uudestaan vaihtojännitteeksi, joka syötetään sitten moottoriin. Tasasuuntaaja koostuu kahdesta ryhmästä diodeja, jotka johtavat vuorotellen riippuen syötetyn jännitteen hetkellisarvosta. Diodien läpi kulkee virtaa ainoastaan vaihtojännitteen ollessa positiivinen diodin yli. Haittapuolena diodisillassa on se, että sitä ei voida säätää kuten vaihtosuuntaajaa. Välipiiriin sijoitetun kondensaattorin tehtävänä on toimia hetkellisenä energiavarastona tasaamaan tasajännitteen aaltomuotoa. [4]

Vaihtosuuntaajapuoli koostuu kahdesta ryhmästä IGB-transistoreita, jotka ovat kytketty taajuusmuuttajan ulostuloon. Välipiirin tasajännitteen navat on kytketty transistorien positiivisiin ja negatiivisiin napoihin. Jokaisella transistorilla on vastarinnankytketty diodi, jotta kuormavirran ollessa negatiivinen virta pääsee kulkemaan. Transistoreita kytkemällä johtavaksi ja johtamattomaksi voidaan muodostaa taajuusmuuttajan ulostuloon eri taajuisia ja suuruista vaihtojännitettä. Jotta invertterin ulostuloon saataisiin mahdollisimman sinimuotoista jännitettä, käytetään yleensä pulssinleveysmodulointia. Ulostulojännite ei kuitenkaan ole täysin sinimuotoista ja siinä voi esiintyä yliaaltoja, koska tasasuunnattua tasajännitettä katkomalla on tuotettu vaihtojännite. Invertterin kytkentätaajuutta kasvattamalla voidaan vähentää yliaaltoja ja sitä kautta parantaa ulostulojännitteen sinimuotoisuutta. [4]

Välipiirin rinnalle tulee kytkeä jarrukatkoja ja -vastus, koska kuormavirran suunta voi olla negatiivinen ja tällöin tehoa syötetään moottorista takaisin päin. Tämä voi tapahtua,

mikäli oikosulkumoottori toimii generaattorina. Koneen takaisinsyöttämä teho tulee syöttää tällöin jarruvastukseen, jossa sähköenergia muuntuu lämpöenergiaksi. Jarruvastuksen koko määräytyy moottorin nimellistehon perusteella. Kuvassa 5 on esitetty lohkokaavio taajuusmuuttajaohjatun sähkömoottorikäytön toimintaperiaatteesta. [4]



Kuva 5. Lohkokaavio taajuusmuuttajaohjatusta sähkömoottorikäytöstä. [muokattu lähteestä 8]

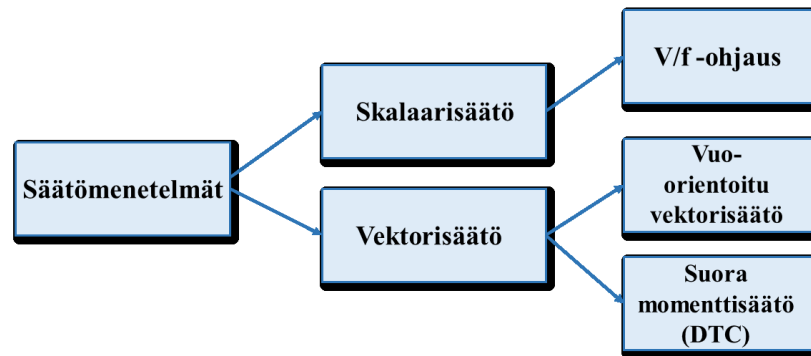
Taajuusmuuttajassa on kolmen pääkomponentin lisäksi ohjauspiiri, jolla on neljä päätehtävää. Ohjauspiiristä tulee kytkentäsignaalit invertterin IGB-transistoreille. Lisäksi ohjauspiiri vaihtaa tietoa taajuusmuuttajan ja muiden oheislaitteiden, kuten pulssianturin välillä. Pulssianturin syöttää ohjauspiirille tietyn taajuista pulssisignaalia, jota taajuusmuuttajan tulee pystyä käsittelemään riittävän nopeasti. Ohjauspiiri myös mittaa ja havaitsee erilaiset vikatilanteet taajuusmuuttajassa tai moottorissa. Lisäksi siihen on määritetty suojaavia toimintoja laitteiston suojaamiseksi. [4]

2.4.2 Vaihtosähkömoottorin säätömenetelmät

Oikosulkumoottoria voidaan ohjata joko ilman takaisinkytkentää tai sen kanssa. Moottorin ohjauksella tarkoitetaan yleisesti kirjallisuudessa ilman takaisinkytkentää olevaa ohjausta. Moottorin säädöllä tarkoitetaan vastaavasti takaisinkytkettyä ohjausta. Oikosulkumoottorin säädön tarkoituksena on hallita moottorin toimintaa referenssiarvojen perusteella. Takaisinkytketyllä järjestelmällä tarkoitetaan, että moottorin pyörimisnopeus on mitattu ja se tuodaan säätimelle. Nopeustakaisinkytkentää käytetään silloin, kun tarvitaan erittäin tarkkaa säätöä, liike on momenttisäädetty tai mikäli moottorilta tarvitaan maksimummomenttia nollanopeudella. [9]

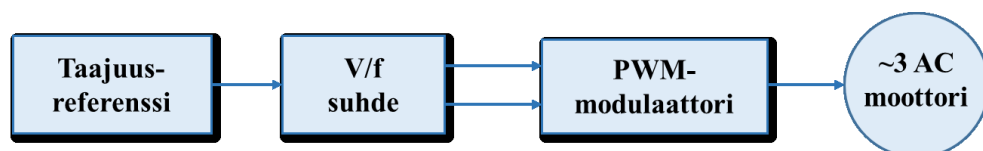
Säätöä tarvitaan, jotta moottorin käynnistyksessä tai kuormitustilanteen muuttuessa todelliset arvot pysyvät mahdollisimman lähellä asetettuja referenssiarvoja. Moottoreiden ohjaukseen ja säätöön on kehitetty useita menetelmiä ja tässä luvussa käsitellään niistä yleisimmät. Kuvassa 6 on esitetty säätömenetelmien kategorisointi yleisellä tasolla. Moottorisäädön tarkoituksena on hallita moottorin pyörimisnopeutta sekä vääntömomenttia. Nopeus ja momentti tulee olla koko moottorin toiminnan ajan hallinnassa. [4]

Moottoria voidaan ohjata säätämällä nopeutta, jolloin momentti on määritetty moottorin akselin kuorman perusteella. Vastaavasti moottoria voidaan ohjata säätämällä tuotettavaa vääntömomenttia, jolloin akselin pyörimisnopeus määräytyy käytetyn prosessin mukaan. Vaihtosähkömoottoriin pyörimisnopeuden tai vääntömomentin säädössä voidaan käyttää kolmea eri säätömenetelmää. Nämä säätötavat ovat skalaarisäätö, vektorisäätö ja suora momenttisäätö. [10]



Kuva 6. Vaihtosähkömoottorin säätömenetelmien jaottelu.

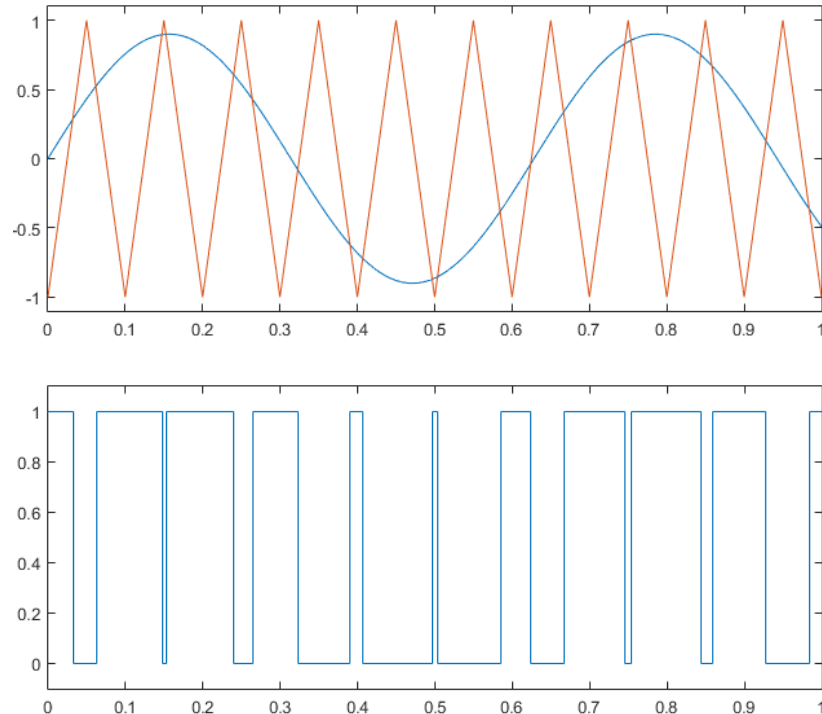
Skalaarisäätö on yksinkertaisin vaihtosähkömoottorin ohjausmenetelmä. Menetelmässä ei käytetä pyörimisnopeuden mittausta eikä siinä siten ole takaisinkytkentää moottorin akselilta. Skalaarisäätö vaatii taajuusreferenssiarvon eli pyörimisnopeuden arvon, johon moottori kiihdytetään. Jotta moottorin tuottama momentti on riippumaton pyörimisnopeudesta, tulee vuon olla vakio kiihdytyksessä. Tämä voidaan toteuttaa pitämällä syöttöjännitteen ja -taajuuden suhde vakiona. Kuvassa 7 on esitetty lohko-kaavio skalaarisäädön toiminnasta. [6]



Kuva 7. Skalaarisäädön peruseriaatetta kuvaava lohko-kaavio. [muokattu lähteestä 10]

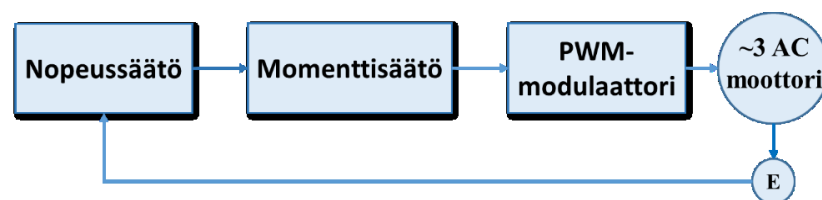
Referenssijännite ja -taajuus syötetään modulointipiiriin, joka hyödyntää pulssinleveysmodulointia tuottaakseen IGB-transistorien kytkentäsignaalit. Pulssinleveysmoduloinnissa verrataan sinimuotoisen aallon ja kolmioaallon amplitudeja toisiinsa. Moduloinnin ulostulosignaali määräytyy siitä, kun sinimuotoisen aallon amplitudi on suurempi kuin kolmioaallon amplitudi. Kuvassa 8 on havainnollistettu tarkemmin pulssinleveysmoduloinnin periaatetta. Kuvan 8 yläosassa on esitetty sinimuotoinen signaali ja kolmioaalto-signaali. Kuvan 8 alaosassa vastaavasti sinimuotoisesta signaalista ja kolmioaalto-signaalista pulssinleveysmoduloinnilla muodostunut ulostulosignaali. Menetelmässä ei käytetä nopeuden mittausta takaisinkytkentänä, joten skalaarisäätöä kutsutaan avoimen piirin säädöksi. Skalaarisäädössä ohjattavina muuttujina ovat jännite ja taajuus. Skalaarisäädössä ei siis oteta huomioon moottorin tilaa johtuen puuttuvasta pyörimisnopeuden

tai paikan mittauksesta. Tästä johtuen tällä säätötavalla ei voida ohjata momenttia. Lisäksi moottorin todellinen nopeus eroaa skalaarisäätimelle asetetusta referenssitaajuuden mukaisesti pyörimisnopeudesta jättämätajuuden verran, mistä johtuen skalaarisäätöä käytetään kohteissa, joissa säädön tarkkuudella ei ole korkeita vaatimuksia. [6]



Kuva 8. Pulssinleveysmodulointia havainnollistava kuva.

Vuo-orientoitu vektorisäätö on yleisimmin käytetty vaihtosähkömoottoreiden säätömenetelmä. Se on monimutkaisempi säätömenetelmä kuin skalaarisäätö. Vektorisäätöä käytettäessä nopeuden mittausta tai arviointia on välttämätöntä, jotta voidaan saavuttaa tarkka säätö. Takaisinkytkettyä ohjausta varten tarvitaan siis pulssianturi nopeusmittaustiedon tuottamiseen. Ilman pulssianturia pyörimisnopeus on arvioitu ilman mittaustietoa. Vuo-orientoidussa vektorisäädössä on mahdollista säätää roottorivuota ja momenttia toisistaan riippumattomasti. Kuvassa 9 on esitetty lohkokaavio vektorisäädön rakenteesta. [6]

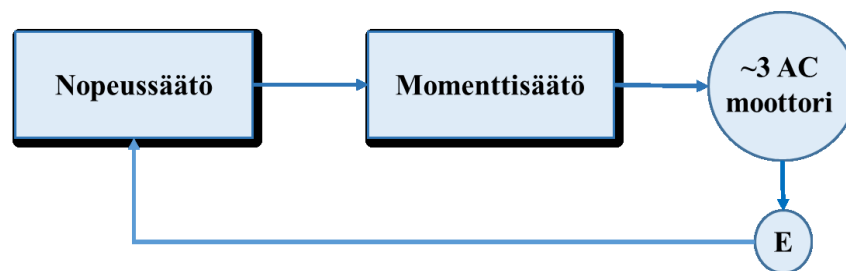


Kuva 9. Lohkokaavio vuo-orientoidusta vektorisäädöstä. [muokattu lähteestä 10]

Vektorisäätö vaatii tarkemman ja monimutkaisemman mallin ohjattavasta moottorista kuin skalaarisäätö. Vektorisäädön yhteydessä käytetään myös pulssinleveysmodulointipiiriä syöttämään kytkentäsignaaleja taajuusmuuttajan IGB-transistoreille. Modulointipiirille syötetään pyörimisnopeus- ja momenttiferenssien arvot, jotka lasketaan nopeus-

ja momenttisäätäjissä. Johtuen nopeus- ja momenttisäätäjistä momenttia voidaan ohjata epäsuorasti. Nopeustakaisinkytkentä mahdollistaa roottorikoordinaattien muutoksen staattorikoordinaateiksi, mikä tekee moduloinnin mahdolliseksi. Monimutkaiset reaaliaikalaskentaa vaativat koordinaattimuutokset suoritetaan nykyaikaisilla mikroprosesso-reilla. [4]

Suora momenttisäätö (DTC) eroaa vuo-orientoidusta vektorisäädöstä siinä, että se ei vaadi modulointipiiriä. Tässä menetelmässä säädettävänä muuttujina on moottorin magnetointivuo ja momentti. Menetelmä voidaan jakaa karkeasti nopeussäätimen ja momenttisäätimen toimintaan. Nopeussäätimelle syötetään pyörimisnopeus- ja momenttireferenssiarvot, joiden perusteella lasketaan momenttisäätimelle sisäinen referenssiarvo. Momenttisäätimen perusteella valitaan optimaalinen kytkentäpulsssi. Taajuusmuuttajan IGB-transistoreiden kytkentäpulsstit määräytyvät valintataulukon perusteella. Tätä säätömenetelmää voidaan käyttää joko nopeustakaisinkytkennän kanssa tai ilman riippuen vaaditusta ohjaustarkkuudesta käyttökohteessa. Alla olevassa kuvassa 10 on esitetty DTC-säädön perusrakenne. [10]



Kuva 10. Lohkokaavio DTC-säädön toimintaperiaatteesta. [muokattu lähteestä 10]

2.5 Pulssianturi takaisinkytkennässä

Moottorin säätömenetelmät kuten vuo-orientoitu vektorisäätö ja DTC-säätö vaativat nopeustiedon takaisinkytkentänä koordinaattimuutosten laskentaa varten. Nopeustieto voidaan tuottaa joko mittaamalla pyörimisnopeutta tai laskemalla nopeuden arvolle estimaatti, jota hyödynnetään takaisinkytkentätietona. Nopeusestimaattia hyödyntävää säätöä kutsutaan anturittomaksi säädöksi.

Pyörimisnopeusestimaatin käyttö voi aiheuttaa kuitenkin epätarkkuuksia moottorin käynnistyksessä, ryömintänopeuksilla ja nollanopeudella toimittaessa. Moottorin mallin epätäydellisyyksistä johtuen hitailla nopeuksilla tapahtuu oskillaatioita. Käyttämällä pulssianturin mittaamaa nopeustietoa saadaan pienennettyä moottorin mallin epätäydellisyyksien vaikutusta moottorin toimintaan eri käyttötilanteissa. Oikosulkumoottori on epälineaarinen järjestelmä, jossa eri parametrien arvot riippuvat moottorin toimintapisteestä, mikä tekee moottorin mallinnuksesta haastavaa. Muun muassa seuraavat moottorin ominaisuudet tulisi ottaa huomioon moottorin mallissa, jotta virheitä voitaisiin vähentää:

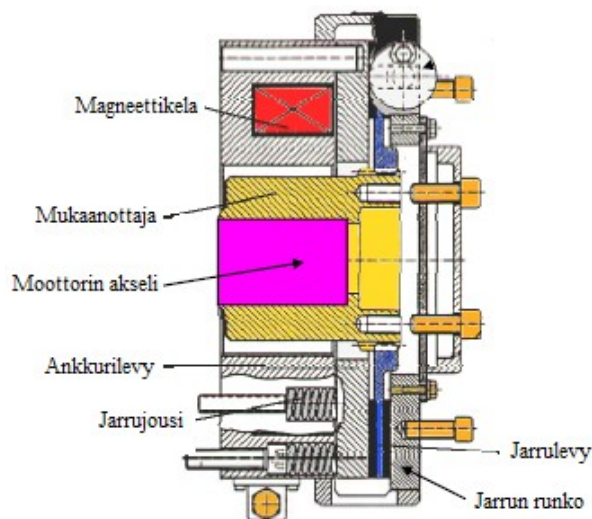
- Moottorin jättämä vaihtelee tuotetun vääntömomentin perusteella
- Staattorin ja roottorin resistanssit riippuvat lämpötilasta
- Moottorin induktanssit vaihtelevat riippuen magneetoinnista sekä kuormamomentista
- Ilmavälissä oleva magneettikenttä ei ole täysin homogeeninen
- Magneettinen hystereesi-ilmiö

Tästä syystä riittävän tarkan pyörimisnopeusestimaatin laskeminen on haastavaa ja tällöin yksinkertaisin ratkaisu on käyttää pulssianturia pyörimisnopeustiedon tuottamiseen. [11]

2.6 Jarrun rakenne ja toimintaperiaate

Moottorin levyjarru voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, joista yksi tapa on magneettilevyjarru. Magneettilevyjarru kiinnitetään moottorin akselille yleensä tuulettimen suojakotelon sisään. Se on rakennettu siten, että jarru on irrotettavissa akselilta ja vaihdettavissa. Sähkömagneetilla toimivan jarrun etuna on se, jos sähkömoottorikäyttö irtoaa syöttävästä verkosta, jarru alkaa jarruttaa.

Magneettisen levyjarrun toimintaperiaate perustuu magneetikäämin ja jarrujousen toimintaan. Kuvassa 11 on poikkileikkaus levyjarrusta, jossa on esitetty tärkeimmät jarrun osat. Jarrutettaessa jarrujouset painavat ankkurilevyn ja jarrulevyn jarru runkoa kohti. Tällöin jarrulevyn pyöriminen pyrkii hidastumaan johtuen syntyneestä kitkavoimasta, jonka jarrujousi aiheuttaa. Jarrulevy on kiinnitetty mukaanottajaan, joka on vastaavasti kiinni moottorin akselissa. Jarrulevyn pyörimisen hidastuessa moottorin akselin pyöriminen hidastuu samalla. [2]



Kuva 11. Magneettilevyjarrun rakenne [muokattu lähteestä 2].

Kun sähkömagneettiin kytetään virta, syntynyt magneettinen vetovoima on suurempi kuin jarrujousen jousivoima, jolloin magneetti vetää ankkurilevyn irti jarrulevystä. Täl-

löin moottorin akseli ja jarrulevy pääsevät pyörimään vapaasti. Sähkömagneettiin syötetään tasasuunnattua tasavirtaa, joka magnetisoi magneettikelat. Magneettilevyjarruja on saatavilla nykyään DC-käyttöisten lisäksi myös AC-käyttöisiä, mutta ne ovat harvinaisempia [12]. DC-käyttöinen magneettilevyjarru vaatii siis lisäksi tasasuuntaajan, jolla vaihtovirta tasasuunnataan tasavirraksi. [2]

Tasasuuntaus voidaan toteuttaa joko puoliaalto- tai kokoaaltotasasuuntaajalla. Puoliaaltotasasuuntaaja toimii siten, että siihen syötetään sinimuotoista vaihtovirtaa ja negatiiviset puolijaksot suodatetaan pois. Tällöin tasasuuntaajan ulostuloon jäävät positiiviset puolijaksot. Kokoaaltotasasuuntaaja ei suodata negatiivisia puolijaksoja vaan invertoi ne positiivisiksi, joten ulostuloon muodostuu jatkuvaa positiivista puolijaksoa. Sähkömagneetti magnetoidaan tasasuuntaajan ulostulojännitteellä. Jarrun magnetointi synnyttää magneetikentän jarrun ulkopuolelle, mikä voi aiheuttaa häiriötä lähellä oleviin sähköisiin komponentteihin kuten pulssianturiin. [2]

Nostinkäytössä jarrun toiminnan nopeus on erittäin tärkeää. Taakkaa nostettaessa tai laskettaessa jarrutuksessa jarrun tulee toimia nopeasti, jotta taakkaa ei ehdi liikkua jarrutuksen aikana liian pitkää matkaa. Jarrutuksen viiveen tulisi olla siis mahdollisimman pieni. Tällä tavalla voidaan varmistua, että taakka käyttäytyy kuin nostimen käyttäjä sen odottaa. Jotta jarrutuksen viive olisi mahdollisimman pieni tulee jarrun magnetoinnin tapahtua nopeasti, mikä tarkoittaa sitä, että jarruun syötetään suuri virta magnetoinnin nopeuttamiseksi. Erityisesti suuren teholuokan moottoreissa tarvittavan jarrutusmomentin takia vaaditaan suurempikokoinen jarru sekä suuremmat virrat. [2]

Jotta riittävän suuri virta saadaan syötettyä jarrun käämeihin jarrutuksen alussa, tasasuuntauksessa käytetään kokoaaltotasasuuntaajaa. Kun jarru on saatu magnetoitua ja jarru on sulkeutunut, voidaan syötettävää virtaa pienentää ja vaihtaa tasasuuntaus puoliaaltosuuntaajalla tehtäväksi. Jarrun suljettua sen pitäminen kiinni vaatii vähemmän virtaa. Suuntauksen vaihto voidaan toteuttaa sopivalla aikareleellä. Pienemmän teholuokan moottoreissa tarvittavan jarrutusmomentin ollessa pienempi virran syöttämiseen riittää puoliaaltotasasuuntaaja koko jarrutuksen ajaksi. [2]

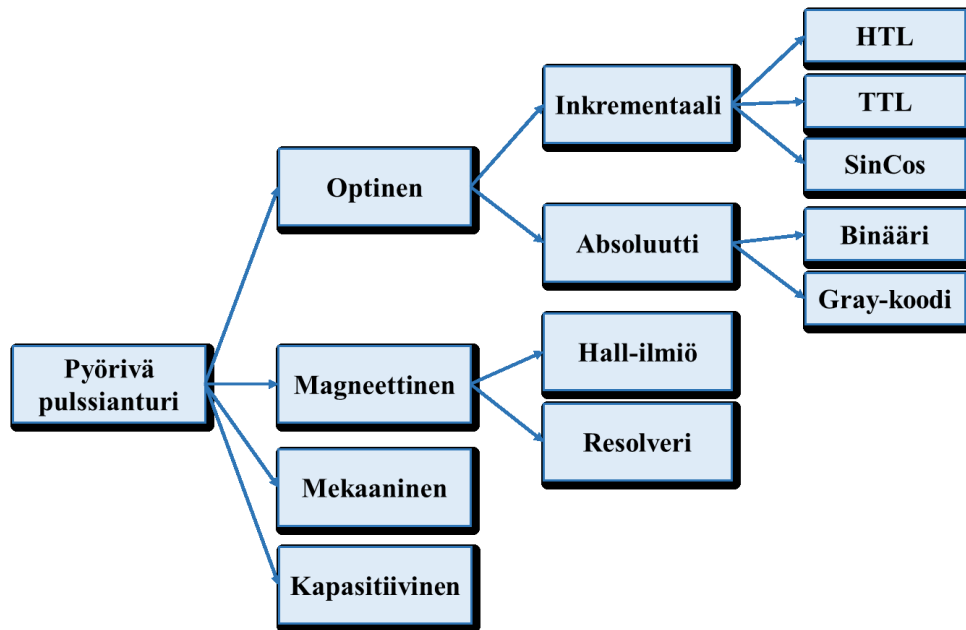
3. PULSSIANTURITEKNIikka

Pulssianturin tehtävänä on mitata pyörivän akselin pyörimisnopeutta tai asentokulmaa. Tässä luvussa esitellään erilaisten pyörivien pulssianturien toimintaperiaatteet ja niiden toteutustavat. Sähkömoottorin akselin nopeutta mittaamalla pulssianturi mahdollistaa nopeustiedon toimittamisen moottorilta taajuusmuuttajalle. Pulssianturin tuottamaa mittaustietoa käytetään taajuusmuuttajassa moottorin säädössä. Säädössä tehtävät koordinaattimuutokset vaativat tarkan nopeus- ja kulmatiedon. Tämä on mahdollista, kun todellinen roottorin pyörimisnopeus on käytettävissä.

Pulssianturi on sähkömekaaninen laite, joka muuntaa mekaanisen pyörimisliikkeen digitaaliseksi pulssisignaalksi. Tästä syystä pulssianturista käytetään myös nimitystä enkooderi. Signaalit kuljetetaan pulssianturilta taajuusmuuttajalle tyypillisesti häiriösuojattua kaapelia pitkin, mutta tiedonsiirto on mahdollista myös kuitua tai väylää pitkin. Väylän käyttö vaatii kuitenkin erillisen väyläsignaalia käsittelevän laitteen, ellei taajuusmuuttaja ole jo valmiiksi väyläyhteensopiva. Pulssiantureita käytetään nykyisin useissa eri käyttökohteissa, joissa moottorikäytöt vaativat erityistä tarkkuutta laajalla nopeusalueella. Pyörivän akselin pyörimistä mittaavan pulssianturin lisäksi on olemassa lineaarisia pulssiantureita, jotka mittaavat lineaarisen liikkeen paikkaa tai nopeutta. Lineaarisia pulssiantureita ei käsitellä tässä työssä. [13]

Pulssianturit voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan toimintaperiaatteen mukaan: inkrementaali- ja absoluuttiantureihin. Niiden toimintaperiaatteet ja käyttökohteet eroavat toisistaan. Inkrementaalianturi tuottaa tietyn määrän pulsseja per kierros, joiden perusteella pyörimisnopeus voidaan laskea. Inkrementaalianturilla ei voida suoraan tuottaa akselin todellista asentokulmatietoa, kun taas absoluuttianturilla se on mahdollista. Absoluuttianturi tuottaa monibittisiä signaaleja, joiden perusteella voidaan laskea akselin tarkka asentokulma jatkuvasti. [13]

Pulssianturit voidaan jakaa toteutusteknologian perusteella neljään kategoriaan, jotka ovat optinen, magneettinen, mekaaninen ja kapasitiivinen. Kuvassa 12 on esitetty jaottelu sekä toimintaperiaatteen että toteutustavan mukaan. Tämän työn kannalta merkittävimmät anturityypit ovat optisesti ja magneettisesti toteutetut pulssianturit. Tällä hetkellä markkinoilla olevista pyörivistä pulssiantureista suurin osa perustuu näihin teknologioihin. Nykyään useat pulssianturivalmistajat tarjoavat molemmilla tekniikoilla toteutettuja pulssiantureita. Mekaaninen pulssianturi rakentuu eristetystä metallikiekosta, johon liukuvat kontaktit osuvat akselin pyöriessä. Tällaista anturityyppiä voidaan käyttää ainoastaan matalilla kierrosnopeuksilla, joten tämän työn kannalta mekaaninen pulssianturi ei ole soveltuva nopeasti pyörivän moottorin nopeuden mittaukseen. [14]



Kuva 12. Pulssiantureiden luokittelu toimintaperiaatteen ja toteutusteknologian perusteella.

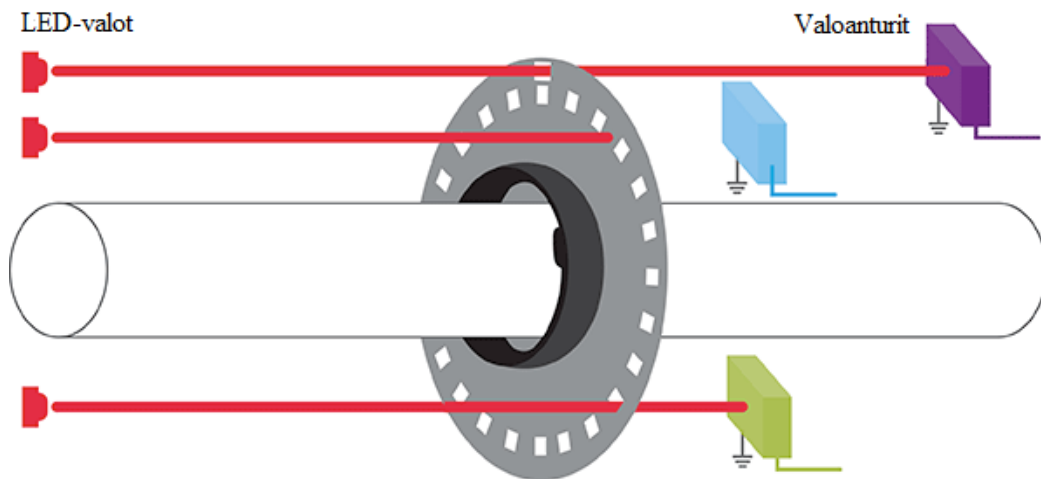
Kapasiitiiviset anturit perustuvat nimensä mukaisesti kahden elektrodin välillä vaihtuvaan kapasitanssiin, joka muuttuu pyörivän akselin pyöriessä. Kapasiitiivinen anturi koostuu korkeataajuuslähettimestä, vastaanottimesta sekä kiekosta, jossa on metallista tehty sini-muotoinen kuvio. Roottorin akseli on kiinnitetty kiekon keskeltä läpi. Akselin pyöriessä lähetin lähettää korkeataajuussignaalia, jonka kiekko muuntaa moduloiduksi signaaliksi. Vastaanotin lukee moduloidun signaalin ja muuntaa signaalin sopivaan muotoon ulostulosignaaliksi. Verrattuna optisiin pulssiantureihin kapasiitiivisissa antureissa ei ole lainkaan LEDejä, joilla on rajallinen elinikä. Toisaalta ne ovat herkempiä sähköisille häiriöille kuin optiset pulssianturit. [15]

3.1 Inkrementaalianturi

Inkrementaalipulssianturia käytetään moottorin akselin pyörimisnopeuden mittaamiseen ja sillä voidaan määrittää myös akselin pyörimissuunta. Inkrementaalianturi tuottaa pulssisignaaleja, jotka ovat verrannollisia akselin pyörimisliikkeeseen. Inkrementaalipulssiantureilla on tyypillisesti 6 ulostulokanavaa (A+, A-, B+, B-, Z+ ja Z-). Optisesti toteutetut pulssianturit ovat yleisimmin käytettyjä inkrementaaliantureita. Tämän tyyppiset pulssianturit käsittävät kaikki sellaiset laitteet, joilla voidaan valon avulla muuttaa mekaaninen liike sähköiseksi signaaliksi. Optiset pulssianturit perustuvat nimensä mukaisesti valon lähettämiseen ja vastaanottamiseen akselin pyöriessä. Optinen pulssianturi koostuu valonlähteistä, pyörivästä kiekosta, valoantureista sekä signaalinkäsittelyelektronikasta.

Optisten pulssiantureiden toimintaperiaate voi perustua kahteen erilaiseen menetelmään, joissa ensimmäisessä käytetään valoa läpäisevää pyörivää kiekkoa ja toisessa valoa heijastavaa kiekkoa. Ensimmäisessä menetelmässä valonlähteenä toimivat LED-valot ovat

sijoitettu vastakkaiselle puolelle pyörivää kiekkoa kuin valoanturit, kuten kuvassa 13 on havainnollistettu. Tämä menetelmä perustuu käyttämällä kiekkoa luomaan esteen valon kululle tietyissä kohdissa ja samalla päästämällä valoa läpi toisissa kohdissa. Valoanturi voi olla valokenno, joka alkaa johtaa virtaa, kun siihen kohdistuu valoa. Valoanturi voi myös perustua resistanssin muutokseen, jonka ollessa verrannollinen valon määrään anturilla. [16]



Kuva 13. Optisen pulssianturin toimintaperiaate havainnollistettuna. [15]

Kiekkon ulkokehällä voi olla useampi rata, joihin LED-valot osuvat. Tavallisesti kiekkon kehällä on kaksi rataa, joista toinen on A- ja B-signaaleja varten ja toinen Z-signaalia varten. A- ja B-signaaleja varten radalla on vuorotellen läpinäkyviä ja läpinäkymättömiä alueita. Z-signaalia varten kehällä on vain yksi läpinäkyvä ikkuna. Pyörivän kiekon materiaali on tyypillisesti muovia, lasia tai metallia riippuen kiekolla tarvittavasta pulssimäärästä ja valmistajasta. Läpinäkyvään kiekkoon perustuvassa optisessa pulssianturissa kiekon päävaatimuksena on tarkka jako läpinäkyviin ja läpinäkymättömiin alueisiin. Lisäksi kiekon materiaalivalintaan vaikuttaa anturin käyttökohde.

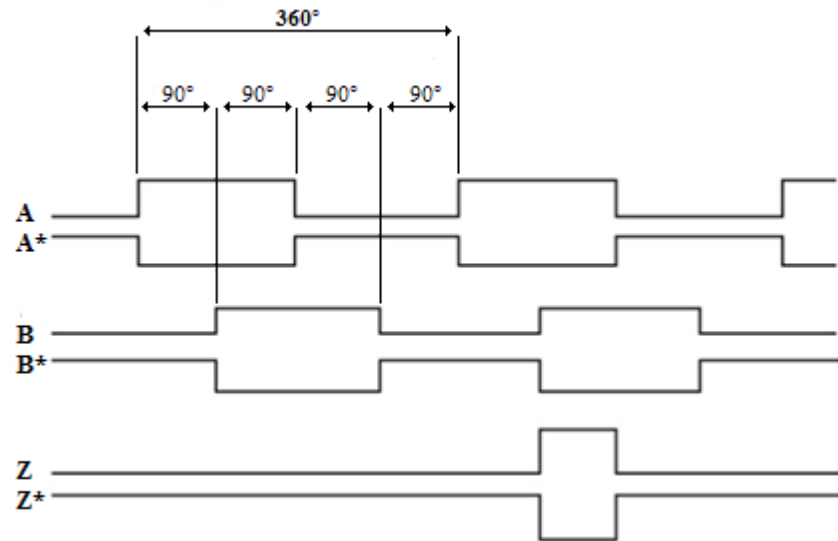
Korkeaa tarkkuutta vaativissa käyttökohteissa kiekkomateriaalina käytetään yleensä lasia, koska siihen voidaan tarkasti valmistaa korkeita pulssimääriä sekä lasin lämpölaajeneminen on vähäistä. Tämä on yleensä toteutettu niin sanotun litografisen prosessin avulla, jossa läpinäkyvän kiekkomateriaalin päälle on asetettu pinnoitemateriaalia esimerkiksi kromia. Valmistettavan kiekon laadun määrää litografisen prosessin tarkkuus. Muovilla on vastaavat ominaisuudet kuin lasilla, mutta siinä tarkkuus on heikompi. Metallia käytetään pyörivän kiekon materiaalina silloin, kun kestävyys on kriittinen parametri ja vaadittu pulssimäärä ei ole korkea. [16]

Läpinäkyvän kiekon käyttöön perustuvassa menetelmässä on etuna sen suuri kehittyneisyys ja sillä voidaan saavuttaa korkea tarkkuus, joka vaikuttaa pulssianturin signaalin laatuun. Kuitenkin tällä rakenteella on huonona puolena se, että valon tulee olla mahdollisimman tasalaatuista. Tämä vaatii rinnakkaisia valon säteitä, joka voidaan saavuttaa käyttämällä erillistä linssiä. Tällainen rakenne kasvattaa pulssianturin akselin suuntaista kokoa, joka voi olla tietyissä käyttökohteissa kriittinen. Lisäksi valoanturin tulee olla erittäin tarkasti asetettu kiekon toiselle puolelle, jotta signaalin laatu ei kärsisi.

Toinen menetelmä toteuttaa optinen pulssianturi perustuu valoa heijastavan kiekon käyttöön. Tässä menetelmässä valonlähteet ovat samalla puolella pyörivää kiekkoa kuin valoanturit. Valo heijastuu kiekon heijastavista kohdista takaisin valoanturille. Pyörivä kiekko on jaettu heijastaviin ja heijastamattomiin kohtiin, joiden perusteella pulssit määräytyvät. Heijastavaa kiekkoa käytettäessä pulssianturin fyysiset mitat pienentyvät tilan tarpeen vähentyessä. Pulssianturi saadaan tällöin pienempään tilaan ja joissain käyttökohteissa tila voi olla määräävä tekijä. Lisäksi tätä menetelmää käytettäessä ei tarvita erillistä linssiä valonlähteen eteen. Linssin käyttö valonlähteen yhteydessä rajoittaa maksimi toimintalämpötilan yleensä +85 asteeseen, kun ilman linssiä maksimi toimintalämpötila voi olla +105 astetta.

Riippuen anturissa käytetystä menetelmästä akselin pyöriessä tietyllä nopeudella LED-valon lähettämät valonsäteet osuvat suoraan tai heijastuvat valoantureihin. Kiekolla olevien läpinäkyvien tai heijastavien kohtien lukumäärä per kierros määrittelee anturin pulssimäärän. Anturin tuottama pulssiluku on merkittävä tekijä anturia valittaessa, koska se on yksi osatekijä määrittäessä moottorisäädön tarkkuutta. Tyypillisesti markkinoilla olevissa optisissa pulssiantureissa pulssien lukumäärä vaihtelee välillä 24 – 4096 per kierros. Tarvittava pulssimäärä määräytyy käyttökohteen perusteella. Lisäksi anturin pulssimäärän perusteella määräytyy mittauksen resoluutio. [16]

Valoanturin vastaanottamien valonsäteiden perusteella muodostetaan pulssianturin ASIC-elektroniikkapiirin avulla ulostulosignaali. ASIC-piirillä tarkoitetaan sovelluskohdista integroitua elektroniikkapiiriä. Ulostulosignaalin muoto määräytyy anturissa käytettävän signaalinkäsittelyelektroniikan perusteella. Yleisimmät ulostulosignaalit ovat muodoltaan kanttiaaltoa tai sinimuotoista aaltoa. Pulssianturin ulostulotopologioita käsitellään tarkemmin luvussa 4.1.1. Anturin ulostulosignaali lähetetään kaapelia tai väylää pitkin taajuusmuuttajan ohjauskortille, jossa suoritetaan tarvittavat laskutoimenpiteet moottorin akselin pyörimisnopeuden määrittämiseksi. Vaihtoehtoisia signaalin kuljetustapoja käsitellään luvussa 4.1.4. [14]



Kuva 14. Inkrementaalianturin kolmen kanavan A, B ja Z ulostulosignaalit [17].

Optisessa pulssianturissa on yleensä useita valonlähteitä ja niitä vastaavia valoantureita. Jos anturissa on vain yksi valonlähde, tällöin anturi toimii yksikanavaisena (kanava A). Tällöin voidaan mitata pyörimisnopeus, mutta ei pyörimissuuntaa. Tyypillisesti pulssianturilla on kaksi kanavaa (kanavat A ja B) eli kaksi valonlähdettä ja valoanturia. Kahta kanavaa käyttämällä voidaan päätellä akselin pyörimissuunta. Kanavien A ja B signaalit ovat 90° vaihesiirrossa toisiinsa nähden, minkä perusteella pyörimissuunta voidaan päätellä. Akselin pyöriessä myötä päivään kanavan A signaalin nouseva reuna on 90° edellä kanavan B signaalin nousevaa reunaa. Vastaavasti akselin pyöriessä vastapäivään kanavan B signaalin nouseva reuna on 90° edellä kanavan A signaalin nousevaa reunaa. Tällaisia ulostulosignaaleita kutsutaan myös quadratuuri-signaaleiksi. Yllä olevassa kuvassa 14 on esitetty kolmen kanavan (A, B ja Z) signaalit ja niiden invertoidut signaalit. Yksi pulssijakso käsittää siis 360° , joka on kuvassa 14 havainnollistamista varten jaettu neljään osaan. [13]

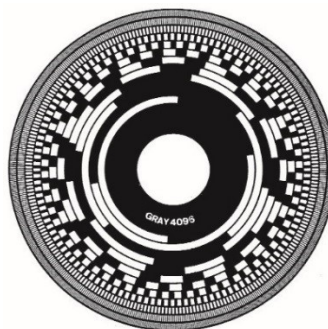
Inkrementaalianturin ulostulossa on yleensä kanavien A ja B lisäksi myös niiden invertoidut signaalit A* ja B*, referenssisignaali Z ja sen invertoitu signaali Z*. Referenssisignaali Z lähetetään kerran per kierros samassa kohtaa kierrosta ja tätä signaalia voidaan käyttää referenssipisteenä tietyissä käyttökohteissa. Invertoituja signaaleja käytetään siirtolinjan päässä varmentamaan, ettei signaaleissa ole syntynyt virheitä. [17]

Pulssianturin ASIC-piirissä toteutetaan signaalinkäsittely, jossa analogisignaalit muutetaan digitaalisignaaleiksi. Samalla anturin ulostulon pulssimäärää voidaan kasvattaa interpoloinnilla analogi-digitaali -muuntimessa. Tuottamalla pulssi kummankin signaalin A ja B nousevan ja laskevan reunan kohdalla voidaan pyörivän kiekon todellinen pulssimäärä kasvattaa nelinkertaiseksi fyysiseen pulssimäärään verrattuna [16]. Absoluuttista asentokulman mittausta ei voida tuottaa inkrementaalianturilla. Tästä johtuen tämän tyyppistä anturia käytetään sovelluskohteissa, joissa pyörimisnopeuden mittaaminen on riittävä.

Inkrementaalianturilla voidaan kuitenkin tuottaa suhteellinen kulmatieto vertaamalla tuotettujen pulssien määrää vertailupisteeseen. Käytön päätyttyä moottorin akselin tulisi olla takaisin vertailupisteessä, jotta kulman laskenta olisi mahdollista uudelleen käynnistettäessä. Tämä on haastavaa tilanteissa, joissa moottori on jouduttu sammuttamaan ennenaikaisesti vian tai muun syyn takia. [16]

3.2 Absoluuttianturi

Absoluuttianturia käytetään pääasiassa akselin asentokulman mittaamiseen, koska sillä pystytään lukemaan paikkatietoa koko toiminnan ajan. Kulmatieto on siis mahdollista saada, vaikka anturi olisi ollut sähköttä välissä jonkun aikaa. Inkrementaalianturiin verrattuna absoluuttianturi ei tarvitse erillistä laskuria laskemaan pulssien lukumäärää referenssipisteestä. Absoluuttianturi perustuu samaan toimintaperiaatteeseen, vaikka anturi olisi toteutettu optisesti tai magneettisesti. Absoluuttiantureita on yksi- ja monikierrosmalleina. Tämän työn kannalta absoluuttianturi ei ole keskeisin, koska nopeusmittausta varten riittää inkrementaalianturi, joka on yleensä kustannuksiltaan edullisempi kuin absoluuttianturi. Absoluuttiantureita käytetään myös tilanteissa, joissa vaaditaan korkea toiminnallisen turvallisuuden taso, kuten PL/d tai PL/e. [13]



Kuva 15. Gray-koodausta käyttävä absoluuttipulssianturin kiekko [18].

Optinen absoluuttianturi on perusrakenteeltaan samankaltainen kuin inkrementaalianturi. Siinä on siis valonlähde, pyörivä kiekko sekä valoanturi. Pyörivä kiekko on kuitenkin erilainen, jotta akselin asentokulma voidaan saada suoraan anturista laskettua. Kiekkon kehällä ei ole ainoastaan yhtä rataa vaan yleensä useampia ratoja, joissa on vuorotellen läpinäkyviä ja läpinäkymättömiä alueita. Mikäli kiekkon kehällä on useampia ratoja, vaaditaan anturiin myös yhtä monta valonlähdettä. Kuvassa 15 on esitetty absoluuttianturin kiekko, jonka kehällä on useita ratoja. [16]

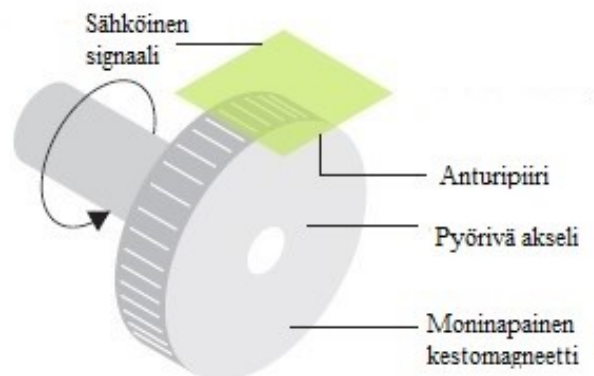
Absoluuttianturit voidaan kategorisoida anturin koodausmenetelmän perusteella. Niistä yleisimmin käytetyt ovat suora binääri-koodaus ja Gray-koodaus. Suoraa binäärikoodausta käytettäessä pyörivässä kiekkossa voi olla n määrä ratoja, jolloin ulostulona voidaan tuottaa n -bittinen digitaalinen sana. Tämä digitaalinen sana merkitsee tiettyä asentokulmaa. Sisimmän radan ollessa merkitsevin bitti painotuksella 2^{n-1} ja uloimman radan ollessa vähiten merkitsevin bitti painotuksella 2^0 . Kullakin radalla on oma valonlähde ja

valoanturi, jotka tulkitsevat, onko kiekon kohta läpinäkyvä vai ei. Laskemalla jokaisen radan tilan niille kuuluvilla painotuksilla jollain ajanhetkellä saadaan summaksi kulmaa vastaava arvo. [16]

Gray-koodaus eroaa suorasta binäärikoodauksesta siten, että jokainen peräkkäinen arvo eroaa toisistaan ainoastaan yhden bitin verran. Tällä tavalla Gray-koodaus on vähemmän herkkä virheille, sillä kiekon pyöriessä suurin mahdollinen virhe on vain 1 bitin verran. Kun taas binäärikoodausta käytettäessä virhe voi olla suurempi, jos kaksi bittiä ei muutu samanaikaisesti. [16]

3.3 Magneettinen pulssianturi

Optinen pulssianturi on yleisimmin käytetty anturityyppi tuottamaan nopeustietoa moottorisäädölle moottorin nopeuden mittauksessa. Nykyään monet pulssianturitoimittajat valmistavat myös magnetismiin perustuvia pulssiantureita. Magneettinen pulssianturi on optisen pulssianturin lisäksi toinen toteutusteknologia, jolla voidaan mitata moottorin akselin pyörimisnopeutta. Magnetismiin perustuvia pulssiantureita voidaan käyttää pyörivän sekä lineaarisen liikkeen mittaamiseen. Kuvassa 16 on havainnollistettu tämän tyyppinen pyörivä magneettianturi.



Kuva 16. Magneettianturi, joka koostuu magneettirenkaasta ja anturilukijasta. [muokattu lähteestä 20]

Magneettinen pulssianturi on optiseen verrattuna varmempi käyttöympäristön haittojen kannalta. Optisen pulssianturin haittapuolena on heikompi kestävyys haastavissa käyttöympäristöissä. Erityisesti öljy, lika, pöly ja kosteus vaikuttavat anturin toimintaan. Magneettianturin huonona puolena on se, että pulssien lukumäärä rajoitetumpi, jos ei käytetä interpolointia anturin elektroniikassa. Kuitenkin yleensä antureiden ASIC-piirit hyödyntävät interpolointikertoimia suurempien pulssimäärän tuottamiseksi. [19]

Pyörivän liikkeen mittaamiseen soveltuvat magneettiset anturit hyödyntävät kestopagneetteja, Hall-antureita, magneto-resistiivisiä antureita tai käämittyjä johtimia. Anturi pys-

tyy joko havaitsemaan suoranaisesti magneettikentän tai anturin ominaisuudet ovat peräisin magneettikentän hyödyntämisestä. Resolveri on myös yksi magnetismiin perustuva pyörimisnopeuden mittaustaite, jonka toimintaperiaate käsitellään lyhyesti tämän luvun lopussa. Magneettiset pulssianturit voidaan toteuttaa joko inkrementaali- tai absoluuttiantureina. [16]

Yleisin tapa toteuttaa magneettinen pulssianturi on kiinnittää moottorin akseliin magneettirengas, jonka pyörimisen anturi havaitsee. Magneettirengas rakentuu tyypillisesti kahdesta materiaalista, joista toinen on ruostumatonta terästä ja toinen on magneettista materiaalia renkaan pinnalla. Magneettirengaan lisäksi on erikseen paikallaan oleva anturi, joka on kiinnitetty siten, että se havaitsee magneettikentän muutokset magneettirengaan pyöriessä akselin mukana. [1]

Magneettirengaan pinnalla on vuorotellen magneettisia napoja, joiden lukumäärä määrittää anturin pulssimäärän, mikäli interpolointia ei anturissa käytetä. Magneettisten napojen määrää rajoittaa magneettirengaan ulkohalkaisija johtuen siitä, että magneettisella navalla on tietty leveys, joka on tyypillisesti 3 – 5 mm riippuen valmistustekniikasta. Interpoloinnin avulla voidaan kasvattaa pulssianturin tuottamaa pulssimäärää. Magneettirengaan sisähalkaisijan suuruuden määrittää kiinnitettävän akselin halkaisija. Ulkohalkaisijan mitat määrittävät tarvittavan pulssimäärän käyttökohteessa. Magneettirengaan ollessa pieni suuren pulssimäärän saavuttaminen voi olla mahdotonta, vaikka interpoloinnilla voidaan pulssimäärää kasvattaa. Tällöin suurten pulssimäärien toteuttaminen vaatii suuremman ulkohalkaisijan. [1]

Magneettianturin merkittävin etu on, että siinä hyödynnetään kosketuksettomia anturielementtejä. Tämä tarkoittaa sitä, että anturissa ei ole mekaanista kosketusta pyörivän osan ja paikallaan olevan osan välillä, kun moottorin akseli pyörii. Tällöin ei tarvita laakereita, jotka voisivat ylikuumentua korkeilla pyörimisnopeuksilla. Kosketukseton tekniikka kasvattaa merkittävästi anturin elinikää johtuen siitä, että anturissa ei ole mekaanisesti kuluvia laakereita, joiden elinikä on rajallinen. Useissa teollisuuden käyttökohteissa tämä on tärkeää johtuen korkeasta luotettavuusvaatimuksesta. Lisäksi kosketukseton anturitekniikka mahdollistaa niiden käytön korkeiden pyörimisnopeusten sovelluksissa. [16]

Magneettirengaan ja anturin asennuksessa tulee huomioida niiden asennuspaikka ja kulma toisiinsa nähden. Valmistajat ovat määritelleet omille antureilleen asennustoleranssit, jotka tulee ottaa huomioon anturin asennuksessa. Tyypillisiä asennustoleranssien arvoja on anturin ja magneettirengaan etäisyydelle 0,1 – 1 mm ja niiden väliselle kulmalle maksimissaan 3° astetta. Työssä tullaan tarkastelemaan magneettirengaan asennuspaikkaa, ja sitä kuinka se vaikuttaa anturin toimintaan. Lisäksi moottorissa olevan sähkömagneettisen jarrun vaikutusta magneettiseen pulssianturiin tutkitaan testausvaiheessa. [21]

Yksi menetelmä magneettikentän mittaukseen on Hall-antureiden käyttö. Anturi perustuu nimensä mukaisesti Hall-ilmiöön, joka on keksitty vuonna 1879 Edwin Hall:n toimesta.

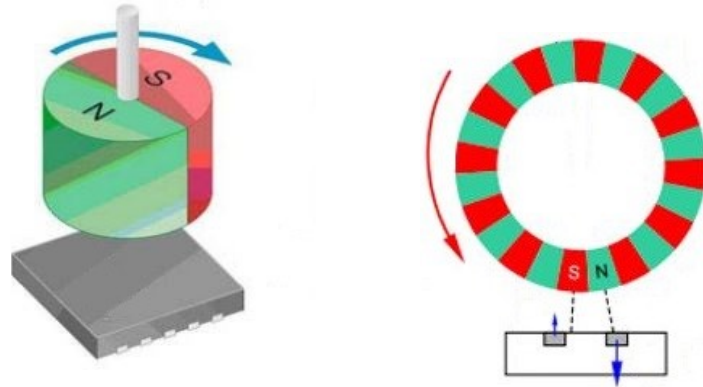
Hall-anturit valmistetaan nykyään puolijohdemateriaaleista, kun Hall:n kokeissa käytettiin kultajohtimia. Hall-anturin toiminta perustuu magneettikentän vaikutukseen virralliseen johtimeen. Kun magneettikenttä on 90° asteen kulmassa johtimessa kulkevan virran suuntaan, syntyy johtimen päiden väliin potentiaaliero, jota kutsutaan Hall-jännitteeksi. Hall-jännitteen suunta on kohtisuorassa magneettikentän ja virran suuntiin verrattuna. Sen suuruus on riippuvainen magneettikentän vuontiheyden B arvosta ja virran I suuruudesta. Magneettikenttä aiheuttaa johtimessa kulkeviin varauksen kuljettajiin voiman. Tästä syystä johtimen toisella puolella suurempi määrä varauksenkuljettajia kuin toisella, ja tästä syntyy jännite. Hall-jännite V_H on määritetty kaavan (6) mukaisesti.

$$V_H = K_H \left(\frac{BI}{z} \right) \quad (6)$$

Kaavassa 10 K_H on Hall-vakio, B magneettivuontiheyden arvo, I johtimen virran suuruus ja z johtimen paksuus. Käytännössä Hall-anturi asetetaan magneettirenkaan läheisyyteen siten, että akselin pyöriessä anturi havaitsee magneettikentän muutoksen jännitteen muutoksena. [16]

Hall-antureita on sekä analogisia että digitaalisia antureita. Digitaalinen anturi pystyy havaitsemaan ainoastaan kahta tilaa: päällä tai pois päältä. Anturin tunnistus perustuu hystereesiin eli magneettivuontiheyden ylittäessä tai alittaessa tietyn arvon Hall-anturin ulostulo muuttuu. Analogiset anturit vastaavasti mittaavat magneettivuontiheyden arvoa jatkuvasti ja muuttavat sen mukaan anturin ulostulon jännitettä. Hall-antureissa on lisäksi lämpötilan kompensointia varten tarvittavaa elektroniikkaa. [22]

Hall-ilmiötä voidaan hyödyntää havaitsemaan muuttuvia magneettikenttiä. Toisin sanoen pyörivän kestopagneetin pyörimisliike voidaan havaita Hall-anturilla. Seuraavaksi on esitetty kaksi tapaa, joilla voidaan mitata akselin pyörimisnopeutta Hall-antureilla. Kuvassa 17 vasemmalla puolella on esitetty akselin päähän kiinnitetty magneetti, jonka pyörimisen Hall-anturi havaitsee. Tämän tyyppisessä ratkaisussa magneetissa on vain kaksi napaa, jolloin suuremmat pulssimäärät toteutetaan anturin elektroniikalla interpoloimalla Hall-anturin tuottamaa signaalia. Kuvassa 17 oikealla puolella on esitetty toinen tapa, jossa on akselissa magneettirengas, jonka magneettikenttien muutokset havaitsevat useimmat Hall-anturit.

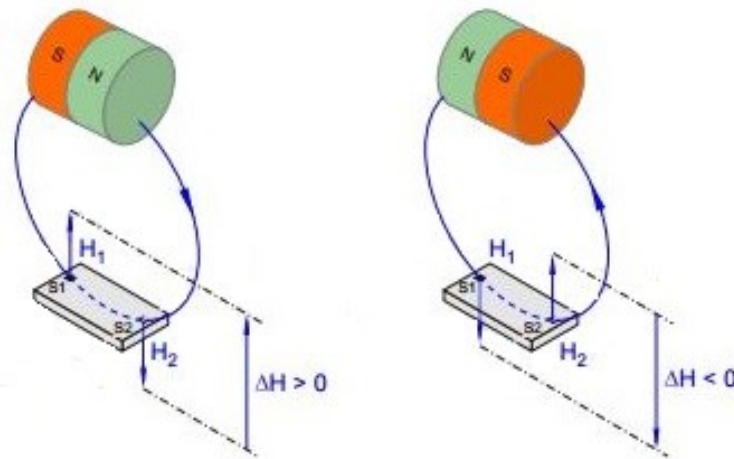


Kuva 17. Kaksi tapaa hyödyntää Hall-antureita pyörimisliikkeen mittauksessa.
[muokattu lähteestä 23]

Ensimmäisessä tavassa pyörivän akselin päähän on kiinnitetty kaksinapainen magneetti. Tietyn etäisyyden päähän magneetin päässä akselin suunnassa on Hall-anturit, jotka tunnistavat magneetin pyörimisen. Magneettina voidaan käyttää neodyymipohjaista (NdFeB) tai samarium-koboltti (SmCo) materiaalia. Magneetin pyörimisliikkeen havaitsemiseen käytetään vähintään kahta Hall-anturia, jotka muuttavat magneettikentän mitattavaksi Hall-jännitteeksi kaavan 10 mukaisesti. Hall-anturin ollessa xy-tasossa pyörivän magneetin synnyttämän magneettikentän z-komponentti voidaan ainoastaan havaita Hall-antureilla. [24]

Hall-signaali muodostuu kahden Hall-anturin yhteistoiminnasta. Tällöin magneetin pyöriessä Hall-anturit tuottavat sini- ja kosinimuotoiset ulostulojännitteet muutetaan anturin sisäänrakennetulla A/D-muuntimella digitaalisignaaleiksi. Lisäksi A/D-muuntimella toteutetaan interpolointi, jolloin anturin ulostuloon saadaan suurempi määrä pulsseja per kierros kuin kaksi. Pulssien lukumäärään määrittää interpolointikerroin ja samalla kertotimen maksimi rajoittaa pulssien lukumäärän maksimiarvoa. [24]

Toisessa tavassa pyörivän magneettirenkaan liikettä voidaan havaita Hall-antureilla, jotka on asetettu ilmvälän päähän säteittäisessä suunnassa renkaasta. Myös tässä tavassa havaitaan ainoastaan magneetin tuottaman magneettikentän z-komponentti Hall-antureilla, kun Hall-anturi on xy-tason suuntainen. Tyypillisesti piirilevy, jossa Hall-anturit sijaitsevat, on täysin ei-magneettinen, joten sillä ei ole vaikutusta mitattavaan magneettikenttään. Magneettirenkaan liikkeen havaitsemiseen käytetään yleensä kahta tai useampaa Hall-anturia. Kuvassa 18 on havainnollistettu tapa, jolla anturit havaitsevat magneettirenkaan muodostaman kentän. Magneettikentän voimakkuus on suurimmillaan magneettirenkaan kehällä ja kentän voimakkuus heikkenee etäisyyden kasvaessa. Tämän vuoksi anturin tulisi olla mahdollisimman lähellä säilyttäen kuitenkin ilmvälän. [25]



Kuva 18. Magneettirenkaan napojen synnyttämät magneettikentät läpäisevät Hall-anturit. [muokattu lähteestä 25]

Kummankin antureiden läpäisseiden magneettikenttien H_1 ja H_2 perusteella voidaan määrittää niiden välinen erotus ΔH . Magneettikenttien suuruuksien perusteella Hall-anturi muodostaa Hall-jännitteet, joiden avulla differentiaalijännitteen arvo lasketaan. Riippuen magneettirenkaan sijainnista ja napojen polaarisuuksista differentiaalijännitteen arvo vaihtelee. Tämän jännitteen perusteella muodostetaan digitaalinen ulostulosignaali. Differentiaalijännitteen arvon ylittäessä tietyn kynnsjännitteen arvon ulostuloon kytkeytyy digitaalipulssin ylempi taso eli looginen yksi. Vastaavasti jännitteen arvon alittaessa tietyn kynnsjännitteen arvon ulostuloon kytkeytyy digitaalipulssin alempi taso eli looginen nolla. [25]

Resolveri on myös yksi magnetismiin perustuva pyörivän liikkeen anturi. Resolveri koostuu kahdesta staattorikämmityksestä ja yhdestä roottorikämmityksestä. Syöttämällä roottoriin virityssignaalin staattorikämmitykseen indusoituu vastaava jännitesignaali. Ulostulosignaalin kulma riippuu staattorikämmitysten sijainnista suhteessa roottorikämmitykseen. Resolverin ulostulosignaali on tyypillisesti sin/cos -signaalia. Resolveri on myös kosketukseton anturiratkaisu, joten korkeat pyörimisnopeudet ovat mahdollisia mekaaniselta kannalta. [26]

3.4 Pyörimisnopeuden laskenta

Pulssisignaalien perusteella taajuusmuuttajan ohjauspiiri laskee pyörimisnopeuden ja -kulman moottorisäätöä varten. Kaksi yleisintä menetelmää inkrementaalianturin pyörimisnopeuden määrittämiseksi ovat taajuusmittaukseen ja jaksonaikamittaukseen perustuvat menetelmät. Kirjallisuudessa on esitetty myös monia muita menetelmiä kulmanopeuden määrittämiseen, jotka kuitenkin osaksi perustuvat näihin kahteen menetelmään. Työssä käytettävässä taajuusmuuttajassa sovelletaan taajuusmittaukseen perustuvaa nopeuden laskentaa. Taajuusmittaukseen perustava menetelmä on yksinkertainen tapa mitata

pyörimisnopeus, mutta sen tarkkuus heikkenee pienillä nopeuksilla. Jaksonajan mittaukseen perustava menetelmä on tarkempi nopeuden määrittämisessä pienillä nopeuksilla. [28]

Taajuusmittaukseen perustuva nopeudenlaskenta on näistä yksinkertaisin nopeuden mitausmenetelmä. Siinä akselin pyörimisnopeus määritetään laskemalla pulssien lukumäärä tietyn näytteenottojakson aikana. Digitaaliprosessorin näytteenottojakson aika on määritetty laitteeseen riippuen tarvittavasta tarkkuudesta ja nopeusalueesta. Tällä tavalla laske-
malla kulmanopeus pysyy vakiona näytteenottojakson ajan. Taajuusmittaukseen perustuva kulmanopeuden mittauksen tarkkuus heikkenee mitattavan kulmanopeuden pienentyessä. Kuitenkin nostinkäyttökohteessa tällä menetelmällä saavutetaan riittävä tarkkuus nopeuden mittaukseen.

Määrittääkseen taajuuden mittaukseen perustuvalla menetelmällä kulmanopeus ω oletetaan, että pulssien lukumäärä näytteenottojakson T aikana on m pulssia. Siten keskiarvoaika yhdelle pulssille voidaan esittää kaavan (7) perusteella. Riippuen käyttökohteesta näytteenottojakson pituus vaihtelee. Tässä työssä käytetyn taajuusmuuttajalle asetetun näytteenottojaksonaika on 5 millisekuntia.

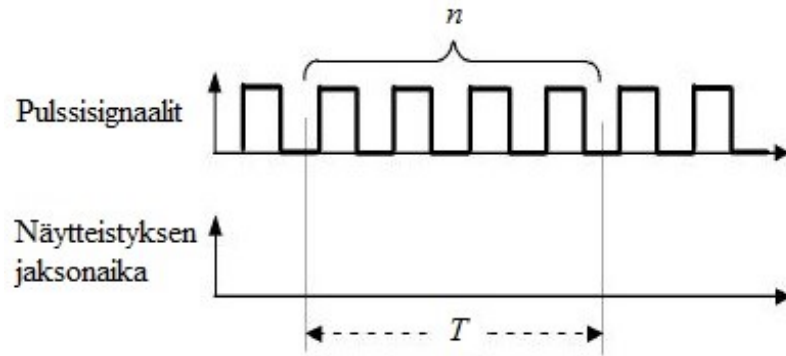
$$t_{pulse_avg} = \frac{T}{m} \quad (7)$$

Kun inkrementaalianturissa tuottaa yhdellä kierroksella N määrän pulsseja, keskiarvoaika yhdelle kierrokselle voidaan esittää kaavan (8) mukaisesti.

$$t_{rev_avg} = \frac{NT}{m} \quad (8)$$

Tällöin kaavan (8) perusteella pulssianturin pyörimisnopeus voidaan laskea kaavassa 9 esitetyn mukaisesti. Kuvassa 19 on havainnollistettu pulssisignaalin pulsseja ja näytteenoton jaksonaikaa, joiden perusteella nopeus voidaan laskea. [27]

$$\omega = \frac{2\pi m}{NT} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (9)$$



Kuva 19. Taajuusmittaukseen perustuvan nopeuden laskennassa käytetyt pulssisignaalit ja näytteenoton jaksonaika havainnollistettuna [muokattu lähteestä 28].

Taajuusmittaustapaa käytettäessä nopeuden laskennassa muodostuu kvantisointivirhe johtuen siitä, että näytteenottojakson aikana laskettu kulmanopeus pysyy vakiona. Kvantisointivirheeseen vaikuttaa myös pulssien lukumäärän epävarmuudesta, joka aiheutuu pulssisignaalin ja näytteenottojakson synkronoimattomuudesta. Tällä tarkoitetaan sitä, että näytteenottojakson alku- ja loppukohdat eivät välttämättä ole kohdakkain pulssien kanssa. Pyörimisnopeuden muuttuessa pulssisignaalin taajuus muuttuu, mikä tekee näytteenottojakson synkronoimisesta haastavaa.

Kulmanopeuden kvantisointivirhe voidaan esittää kaavan (10) mukaisesti. Virheen absoluuttinen arvo pysyy vakiona, koska pulssimäärä per kierros ja näytteenottojakso pysyvät vakiona. [28]

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{NT} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (10)$$

Kaavan (10) perusteella virhe on riippumaton itse kulmanopeudesta. Kvantisointivirhe riippuu ainoastaan pulssimäärästä sekä näytteenottojakson pituudesta. Kulmanopeudelle voidaan määrittää suhteellinen tarkkuus kaavan (11) mukaisesti kaavojen (9) ja (10) perusteella. [28]

$$\varepsilon_{\omega} \% = \frac{2\pi}{\omega \cdot N \cdot T} \cdot 100 \quad (11)$$

Suhteellisen tarkkuuden perusteella voidaan havainnollistaa virheen suuruutta suhteessa kulmanopeuden arvoon. Pienillä nopeuksilla virhe on suhteessa suuri ja tällöin kulmanopeuden arvo ei ole kovin tarkka. Suhteellista virhettä voidaan pienentää kasvattamalla näytteenoton jaksonaikaa tai kasvattamalla pulssien lukumäärää per kierros. Transientitilanteissa nopeuden laskennan tarkkuus pienenee johtuen näytteenoton jaksonajan pituudesta. Täten näytteenottojakson pituutta ei ole järkevää kasvattaa liian suureksi. [28]

Matalilla nopeuksilla voidaan hyödyntää jaksonajan mittaukseen perustuvaa menetelmää. Jaksonaikamittausmenetelmässä lasketaan korkeataajuisen kellosignaalin jaksoja yhden

tai useamman pulssin aikana. Jos yhden pulssin aikana on laskettu m kappaletta kellosignaalin jaksoja, niin pulssianturin yhden kierroksen aika on $t_{avg} = m \cdot T_{hf}$, jossa T_{hf} on kellosignaalin jaksonaika. Pulssimäärän N ollessa yhden kierroksen keskiarvoajaksi saadaan $t_{rev.avg} = N \cdot m \cdot T_{hf}$. Keskiarvoajan perusteella voidaan määrittää pulssianturin kulmanopeus kaavan 7 mukaisesti. [27]

$$\omega = \frac{2\pi}{N \cdot m \cdot T_{hf}} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (7)$$

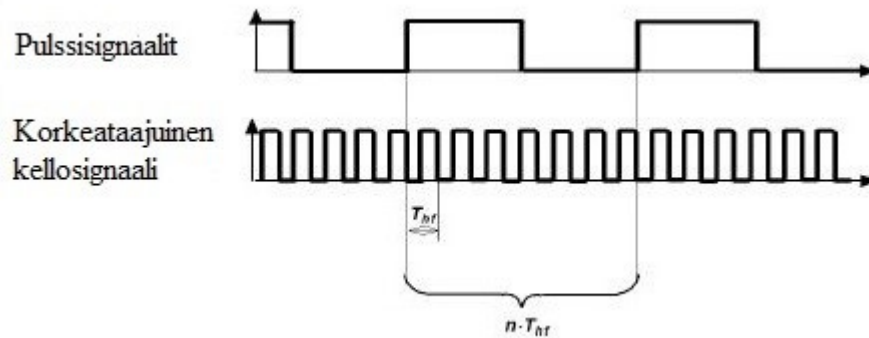
Tällöin nopeuden näytteenottojaksonajaksi määrittyy kaavan (8) mukainen yhtälö. Kuten siitä voi huomata, on näytteenoton jaksonaika riippuvainen kulmanopeudesta ja pulssimäärästä.

$$T = \frac{2\pi}{N \cdot \omega} [s] \quad (8)$$

Mittauksen tarkkuudeksi voidaan approksimoida korkeataajuisen signaalin jaksonajan suhdetta nopeuden näytteenoton jaksonajan ja korkeataajuisen signaalin jaksonajan erotukseen. Kaavassa (9) on esitetty mittauksen suhteellinen tarkkuus.

$$\varepsilon_{\omega} \% = \frac{\omega \cdot N \cdot T_{hf}}{2\pi} \cdot 100 \quad (9)$$

Erittäin matalille nopeuksille mentäessä kellosignaalin taajuus voi kasvaa erittäin suureksi, ja tällöin korkeataajuisen signaalin taajuus voi saturoitua johtuen ohjauspiirin prosessorin laskentakyvyn rajoittamisesta. Kuvassa 21 on havainnollistettu tätä menetelmää vertaamalla pulssisignaalia korkeataajuisen kellosignaaliin. [28]



Kuva 20. Korkeataajuisen kellosignaali ja pulssisignaali. [muokattu lähteestä 28]

Hyödyntämällä taajuusmittaus- ja jaksonaikamittausmenetelmien yhdistelmää voidaan parantaa nopeuden laskentaa. Käyttämällä jaksonaikamittausta pienillä nopeuksilla ja taajuuden mittausta suuremmilla nopeuksilla voidaan nopeuden laskenta saada tarkaksi koko pyörimisnopeusalueella. Tällaisen yhdistelmämenetelmän käyttö kuitenkin vaatii monimutkaisempaa ohjauspiiriä. Edellä käsiteltyjen menetelmien lisäksi kirjallisuudessa on esitetty useita muita nopeudenlaskenta menetelmiä. [28]

4. PULSSIANTURIN OMINAISUUDET

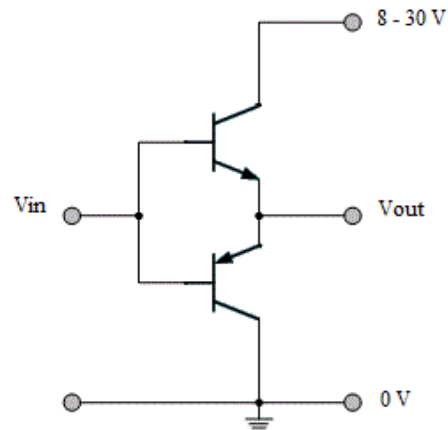
Edellisessä luvussa käsiteltiin yleisesti pulssianturiteknologioita. Tässä luvussa on tarkoitus perehtyä tarkemmin pulssiantureiden sähköisiin ja mekaanisiin parametreihin, jotka ovat merkittäviä pulssianturien valinnassa. Pulssianturin valintaan vaikuttavat useat eri parametrit, koska pulssianturi toimii moottorin ja taajuusmuuttajan välissä. Tällöin anturilla on kaksi rajapintaa, jotka tulee huomioida. Merkittävimmät pulssianturin sähköiset ominaisuudet ovat ulostulosignaalin tyyppi sekä tuotettujen pulssien lukumäärä.

Pulssianturin mekaaniselle kiinnitykselle on useita vaihtoehtoja riippuen anturin toteutustavasta. Kiinnitystapa määrittää pulssianturin mekaanisia rajoituksia. Lisäksi pulssianturin kiinnitystapa vaikuttaa moottorin huollettavuuteen. Luvun lopussa käsitellään yleisimpiä häiriömekanismia kohdistuen pulssianturiin, sekä sitä kuinka niitä voidaan pyrkiä vähentämään. Näitä häiriöitä voivat olla muun muassa lähellä olevat moottorikaapelit, ulkoiset magneettikentät, laakerivirrät tai akselin magnetoituminen.

4.1 Ulostulosignaalityypit

Inkrementaalipulssianturin ulostulosignaalin tyyppi määrittelee tarkasti, millaiseen laitteeseen anturi voidaan kytkeä. Pulssianturissa olevan ASIC-elektroniikan ulostulolähetintopologian perusteella määrittyy ulostulosignaalin muoto ja jännitetaso. Yleisimmin käytetyt ulostulosignaalityypit markkinoilla olevissa inkrementaaliantureissa ovat vuorovaihevahvistin (engl. *push-pull*), avokollektori (engl. *open-collector*) ja linjalähetin (engl. *line driver*). Näiden lisäksi ulostulosignaalin jännitteen taso ja muoto voi olla joko digitaalisignaalin HTL- (engl. *high threshold logic*) tai TTL-tasoinen (engl. *transistor-transistor logic*). Näiden lisäksi on myös analoginen Sin/Cos ulostulosignaalityyppi, jossa tyypillinen huippuarvojen välinen arvo on $1 V_{pp}$. Absoluuttiantureiden ulostuloissa käytetään edellisten lisäksi myös väylätekniikkaa, joita on esimerkiksi CAN, SSI, Profibus tai EnDat. Väylätekniikoita ei kuitenkaan käsitellä tarkemmin tämän työn puitteissa.

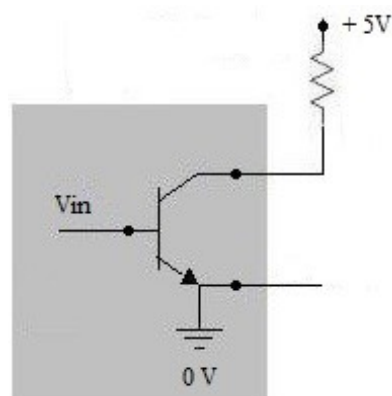
Käyttämällä vuorovaihevahvistintopologiaa ulostulosignaalin tuottamisessa voidaan pulssianturin ulostulosignaalin jännitetasoksi saada HTL-tasoinen jännitesignaali. Ulostuloon tuotetaan pulssimaista kanttaaliosignaalia, joka on digitaalista jännitesignaalia. HTL-ulostulosignaalin tarkoitetaan, että ulostulon jännitesignaalin kaksi jännitetasoa ovat 0 V ja syöttöjännitteen arvo, joka vaihtelee tyypillisesti 8 – 30 V välillä tasajännitettä. Tässä työssä käytetään taajuusmuuttajan ohjauskortilta saatavaa 24 Vdc syöttöjännitettä. Vuorovaihevahvistimen toiminta perustuu PNP- ja NPN-tyypin transistorien toimintaan kaskadikytkennässä. Tällä ulostulotopologialla voidaan ulostuloon saada transistoreita ohjaamalla kumpikin jännitetaso. Kuvassa 21 on esitetty vuorovaihevahvistimen perustuva ulostulolähetimen periaatekuva. [29]



Kuva 21. Vuorovaihevahvistintopologia, joka tuottaa HTL-jännitetaso ulostulosignaalia. [muokattu lähteestä 29]

Sisäänmenosignaalin ollessa positiivinen se kytkee NPN-transistorin johtavaksi ja PNP-transistorin estotilaan. Tällöin NPN-transistorin ollessa johtavana ulostuloon kytkeytyy syöttöjännite, joka vastaa HTL-jännitetasoa. Vastaavasti sisäänmenosignaalin ollessa negatiivinen se kytkee NPN-transistorin estotilaan ja PNP-transistorin johtavaksi. Tällöin ulostuloon kytkeytyy 0 V:n jännitetaso. Tällä tavalla piirin ulostuloihin tuotetaan kanttaaltosignaalia, jonka jännitetaso vaihtelee syöttöjännitteen ja 0 V välillä. Tämän työn kannalta HTL-ulostulotyyppi on tärkein, koska valitut pulssianturit käyttävät sitä. [29]

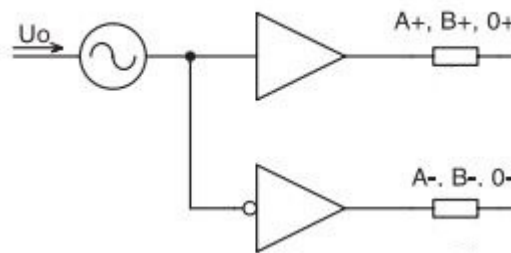
Toinen yleinen inkrementaalipulssianturin ulostulolähetintopologia on avokollektori, jolla tyypillisesti tuotetaan TTL-tasoinen jännitesignaali. TTL-jännitesignaalilla tarkoitetaan kahta jännitetasoa, jotka ovat 0 V ja +5 V. Avokollektoritopologiaa käytetään laajasti elektroniikassa. Topologia perustuu yhden transistorin käyttöön ohjaamalla transistori päälle ja pois. Lisäksi topologia vaatii ylösvetovastuksen, jotta ylempi jännitetaso +5 V on mahdollista kytkeä ulostuloon. TTL-ulostulon hyöty on sen yksinkertaisuudessa ja matalassa hinnassa. Kuvassa 22 on esitetty avokollektori-topologian rakennetta.



Kuva 22. Avokollektoritopologian periaatekaavio. [muokattu lähteestä 30]

Syöttämällä jännitesignaali transistoriin kytketään ulostuloon 0 V ja kytkemällä transistorin ohjaussignaali pois ulostuloon kytkeytyy +5 V. Tällä tavalla ainoastaan alempi jännitetaso voidaan aktiivisesti kytkeä päälle. TTL-topologian haittapuolena on se, että sitä ei voida käyttää pitkillä kaapeleilla. Avokollektoripiiri pystyy ainoastaan ottamaan virtaa kuorman suunnasta ja siten sitä voidaan käyttämään vain lyhyillä kaapelipituuksilla. Tästä syystä sitä ei voida myöskään käyttää häiriöisissä kohteissa. Sen takia TTL-topologiaa ei käytetä yleensä nostimien kanssa johtuen pitkistä kaapelivedoista ja häiriöisestä teollisuusympäristöstä. [31]

Kolmas inkrementaaliantureissa käytetyistä ulostulosignaalin tyypeistä on linjalähetin. Ulostulosignaali on kaksi sinimuotoista signaalia A ja B, joilla on 90° vaihesiirto keskenään, kuten luvussa 3.1 on määritelty. Tällöin toinen signaali vastaa siniaaltoja ja toinen kosiniaaltoja, joten tätä ulostulotyyppeä kutsutaan myös Sin/Cos -ulostuloksi. Tässä signaalityypissä ulostulon tila määrittyy signaalin nollakohtien perusteella. Ulostulon tila vaihtuu aina, kun signaali leikkaa nollakohdan. Sin/Cos ulostulotyyppeä on turvallisuuden kannalta varmempi, koska sini- ja kosiniaalloilla matemaattinen riippuvuus: $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$. Tällä tavalla voidaan varmistaa, että signaali on saapunut virheettömästi vastaanottajalle. Kuvassa 23 on esitettyä sin/cos ulostulosignaalin tuottaman piirin topologia. [31]



Kuva 23. Sin/Cos -ulostulosignaali topologian periaatekaavio. [21]

4.2 Pulssitaajuus ja pyörimisnopeus

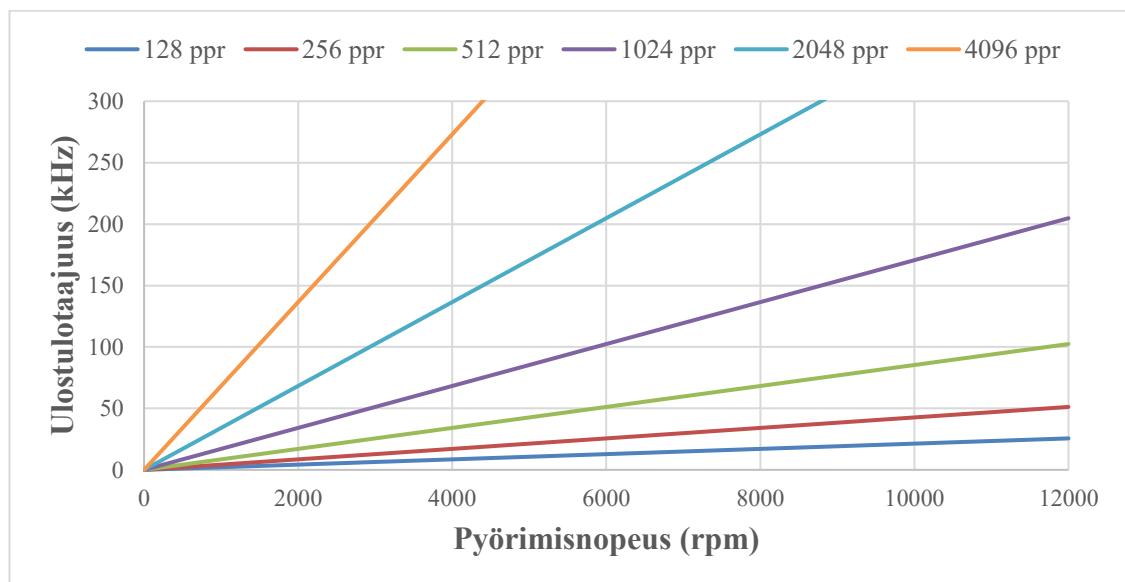
Pulssianturin maksimipyörimisnopeudelle voidaan määrittää raja-arvot sekä sähköiseltä että mekaaniselta kannalta. Suurin mahdollinen mekaaninen pyörimisnopeus riippuu anturin mekaanisesta rakenteesta ja se on määritelty siten, että sillä nopeudella anturi voi toimia vielä vahingoittumatta. Valmistajat yleensä ilmoittavat pulssiantureiden datalehdillä mekaanisen maksimipyörimisnopeuden. Suurin sallittu sähköinen pyörimisnopeus vastaavasti perustuu anturissa käytettyyn signaalinkäsittelyelektroniikkaan. Nopeuden arvo on määritelty siten, että sillä nopeudella anturi pystyy vielä tuottamaan luotettavan ulostulosignaalin, josta nopeus voidaan määrittää.

Pulssianturin ulostulosignaalin taajuus on riippuvainen mitattavasta akselin pyörimisnopeudesta. Pulssianturin pulssien lukumäärä per kierros on vakio riippumatta nopeudesta.

Maksimi sähköinen pyörimisnopeus on määritelty anturin signaalinkäsittelyelektroniikan ulostulotaajuuden f_{ppr} ja pulssimäärän N perusteella. Kaavassa (11) on esitetty maksimi sähköisen nopeuden määrittäminen.

$$n_{max} = \frac{f_{ppr} * 60}{N} \text{ [rpm]} \quad (11)$$

Suurimmalle mekaaniselle nopeudelle ei ole tarkkaa kaavaa, vaan se riippuu pulssianturivalmistajien käyttämästä anturirakenteesta ja materiaaleista. Markkinoilla on anturivalmistajia, jotka ilmoittavat optisille antureille mekaaniseksi maksiminopeudeksi 9 000 rpm. Lisäksi kosketuksettomille antureille eräät valmistajat ilmoittavat suurempia arvoja, kuten 12 000 rpm tai jopa 30 000 rpm. Rajoittavampi tekijä anturin suurimmalle sallitulle nopeudelle on mekaaninen nopeus. Tyypillisesti markkinoilla olevien pulssiantureiden ulostulotaajuus voi olla maksimissaan luokkaa 250 - 350 kHz. Lisäksi on olemassa korkearesoluutioisia pulssiantureita, joiden ulostulosignaalin taajuus voi olla jopa 800 kHz. [21]



Kuva 24. Pulssianturin ulostulotaajuuden arvoja pyörimisnopeuden funktiona eri pulssilukumäärillä.

Toisaalta anturin sähköistä nopeutta voi rajoittaa pulssisignaalia käsittelevän laitteiston sisäänmenon taajuuskaista. Tässä työssä sähköistä nopeutta rajoittaa taajuusmuuttajan ohjauskortin sisäänmenon suurin mahdollinen taajuus. Tämä voi kuitenkin vaihdella riippuen käytetystä taajuusmuuttajasta ja sen ohjauskortista. Kuvassa 24 on esitetty eri pulssilukumäärillä anturin ulostulotaajuus pyörimisnopeuden funktiona. Pulssilukumäärät ovat olleet perinteisesti 2:n potensseja markkinoilla olevissa pulssiantureissa, mutta myös muut pulssimäärät ovat mahdollisia. Tästä syystä kuvan 24 kaaviossa on käytetty näitä pulssilukuja. [21]

Työssä käytettävän taajuusmuuttajan ohjaukortin taajuuskaista on rajoitettu 50 kHz:n. Tällöin voidaan tarvittavan pyörimisnopeusalueen perusteella määrittää tarvittava pulssimäärä anturille kaavan (11) perusteella. Tässä työssä käytetty maksiminopeus, jota pulssianturin tulee pystyä mitata, on 9 000 rpm.

$$N = \frac{f_{ppr} * 60}{n_{max}} = \frac{50\,000\text{ Hz} * 60}{9\,000\text{ rpm}} \approx 333\text{ ppr} \quad (12)$$

Kaavan (12) perusteella pulssianturin pulssimäärä on rajoittunut 333 ppr:n. Kuten kuvassa 22 on esitetty, suuremmilla pulssimäärillä maksimipyörimisnopeus laskee. Esimerkiksi 4096 ppr:llä maksiminopeus on tällöin alle 1000 rpm ja 2048 ppr:llä noin 1500 rpm. Suurten pulssimäärien käyttö ei siis ole mahdollista nopeasti pyörivien moottoreiden kanssa.

4.3 Signaalin siirto

Pulssianturin tuottama signaali lähetetään taajuusmuuttajan ohjaukortille, jossa pulssisignaali käsitellään ja hyödynnetään moottorinsäädön koordinaattimuutoksissa. Jotta signaali olisi yhtä laadukasta myös taajuusmuuttajan sisäänmenossa kuin pulssianturilla, tulee signaalin kuljetukseen käytettävän kaapelin olla riittävän häiriökestoinen. Yleisimmät pulssianturin signaalin siirtotavat ovat kaapeli, valokuitukaapeli ja väylä.

Häiriösuojattu kaapeli on yleisin tapa signaalin kuljetukseen nostimissa. Häiriösuojaus toteutetaan sähkömagneettisia häiriöitä vastaan. Kaapelissa johtimet on kierretty johdinpareiksi magneettisten häiriöiden vähentämiseksi. Lisäksi johtimien ympärillä on johtava verkkomainen punos tai folio sähkökenttien aiheuttamien häiriöiden vähentämiseksi. Tämä punos toimii ns. Faradayn häkkinä johtimille. Faradayn häkki erottaa sisä- ja ulkopuolelle jäävät sähkökentät. Faradayn häkin toiminta perustuu varauksien asettumisesta johtavalle pinnalle. Johtavan pinnan sisäpuolella olevan sähkökentän arvo on nolla. Tällöin ulkoisten sähkökenttien vaikutus signaalijohtimiin on ideaalitilanteessa mitätön. [32]

Kierretyt parihoitimet kaapelissa heikentävät magneettikenttien vaikutusta signaaliin. Johtimessa kulkevan virran muuttuessa sen synnyttämä magneettikenttä muuttuu, joka voi aiheuttaa häiriöitä viereisiin johtimiin. Virran taajuuden ja johdinpituuksien kasvaessa keskinäinen häiriö lisääntyy. Tätä voidaan vähentää kiertämällä pulssianturin kanavan ja sen invertoidun kanavan johtimet pareittain. Tällöin syntyneiden magneettikenttien induoimat virrat ovat vastakkaisissa vaiheissa, jolloin ne kumoavat toisensa. Parijohtimien kiertäminen myös vähentää häiriöiden säteilemistä ulospäin muihin parihoitimiin. Häiriösuojaus ja parikaapelointi ei välttämättä aina riitä, jolloin tulee huomioida kaapelin sijainti suhteessa moottorikaapeleihin ja muihin tehokaapeleihin. Pulssianturin kaapelin tulisi olla vähintään 20 cm etäisyydellä näihin kaapeleihin. Nostinkäytössä tämä voi aiheuttaa ongelmia tilan puutteen takia. [33]

Jotta pulssianturin lähettämä kanttiaaltomuotoinen jännitesignaali pysyisi mahdollisimman laadukkaana vastaanottajalle asti, tulisi kaapelin kapasitanssin olla riittävän pieni. Kaapelin maadoitus toteutetaan yleensä niin sanotulla 360° maadoittimella molemmista päistä kaapelia. Kaapelin 360° maadoituksella tarkoitetaan sitä, että maadoitusliitin koskettaa kaapelin häiriösuojauspunosta koko kaapelin kehän pituudelta. Tällä tavalla kaapelin johtavaan punokseen indusoituneet virrat johdetaan maihin. [33]

Pulssianturin signaalin siirtämiseen voidaan hyödyntää valokuitukaapelia, jolla voidaan vähentää EMI-häiriöiden vaikutusta signaaliin. Valokuitukaapeli koostuu akryylista valmistetusta muovikuidusta tai kvartsista. Kuori on lasia, jolla on pienempi taitekerroin kuin ytimen materiaalilla. Tällöin valon kokonaisheijastuminen on mahdollista valokuitukaapelin sisällä. Valon pysyminen kuidussa perustuu kokonaisheijastumiseen, kun valo tulee optisesti tiheämmästä materiaalista optisesti harvempaan materiaaliin. Valokuidun etuna on se, että se ulkoiset sähköiset häiriöt eivät vaikuta kuidussa siirrettävän signaalin laatuun. Tämä mahdollistaa signaalin siirron häiriöttä myös pitkillä etäisyyksillä. Haittapuolena on, että valokuitukaapelia ei voida samalla tavalla taivuttaa kuin tavallista kaapelia johtuen valokuidun materiaalista. Sen takia sen käsittely on haastavampaa ja vaatii enemmän tarkkuutta. Lisäksi valokuitu on kalliimpaa kuin perinteinen johdinkaapeli. Valokuidun käyttäminen pulssianturin signaalin kuljetuksessa on mahdollista. Se vaatii yleensä muuntimen siirron molempiin päihin, joissa signaali muutetaan HTL:stä kuituun sopivaksi ja päinvastoin. [34]

Väylän käyttö pulssianturisignaali siirtämisessä on myös mahdollista, mutta sitä käytetään yleisemmin absoluuttiantureiden kuin inkrementaaliantureiden kanssa. Väylän käyttö vaatii laitteen, jossa on sopiva väylärajapinta. Tämä on yleensä merkittävästi kalliimpi ratkaisu kuin perinteinen kaapeliyhteys.

Perinteinen tapa on kytkeä suoraan pulssianturista tuleva kaapeli taajuusmuuttajaan. Toinen vaihtoehto on käyttää liittimiä pulssianturin päässä, kuten M12 tai M23 liittimiä riippuen tarvittavasta johdinmäärästä tai -koosta. Liitinvaihtoehto parantaa asennettavuutta sekä estää väriiden kytkentöjen teon asennusvaiheessa. Kolmas vaihtoehto on käyttää kytkentärasiaa pulssianturin kaapelin ja taajuusmuuttajaan kytkettävän pidemmän signaali-kaapelin välillä. Tällöin pulssianturilta tuleva kaapeli kytketään välirasiasa pidempään kaapeliin, joka viedään taajuusmuuttajalle. Kytkentärasian käyttö kuitenkin mahdollistaa kytkentävirheiden teon asennuksen yhteydessä, mikä voi aiheuttaa virhetilanteita ja ylimääräisiä kustannuksia.

4.4 Pulssianturin virransyöttökyky

Pulssianturin tyypillinen syöttöjännite vaihtelee 8 – 30 Vdc välillä. Työssä tutkittavat pulssianturit käyttävät 24 Vdc syöttöjännitettä, joka saadaan syötettyä taajuusmuuttajalta. Anturit kytketään taajuusmuuttajaan yhdellä signaali-kaapelilla, jossa kulkee signaali-kanavien lisäksi myös 24 Vdc ja 0 V syöttöjohtimet. Syöttöjännitteen lähteenä on myös

mahdollista käyttää erillistä jännitelähdettä. Pulssianturin ottama syöttövirta taajuusmuuttajalta riippuu anturin ulostulotaajuudesta sekä anturissa käytetystä elektroniikasta. Anturin kuluttama teho määritellään syöttövirran ja -jännitteen perusteella. Testaamalla anturia eri käyttötilanteissa voidaan määrittää tarkemmin anturin ottama syöttövirta. [1]

Pulssianturin virransyöttökyky pulssisignaalien tuottamiseksi on merkittävä tekijä anturin toiminnallisuudessa. Jotta pulssisignaalin nouseva reuna olisi riittävän jyrkkä eli pulssisignaalin nousuaika on tarpeeksi lyhyt, tulee anturin pystyä syöttämään kanaviin riittävän suuri virta kaapelin kapasitanssin lataamiseksi. Anturin sisäisen ASIC-elektroniikan perusteella määräytyy sen virransyöttökyky. Kuitenkin virran kasvaessa pulssianturissa sen lämpenemä kasvaa, jolloin anturin sisäinen terminen raja tulee vastaan ja ulostulo kytkeytyy irti. Tällainen voi tapahtua pitkien kaapelipituuksien kanssa, joissa kapasitanssi on suuri ja tarvitaan paljon virtaa.

4.5 Häiriötekijät ja virhelähteet

Teollisuusympäristössä pulssianturiin kohdistuu useita eri häiriölähteitä, jotka voivat vaikuttaa pulssianturin toimintaan merkittävästi. Häiriölähteet voivat olla nostimen ulkopuolisia muiden laitteiden aiheuttamia häiriöitä, nostimen sähkömoottorikäytön sisäisesti syntyneitä häiriöitä tai pulssianturin asennuksesta johtuvia häiriöitä. Lisäksi mittaukseen voi aiheuttaa virhettä pulssianturin sisäinen signaalinkäsittelyelektroniikka sekä nopeuden laskenta, kuten luvussa 3.4 esitetty kvantisointivirhe. Anturin mekaaniset epätäydellisyydet sekä asennusvirheet aiheuttavat virhettä pulssianturin toimintaan. Pulssianturin signaalin suurin ulkoinen häiriötekijä on kaapelin kapasitanssi, joka pyrkii pyöristämään kanttiaaltosignaalien muotoa. Erityisesti pitkillä kaapelipituuksilla (yli 100 m) kapasitanssin kasvaessa sen vaikutus pulssisignaaliin kasvaa ja häiriöherkkyys lisääntyy.

Pulssianturin lähellä sijaitseva sähkömagneettinen jarru aiheuttaa jarruttaessaan magneetikentän, jota voi mahdollisesti vuotaa jarrukotelon ulkopuolelle. Tämä voi aiheuttaa häiriötä pulssianturille ja erityisesti magneettiselle anturityypille. Työn mittausvaiheessa tarkastellaan pulssiantureiden häiriökestoisuutta useissa eri tilanteissa. Sähköisten häiriöiden lisäksi pulssianturiin kohdistuu mekaanisia rasituksia, jotka voivat vaikuttaa pulssianturin mittaustulokseen ja toimintaan. Laajempi mekaanisten häiriöiden käsittely on rajattu tämän työn ulkopuolelle. Magneettianturin toimintaan vaikuttavia häiriötekijöitä ovat muun muassa magneettirenkaan magnetoinnin epätarkkuus, renkaan sekä lukijan kohdistusvirheet.

4.5.1 Kaapelin kapasitanssi

Merkittävin häiriötekijä pulssianturin syöttämälle pulssisignaaliin on signaalin kuljetuksessa käytetyn kaapelin kapasitanssi. Tämä asettaa vaatimuksia pulssianturin virransyöttökäytölle. Pulssiantureiden kanssa käytettyjen signaalinkaapeleiden kapasitanssiarvot

vaihtelevat riippuen valmistajasta. Työssä käytetyn kaapelin valmistaja ilmoittaa tuoteselosteessa kapasitanssin arvoksi kahden johtimen välillä olevan maksimissaan 70 pF/m. Lisäksi johtimen ja johdinsuojan (engl. *screen*) väliseksi kapasitanssin arvoksi ilmoitetaan maksimissaan 110 pF/m.

Ideaalitilanteessa pulssianturin syöttämässä pulssisignaalisissa jännitteen arvo vaihtuu nol-lasta ykköseen äärettömän nopeasti. Todellisuudessa tilanne on kuitenkin toinen johtuen kaapelin kapasitanssista. Pulssianturin syöttämän virran tulee ladata kaapelin kapasitanssi tietyn jännitetason saavuttamiseksi. Aika, joka vaaditaan lataamaan kapasitanssi, riippuu itse kapasitanssin arvosta, jännitetasosta ja virransyöttökäyvyydestä. Tätä aikaa kutsutaan pulssin nousuajaksi. Käytännössä kaapelilla on myös hajakapasitansseja, joiden tarkat arvot eivät ole tiedossa, mutta jotka kuitenkin vaikuttavat pulssisignaalin nousuaikaan.

4.5.2 Ulkoiset magneettikentät

Yksi mahdollinen häiriötekijä pulssiantureille ovat ulkoiset magneettikentät. Ulkoisia magneettikenttiä voi vuotaa esimerkiksi moottorin sähkömagneettisesta jarrusta sitä käytettäessä tai itse moottorista voi vuotaa magneettikenttiä ulos. Ulkoiset magneettikentät vaikuttavat erityisesti magneettiseen pulssianturiin. Optiseen teknologiaan perustuvat pulssianturit ovat suojattu hyvin ulkoisilta magneettikentiltä. Magneettipulssiantureiden valmistajat eivät ilmoita datalehdillään mitään raja-arvoja, kuinka suuren magneettikentän aiheuttajan lähellä anturit saavat olla eikä mitään tarkkoja etäisyyksiä. Lisäksi levyjarrun kuoren ulkopuolelle vuotavan magneettikentän voimakkuus vaihtelee, joten tarkkaa lukuarvoa on sille vaikea määrittää. Magneettikentän voimakkuus heikkenee etäisyyden neliössä suhteessa sen lähteeseen. Asettamalla ei-magneettisen materiaalin levyjarrun perään voidaan heikentää jarrun aiheuttamaa ulkoista magneettikenttää. [35]

4.5.3 Laakerivirrat

Yksi pulssiantureiden toimintaan ja elinikään vaikuttava häiriö ovat laakerivirrat, joita esiintyy useammin suuritehoisissa oikosulkumoottoreissa kuin pienitehoisissa. Laakerivirrat eivät ole välttämättä ongelma tämän työn käyttökohteen kannalta, mutta tämä häiriötyyppi tulee ottaa huomioon pulssianturin valinnassa tulevaisuuden kannalta. Taajuusmuuttajakäyttöjen IGB-transistorien korkeat kytkentätaajuudet voivat aiheuttaa suurtaajuisia virtapulsseja, jotka kulkevat moottorin laakereiden kautta. Pulssin energian ollessa tarpeeksi suuri se pystyy vahingoittamaan laakereita ja irrottamaan metallia laakeripesästä. Tällä tavalla laakereiden elinikä lyhentyy ja niiden vikaantuminen yleistyy. [36]

Laakerivirrat voivat kulkea moottorin akselia pitkin ja sitä kautta pulssianturille, jos se on mekaanisessa yhteydessä akseliin. Erityisesti optiset pulssianturit ovat suorassa kosketuksessa moottorin akseliin, ja siten sinne kulkeutuneet laakerivirrat voivat myös vahingoittaa pulssianturin laakereita. Laakerivirtojen syntymistä voidaan välttää kunnollisella maadoituksella, jotta syntyneet hajavirrat palaavat taajuusmuuttajan runkoon muuta

reittiä kuin laakereiden kautta. Lisäksi moottorin laakerirakenteen eristäminen ja optisen anturin eristäminen moottorin akselista estävät virtojen kulkemisen laakereiden kautta. [37]

Laakerivirrat voidaan jakaa niiden syntyvän perusteella kolmeen tyyppiin, jotka ovat kiertävä virta, akselinmaadoitusvirta sekä kapasitiivinen purkausvirta. Laakereiden yli indusoitunut jännite synnyttää laakerivirrat. Laakerivirtojen muodostumiseen vaikuttaa moottorin koko sekä akselin ja staattorirungon maadoitus. Suurissa moottoreissa kiertävä suurtaajuinen laakerivirta voi syntyä johtuen vuosta, jonka aiheuttaa epäsymmetrinen kapasitiivinen vuotovirta käämityksistä staattorikoteloon. Tämä suurtaajuinen vuo indusoi jännitteen moottorin akselien välille. Jännitteen ollessa riittävän suuri virta alkaa kulkea akselissa, laakereissa ja staattorikotelossa. [36]

Virran vuotaessa staattorin runkoon tulee virran kuljettava takaisin jotain reittiä taajuusmuuttajalle, josta virta on lähtöisin. Koska kaikilla osilla virran kulkureitillä on impedanssia, se kasvattaa staattorin rungon jännitettä. Jos jännite ylittää laakereiden öljykalvon impedanssin, virtaa alkaa kulkea laakereiden, akselin ja rungon kautta takaisin taajuusmuuttajalle. Tällä tavalla muodostuu suurtaajuinen laakerivirta, jota kutsutaan akselin maadoitusvirraksi. Kapasitiivinen purkausvirta voi muodostua pienissä moottoreissa, kun yhteismuotoisen jännitteen sisäinen jännitejakauma moottorin hajakapasitansseissa aiheuttaa suuri akselijännitteitä. Nämä akselijännitteet voivat sitten synnyttää suurtaajuisia virtapulsseja laakerien kautta. Yhteismuotoisella jännitteellä tarkoitetaan neutraalijännitettä epäsymmetrisessä tilanteessa, jolloin neutraalijännite ei ole nolla. Neutraalijännite voidaan mitata moottorin käämityksen tähtipisteestä. [36]

Kosketuksettomat magneettianturit eivät ole mekaanisessa yhteydessä moottorin akseliin, eikä niissä ole käytetty laakereita. Tällöin laakerivirrat eivät voi aiheuttaa vahinkoja magneettianturiin, koska anturin kautta ei ole suljettua virtapiiriä, josta laakerivirta voisi kulkea. Moottorin akseliin kiinnitetty magneettirengas voidaan tarvittaessa eristää akselista, jotta voidaan välttää akselissa olevien kiertävien virtapulssien vaikutukset. Optisen pulssianturin ollessa mekaanisessa yhteydessä moottorin akseliin laakerivirrat voivat siten kulkea myös pulssianturin laakereiden kautta. Tämä voidaan estää käyttämällä eristettä anturin ja akselin välissä.

4.6 Mekaaniset ominaisuudet

Pulssianturin mekaaniset ominaisuudet ovat ratkaisevassa roolissa nostinkäytössä, kun anturin pyörivään akseliin voi kohdistua voimia. Tällöin anturin kiinnitystapaa ja kotelointiin tulee kiinnittää huomiota, kun valitaan anturia. Pulssianturin mekaaninen elinikä määräytyy pääasiassa kuormituksesta, joka kohdistuu akselin kautta pulssianturin laakereihin. Tämä tulee ottaa huomioon erityisesti optisen anturin kanssa, koska magneettisessa pulssianturissa ei ole laakereita. Laakerointi on tyypillisesti valmistettu ruostumattomasta teräksestä.

Anturin akseliin kohdistuva kuormitus voidaan jakaa kahteen eri suuntaiseen voimaan: radiaaliseen ja aksiaaliseen voimaan. Radiaalinen voima kohdistuu pyörivään akseliin kohtisuorassa, kun taas aksiaalinen voima on akselin suuntainen kuormitusvoima. Radiaalisen tai aksiaalisen voiman kasvu vaikuttaa pulssianturin laakeroinnin elinikään. Tästä syystä pulssianturin akselille kohdistuvan voiman tulee olla vähäinen. Radiaalisen akselikuormituksen kohdalla tulee myös huomioida, että etäisyyden kasvaessa laakerin ja kohdistuvan voiman välillä laakerien kuormitus kasvaa lineaarisesti. Lisäksi asennettaessa pulssianturia akselille voi syntyä kohdistusvirhettä, mikä aiheuttaa akselin pyöriessä pulssianturiin ylimääräisiä voimia. Tämä vaikuttaa myös pulssianturin mekaaniseen elinikään. [37]

Valmistajat ilmoittavat datalehdillä yleensä maksimi aksiaali- ja radiaalivoimat, jotka anturit kestävät. Lisäksi antureista on ilmoitettu shokki- ja värähtelyvoimien kestävyys tietyllä taajuusalueella. Tyypillisiä arvoja aksiaali- ja radiaalivoimille on 20 N – 100 N välillä. Shokkivoiman kestävyys ilmoitetaan standardin EN 60068-2-27 mukaisesti, joka käsittää tietyn testimenetelmän, jonka perusteella arvo määritetään. Arvo on tyypillisesti 100 - 3000 m/s² 6 millisekunnin ajan. Värähtelyvoiman kestävyys ilmoitetaan standardin EN 60068-2-6 mukaan tyypillisesti 100 - 300 m/s² 10 – 2000 Hz taajuusalueella. Edellä mainitut arvot vaihtelevat valmistajasta riippuen. Tämän työn puitteissa ei kuitenkaan tehdä tarkempaa selvitystä tai mittauksia mekaanisten ominaisuuksien kannalta.

4.6.1 Kiinnitys ja kotelointi

Yleisimmät kiinnitysmenetelmät markkinoilla olevilla optisilla pulssiantureilla on ulostuleva akselikiinnitys, päättävä holkkiakselikiinnitys sekä läpimenevä holkkiakselikiinnitys. Ulostulevan akselin kiinnittäminen moottorin akseliin vaatii kytkimen. Päättävä holkkiakselikiinnitys eli niin sanottu sokea holkkiakseli ei vaadi erillistä kytkintä kiinnitystä varten, jos moottorin akselin halkaisija ja toleranssi ovat sopivat holkkiakselin halkaisijan ja toleranssin kanssa.

Pulssianturivalmistajat ilmoittavat yleensä datalehdellä anturin akselin koon sekä toleranssin. Lisäksi datalehdellä on ilmoitettu akselin, johon anturi kiinnitetään, vaadittavat mitat sekä toleranssi. Vastaavasti läpimenevällä holkkiakselikiinnityksellä oleva pulssianturi tulee kiinnittää vastaavasti kuin sokea holkkiakseli, mutta kuitenkin akselin pituus on tällöin pidempi. Pulssianturi kiinnitetään tyypillisesti ruuvipuristuksella kiinni akseliin, jolloin anturin irrottaminen on mahdollista. Läpimenevällä holkkiakselikiinnityksellä oleva pulssianturi mahdollistaa akselin molempiin päihin muiden laitteistojen kiinnityksen.

Magneettianturin kiinnitystapa eroaa optisen anturin kiinnityksestä johtuen anturin rakenteesta. Magneettianturi koostuu magneettirenkaasta ja anturista. Magneettirengas on kiinnitettyä moottorin pyörivään akseliin. Yleisimmät tavat kiinnittää magneettirengas ak-

seliin on käyttää puristusliitosta (engl. *press fit*), kutistusliitosta (engl. *shrink fit*) tai puristusruuvia, kuten optisen anturin kiinnitys. Yksinkertainen tapa kiinnittää magneettirenkas akseliin on käyttää kiristysruuveja, jotka puristava renkaan kiinni akseliin. Tällainen kiinnitys on halvempi kustannukseltaan sekä nopeampi tehdä ja tällöin myös magneettirenkas on yksinkertainen vaihtaa. Puristus- ja kutistusliitoksilla kiinnitettyjen magneettirenkaiden irrotus on hitaampaa ja vaativampaa.

Pulssianturin koteloinnilla suojataan laitteen sisällä olevaa elektroniikkaa vahingoittumasta ulkoisten aineiden vaikutuksesta. Koteloinnin suojausluokka on määritelty IP-luokituksella, jossa määritellään tiiveys pölyä ja vettä vastaan. IP-luokituksen merkintä koostuu kahdesta numerosta, joista ensimmäinen määrittelee tiiveyden pölyä vastaan ja toinen vettä vastaan. Pulssiantureiden suojausluokkavaatimus teollisuusympäristössä tulee olla riittävän korkea, jotta toiminta ei häiriinny ulkoisilta vaikutuksilta. Tyypillinen pulssianturin IP-luokitus on IP65, jolloin kotelo on täysin pöly- ja vesitiivis joka suunnasta tulevalta vesisuihkulta. IP65-luokitus voi olla haastava toteuttaa optisten pulssiantureiden kanssa erityisesti akselin puolelta. Kosketuksettomien magneettiantureilla tyypillinen suojausluokka on IP67, jolloin se kestää hetkellisen upotuksen veteen. [38]

4.6.2 Asennettavuus ja huolto

Pulssianturin valinnassa tulee ottaa huomioon sen asennettavuus, koska anturin toiminta häiriintyy herkästi johtuen asennusvirheistä ja väärästä asennustavasta. Lisäksi asennettavuus vaikuttaa kustannuksiin, koska asennusajasta syntyneet työkustannukset vaikuttavat pulssianturin kokonaiskustannuksiin. Pulssianturin asennettavuuden helppous ja nopeus ovat tärkeitä kriteereitä pulssianturin valinnassa. Lisäksi anturin sijainti moottorissa voi vaikuttaa muiden komponenttien asennukseen tai huoltoon ja sitä kautta myös huoltokustannuksiin. Tyypillisin kohde moottorissa, joka voi vaatia huoltoa tai vaihtamista on levyjarru, joka sijaitsee moottorin perällä akselilla lähimpänä moottoria. Pulssianturin ollessa levyjarrun jälkeen akselilla anturin irrotus tulee olla mahdollista, jotta jarru voidaan irrottaa akselilta.

Optiset anturit ovat yleensä kiinnitetty akseliin ruuvipuristuksella sekä momenttituella, joka estää anturin kotelon pyörimisen. Tällöin anturi on helposti irrotettavissa akselilta. Magneettiantureiden pyörivät osat voidaan kiinnittää akseliin usealla tavalla, kuten luvussa 4.5.1 on todettu. Jos magneettiosan kiinnityksessä käytetään ruuvipuristusta, voidaan se irrottaa ilman suurempaa vaivaa. Akselin magnetoituminen tietyissä tilanteissa voi aiheuttaa ongelmia myös ruuvipuristuksella kiinnitettyjen pulssiantureiden irrotuksessa, jos anturia ei ole eristetty magneettisesti moottorin akselistä. Tällöin irrotus voi vaatia erikoistyökalun käyttöä, joka on suunniteltu kyseiseen kohteeseen.

5. PULSSIANTURIMITTAUKSET

Työtä varten valittiin kaksi pulssianturia vertailuun, ja niiden toimintaa tutkittiin nopeasti pyörivän moottorin nopeuden mittauksessa. Tutkimusmenetelmänä vertailussa käytettiin käytännön mittauksia ja testejä. Mittausten tarkoituksena oli todentaa pulssiantureiden suorituskyky ja toiminnallisuus nopeasti pyörivän oikosulkumoottorin kanssa. Suoritettaviksi testeiksi valittiin sellaiset mittaukset, joilla pystytään varmistamaan anturin toimintakyky pyörimisnopeuden mittaamisessa vaaditulla pyörimisnopeusalueella sekä erilaisilla kaapelipituuksilla. Tässä luvussa esitellään vertailuun valitut pulssianturityypit ja niiden tärkeimmät tekniset tiedot. Tarkoituksena oli valita vertailuun erilaisilla tekniikoilla toteutetut anturit, jotta vertailussa tulisi ilmi eri teknologioiden edut ja haitat. Lisäksi tässä luvussa esitellään mittausjärjestely, jolla mittaukset suoritettiin. Lopuksi perehdytään antureille tehtäviin mittauksiin ja niiden tarkoituksiin.

Vertailuun valittiin kaksi pulssianturia, joista toinen perustuu magneettisen mittaussuomenetelmään ja toinen optiseen. Antureiden tarkempia tuotenimikkeitä ja valmistajia ei voida ilmoittaa salassapitovelvollisuuden vuoksi. Samasta syystä tässä työssä ei esitetä pulssiantureiden absoluuttisia hintatietoja vaan ainoastaan suhteellisia arvoja. Pulssianturin 1:n hinta on noin 1,3-kertainen verrattuna pulssianturi 2:n hintaan. Taulukossa 2 on esitetty valittujen antureiden teknisiä tietoja.

Taulukko 2. Vertailuun valittujen pulssiantureiden tärkeimmät tekniset tiedot.

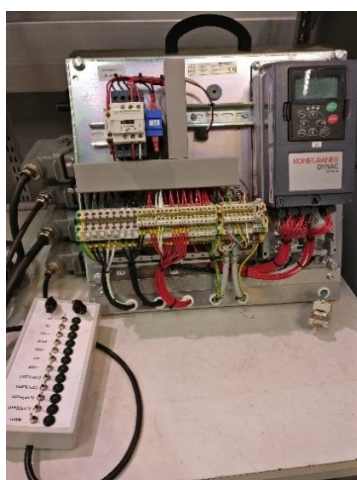
	Pulssianturi 1	Pulssianturi 2
Mittaustekniikka	magneettinen	optinen
Pulssiluku (ppr)	300	300
Ulostulosignaalin tyyppi	HTL	HTL
Max ulostulotaajuus (kHz)	1 000	300
Max pyörimisnopeus (rpm)	30 000	9 000
Kaapeli	0,128 mm ² , 2m	0,14 mm ² , 1,5m
Käyttölämpötila-alue	-40 ... +100 °C	-30 ... +85 °C

5.1 Mittausjärjestely

Mittauksissa käytettiin taajuusmuuttajaa ohjaamaan oikosulkumoottoria, jonka pyörivään akseliin testattavat pulssianturit kiinnitettiin. Oikosulkumoottorin nimellisjännite on 380 – 415 V ja nimellistehona on 4,5 kW. Moottorin nimelliseksi pyörimisnopeudeksi on ilmoitettu 2780 rpm ja nimellistaajuudeksi 100 Hz. Moottoriin on testeissä asennettu sähkömagneettinen levyjarru. Testattavat anturit kiinnitettiin moottorin akselille jarrun perään. Antureiden asennusta varten suunniteltiin kiinnityspaikat mittauksia varten.

Mittauksissa käytetty taajuusmuuttajan säätö perustuu vuo-orientoituun vektorisäätöön, jolla on mahdollista ohjata moottoria joko open-loop tai closed-loop säädöllä. Mittaukset suoritettiin open-loop säädöllä, jolloin moottorin nopeus ei seuraa pulssianturin mittaamaa nopeutta. Tällöin voidaan vertailla pulssianturin mittaamaa nopeutta ja moottorin todellista nopeutta, ja määrittää niiden perusteella anturin mittaustarkkuus.

Taajuusmuuttajaan asetettiin tarvittavat moottorin ja pulssiantureiden parametrit moottorin ohjausta varten. Taajuusmuuttajan parametroinnissa käytettiin valmistajakohtaista PC-ohjelmistoa, jonka avulla voitiin monitoroida moottorin nopeutta ja pulssianturin mittaamaa nopeutta. Anturin nopeus on esitetty ohjelmistossa akselitaajuutena, joka on määritetty anturin ulostulotaajuuden perusteella. Mittauksissa taajuusmuuttajan nopeutta ohjattiin käsikäyttöisellä ohjauspaneelilla. Alla olevassa kuvassa 25 on esitetty mittauksissa käytetty laitteisto. Vasemmassa kuvassa on taajuusmuuttaja, muu sähköjärjestelmä ja ohjauspaneeli. Oikeassa kuvassa on sähkömoottori, 50 metrin signaalikaapeli sekä kytkentärasia, jonka kautta pulssianturit kytkettiin pidempään signaalikaapeliin. Mittauksissa käytetty signaalikaapeli on kytketty taajuusmuuttajaan ja kytkentärasiaan. Kaapelin häiriösuojajapunos on maadoitettu molemmista päistä 360° maadoituksella, jotta ulkoisten häiriöiden vaikutus signaaleihin voidaan minimoida.



Kuva 25. Pulssianturimittauksissa käytetty testijärjestely.

Magneettisen pulssianturin lukija kiinnitettiin jarruun alumiinilevyn kautta, jonka tarkoituksena vähentää jarrun magnetoitumisesta syntyvää hajakenttää. Lisäksi moottorin akselille asennettiin ruostumattomasta teräksestä valmistettu holkkiakseli, johon magneettisen anturin magneettirengas kiinnitettiin. Testattaessa optista pulssianturia kiinnitettiin se myös samanlaisen holkkiakselin kautta moottorin akseliin. Lisäksi optisen anturin momenttituki kiinnitettiin jarrussa kiinni olevaan alumiinilevyyn.

Pulssianturien pyörivät osat on kiinnitetty moottorin akseliin ruuvipuristuksella. Magneettianturin lukija on kiinnitetty siten, että ilmarako pyörivään magneettiin on maksimissaan 1 mm, joka on määritetty anturin datalehdellä. Mittausjärjestelyssä käytettiin pulssiantureiden pulssisignaalien siirtoon 50 metrin häiriösuojattua kaapelia. Tällä tavalla voidaan testata anturin todellista käyttötilannetta, jolloin oikosulkumoottori ja pulssianturit eivät ole välttämättä aina taajuusmuuttajan lähellä. Pulssisignaalien muodon ja jännitetason mittauksessa käytettiin oskilloskooppia, josta saadaan mittaustieto PC:lle analysointia varten.

5.2 Mittaukset

Valituille pulssiantureille toteutettiin samat mittaukset, jotta tuloksia voitaisiin verrata keskenään mahdollisimman yksiselitteisesti. Mittauksissa testataan pulssianturin toimintaa vaaditulla nopeusalueella (0 – 9000 rpm), mitataan pulssisignaalien muotoa kahdella eri pyörimisnopeuksella sekä kahdella eri kaapelipituudella. Lisäksi testataan antureiden sähköisten häiriöiden kestoisuutta. Antureiden syöttövirta ja ulostulon virransyöttökyky mitattiin myös. Seuraavissa luvuissa on esitetty tarkemmat kuvaukset suoritettavista mittauksista sekä kuinka tulokset on kerätty.

5.2.1 Pulssianturin toiminta ja mittaustarkkuus

Ensimmäisessä testissä on tarkoituksena todentaa pulssianturin kyky moottorin pyörimisnopeuden mittauksessa koko pyörimisnopeusalueella 0 – 9000 rpm molempiin pyörimis-suuntiin. Pulssianturin lähettämien pulssisignaalien perusteella lasketun pyörimisnopeuden tulee olla mahdollisimman lähellä todellista moottorin pyörimisnopeutta. Mittauksissa moottoriin ei ole kytketty kuormaa, jotta jättämä olisi mahdollisimman pieni ja maksiminopeus olisi lähellä 9000 rpm arvoa. Käytännössä moottorissa on aina pieni kuormamomentsi johtuen moottorin hitausmomentista sekä moottorin tuulettimen inertiaasta. Hitausmomentti on kuitenkin lähes mitätön, jolloin ilman kuormaa moottorin maksiminopeus on lähes tahtinopeuden arvo 9000 rpm.

Mittauksissa verrataan pulssianturin tuottaman pulssisignaalin taajuuden perusteella määritettyä akselitaajuutta ja sitä vastaavaa moottorin pyörimisnopeutta, joka on määritetty taajuusmuuttajan ulostulojännitteen taajuuden perusteella. Pulssianturin mittaama pyörimisnopeus, moottorin jännitteen taajuus ja todellinen pyörimisnopeus saadaan kerättyä

taajuusmuuttajan PC-ohjelmiston kautta analysoitavaksi. Ohjelmistossa mittausravot esitetään käyränä, jossa arvot ovat skaalattu vastaamaan toisiaan.

Mittaus suoritetaan seuraavan testisekvenssin perusteella. Moottorin nopeus kiihdytetään ensin 0,5 sekunnin rampilla maksiminopeuteen moottorin jännitteen taajuuden ollessa tällöin 300 Hz. Tätä nopeutta ajetaan 45 sekunnin ajan, jolloin pulssianturin mitatun nopeuden tulisi pysyä samassa kuin todellinen nopeus. Tämän jälkeen nopeus hidastetaan 0,5 sekunnin hidastusrampilla pysähdyksiin. Tämän jälkeen moottorin nopeutta pidetään muutama sekunti 0 Hz:ssä, jonka jälkeen suoritetaan vastaavanlainen kiihdytys ja hidastus vielä kaksi kertaa. Vastaava testisekvenssi suoritetaan myös toiseen pyörimissuuntaan, jotta voidaan varmistua pulssianturin toiminnasta molempiin suuntiin.

5.2.2 Pulssisignaalin laatu

Yksi tärkeä indikaattori pulssianturin toimintavarmuudessa on sen tuottamien pulssisignaalin laatu. Pulssisignaalin laatuun vaikuttaa anturiin kytketyn kaapelin kapasitanssi sekä anturin elektroniikka ja sen virransyöttökyky. Signaalin muodon tulisi säilyä mahdollisimman kanttiaaltomaisena, jotta nopeuden mittaus olisi mahdollisimman tarkka. Pulssisignaalin laadun määrittää signaalin muoto, nousu- ja laskuajat, signaalien vaihesiirron suuruus sekä taajuus.

Mittauksissa on tarkoitus mitata oskilloskoopilla kanavien A+ ja B+ pulssimuodot, joiden perusteella voidaan laskea pulssisignaalin nousu- ja laskuajat. Oskilloskooppi on kytkettynä kanaviin taajuusmuuttajaan päässä. Mittaukset toteutetaan 10 Hz ja 300 Hz nopeuksilla, jotta saadaan tulokset siitä, kuinka pulssimuoto käyttäytyy eri nopeusalueilla. Signaalien käyrämuotojen perusteella lasketaan kanavien A ja B välinen vaihe-ero, jonka tulee olla lähellä 90° astetta koko nopeusalueella.

Pulssisignaalin muoto mitataan kahdessa eri tilanteessa, joissa anturiin on kytkettynä eri suuruinen määrä kapasitanssia. Kytkemällä kanaviin kondensaattoreita voidaan mallintaa suurempia kaapelipituuksia. Tilanteessa 1 anturin kanaviin ei ole kytketty lisäkondensaattoreita ainoastaan 50 metrin signaalikaapeli. Tilanteessa 2 kanaviin A+, A-, B+ ja B- kytketään lisäkondensaattorit suuruudeltaan 33 nF mallintamaan 200 m kaapelia. Kondensaattorit ovat kytketty pulssianturin päässä kanavan ja pulssianturin 0 V syötön välille.

5.2.3 Virran mittaus

Testijärjestelyssä pulssianturi ottaa syöttövirtansa taajuusmuuttajan 24 Vdc lähdöstä. Jotta voidaan varmistua pulssianturin yhteensopivuudesta käytetyn taajuusmuuttajan kanssa, tulee tietää pulssiantureiden ottamat syöttövirrat eri käyttötilanteissa. Syöttövirran arvoksi valmistajat ilmoittavat ainoastaan virran arvon ilman kuormaa, joten todellisten syöttövirtojen suuruudet eri pyörimisnopeuksilla ei ole tiedossa. Syöttövirta on mitattu tilanteessa 2, koska tämä on kriittisin tilanne anturin ottaman virran kannalta.

Syöttövirran mittaus voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, mutta tässä testijärjestelyssä virtamittaus toteutettiin käyttämällä Hiokin virtapihtejä kytkettynä oskilloskooppiin. Oskilloskoopilta saadaan anturin virtakäyrä, jonka perusteella oskilloskooppiohjelmiston mittaustyökaluilla määritetään maksimi- ja keskiarvovirta. Lisäksi syöttöjännite mitataan yleismittarilla pulssianturin syöttöjohtojen navoista. Pulssianturin ottama teho lasketaan anturin syöttöjännitteen ja -virran perusteella.

Syöttövirran lisäksi pulssianturin ulostulosignaalikanavien virrat mitattiin, jotta voidaan määrittää pulssianturin virransyöttökyky. Virransyöttökyky määrittää, kuinka nopeasti anturin elektroniikka pystyy syöttämään kanavaan virtaa ja lataamaan kaapelin kapasitanssin. Virran mittaus toteutettiin anturien A+ kanavalta. Mittaukset toteutettiin 50 metrin signaalikaapelilla ilman lisäkondensaattoreita sekä niiden kanssa. Lisäksi virransyöttökyky mitattiin häiriökondensaattori kytkettynä.

5.2.4 Sähköisten häiriöiden kestoisuus

Pidempien kaapelipituuksien lisäksi pulssianturin tulisi kestää myös muita sähköisiä häiriöitä, joita voi kytkeytyä lähellä olevista sähkölaitteistoista tai moottorikaapeleista. Sähköisten häiriöiden testaaminen on haastavaa, koska todellisia häiriötilanteita on vaikea mallintaa. Pulssiantureiden sähköisten häiriöiden kestoisuutta tarkastellaan hyödyntämällä häiriökondensaattoreita.

Antureiden häiriöiden kestävyyttä testataan kytkemällä häiriökondensaattori pulssianturin kaapelin häiriösuojauspunoksen ja moottorikaapelin välille. Häiriökondensaattori kytketään pulssianturin päähän kaapelia. Mittauksessa käytettiin 50 metrin signaalikaapelia sekä lisäkondensaattoreita, kuten tilanteessa 2. Häiriöiden kestoisuutta tutkitaan vertaamalla pulssianturin mitatun nopeuden ja todellisen roottorin nopeutta. Tällä tavalla voidaan tarkastella pulssianturin toimintakykyä häiriötilanteessa.

6. TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Tässä luvussa esitetään mittausten tulokset pulssianturitestauksesta ja analysoidaan mitaustulokset. Analysoinnin avuksi määritetään hyvyyskriteeristö, jonka perusteella eri osa-alueet voidaan arvottaa. Tällä tavalla voidaan määrittää testattavien antureiden toiminta eri osa-alueilla, joiden perusteella muodostetaan kokonaiskuva antureista. Kriteeristön määrittelyn jälkeen esitetään antureiden mitaustulokset sekä niistä tehdyt havainnot. Lopuksi analysoidaan tuloksia tarkemmin ja arvioidaan kriteeristön pohjalta antureiden suoriutumisen taso.

6.1 Hyvyyskriteeristön määrittely

Mittaustulosten analysoinnin tueksi määritetään hyvyyskriteeristö, jonka avulla voidaan arvottaa vertailtavien antureiden suoriutuminen eri osa-alueilla. Kriteeristössä otetaan huomioon antureiden tekninen suorituskyky sekä kustannustaso. Teknistä suorituskykyä verrataan kriteeristössä anturin mitaustarkkuudella, toimintakyvyllä eripituisilla kaapeleilla sekä häiriötilanteissa. Mitaustarkkuudella tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin anturin mittaama pyörimisnopeus vastaa moottorin todellista nopeutta normaalitilanteessa. Antureiden virransyöttökyky huomioidaan myös suorituskykyä tutkittaessa. Sen lisäksi tarkastellaan pulssisignaalin laatua kahdessa eri pyörimisnopeudessa sekä kahdella eri kaapelipituudella. Sähköisten häiriöiden kestoisuus on myös mukana kriteeristössä. Alla olevassa taulukossa 3 on esitetty hyvyyskriteeristö, jossa vertailukriteerit on arvosteltu joko hyväksytty tai hylätty asteikolla tai 1 – 3 asteikolla arvosanan 3 ollessa paras.

Taulukko 3. Pulssiantureiden vertailua varten tehty hyvyyskriteeristö.

Arvioitava osa-alue	Arvosteluasteikko
Pulssianturin toiminta ja mitaustarkkuus	Hyväksytty/Hylätty
Pulssisignaalin laatu tilanteessa 1	Hyväksytty/Hylätty
Pulssisignaalin laatu tilanteessa 2	Hyväksytty/Hylätty
Virransyöttökyky	Hyväksytty/Hylätty
Sähköisten häiriöiden kestoisuus	Hyväksytty/Hylätty
Asennettavuus/vaihdeavuus	1 – 3
Hintataso	1 – 3

Viisi ensimmäistä osa-aluetta hyväyskriteeristöissä arvioidaan mittaustulosten perusteella. Arvioinnin tekee haastavaksi se, että ei ole olemassa tarkkoja raja-arvoja, joita voisi suoraan hyödyntää tulosten analysoinnissa. Tämän vuoksi viisi ensimmäistä kohtaa arvostellaan hyväksytyksi tai hylättyksi arvostelulla. Mittausten lisäksi anturin asennettavuus tai vaihdettavuus on tärkeä kriteeri, koska asennusaika voi kasvattaa anturin kokonaiskustannusta. Kiinnityksen monimutkaisuus voi lisäksi kasvattaa asennuksen virheherkkyyttä ja sitä kautta laatukustannuksia. Viimeisenä tekijänä on arvioitu anturien hintataso suhteellisten arvojen perusteella. Kriteeristöön perusteella voidaan muodostaa kokonaiskuva anturin toimintakyvystä käyttökohteessa ja tehdä johtopäätökset.

6.2 Pulssianturi 1:n mittaustulokset

Ensimmäiseksi testattu pulssianturi perustuu magneettiseen mittaustapaan. Anturi koostuu kahdesta osasta, jotka ovat magneettirenkaasta ja lukijasta. Magneettirengas on valmistettu ruostumattomasta teräksestä, jonka pinnalla on magneettisen materiaalin ja kumin seos. Lisäksi magneettirengas on päällystetty elastomeerisella pinnoitteella, jonka tarkoitus on toimia termisenä ja mekaanisena suojana. Magneettirenkaassa on magneettisia napoja 50 kappaletta. Lukijan elektroniikalla pulssimäärä on kasvatettu 300 ppr arvoon. Magneettirengas kiinnitetään moottorin akseliin holkkiakselin avulla. Kuvassa 26 on esitetty kuva pulssianturin kiinnityksestä.



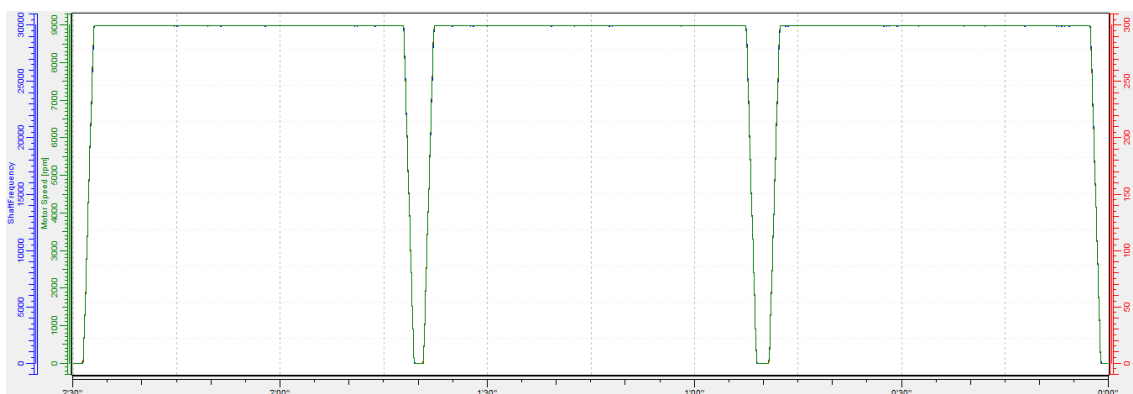
Kuva 26. Pulssianturi 1:n kiinnitys mittauksia varten.

Pulssianturin kiinnityksessä tulee ottaa huomioon magneettirenkaan ja lukijan välinen ilmapäällystä sekä lukijan paikka suhteessa magneettirenkaaseen. Ilmapäällyksen pituuden tulee olla valmistajan datalehden mukaan 0,1 – 1 mm. Lisäksi aksiaalinen ja radiaalinen poikkeama saa olla maksimissaan 1 mm. Asennustoleranssien ollessa vain alle 1 mm on asennustyö tarkkuutta vaativaa, jotta kohdistus olisi mahdollisimman oikein.

Lukijan asennuspaikkaa on mahdollista hienosäätää sen ruuvi kiinnityksessä, mikä helpottaa lukijan kohdistamista. Anturin lukijassa on LED-valo, joka ilmoittaa anturin toimintatilasta tai -virheestä, ja tätä voitiin hyödyntää anturin kohdistuksessa.

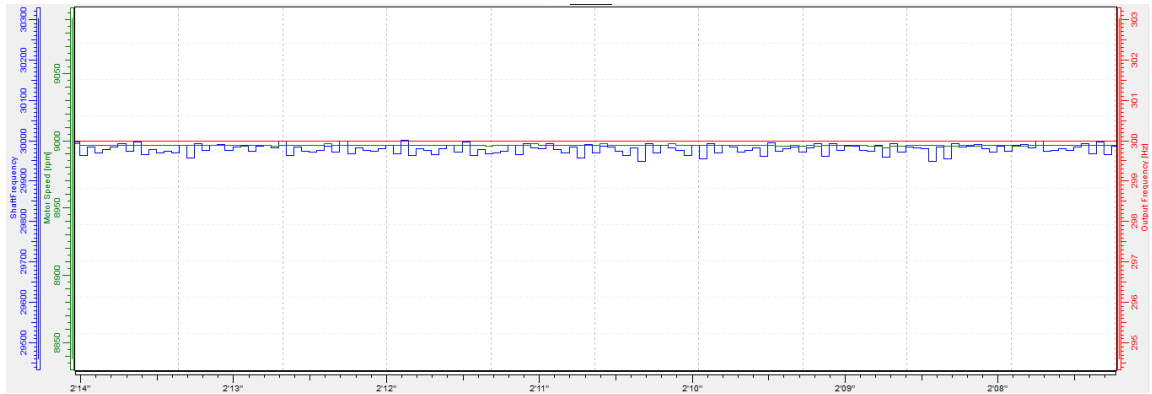
6.2.1 Pulssianturin toiminta ja mittaustarkkuus

Ensimmäisessä mittauksessa selvitettiin pulssianturin toimintakykyä moottorin maksiminopeudella ulostulojännitteen ollessa 300 Hz. Tällöin moottorin ulkoista tuuletinta ei oltu kytketty. Mittauksessa verrattiin pulssianturin mittaamaa pyörimisnopeutta ja moottorin todellista pyörimisnopeutta. Mitatun arvon ja todellisen arvon perusteella voidaan määrittää anturin mittaustarkkuus. Testissä moottoria ajettiin maksiminopeudella kolme 45 sekunnin jaksoa molempiin pyörimissuuntiin. Kuvassa 27 on esitetty pulssianturin 1 mitaama nopeus ja moottorin todellinen nopeus pyörimissuuntaan S1. Pulssianturin mitaama nopeus pysyy hyvin lähellä moottorin todellista nopeutta koko mittauksen ajan, mistä johtuen mittauskäyrät kuvassa ovat lähes päällekkäin. Moottorin todellinen nopeus oli 8997 rpm. Vastaava mittaus suoritettiin myös toiseen pyörimissuuntaan S2. Nopeuden mittauksessa ei ollut eroa verrattuna S1 suuntaan.



Kuva 27. Pulssianturin 1 mitaama pyörimisnopeus (sininen) ja moottorin nopeus (vihreä) suuntaan S1.

Kuvassa 28 on esitetty tarkempi kuva pulssianturin 1 nopeuden mittauksesta moottorin pyöriessä maksiminopeudella. Anturin mitaama nopeus vaihtelee kuvan perusteella 8990 rpm – 9000 rpm välillä, jolloin absoluuttinen mittausvirhe todellisesta nopeudesta 8997 rpm on 7 rpm. Mittauspoikkeaman ja moottorin todellisen nopeuden avulla voidaan määrittää mittauksen suhteellinen virhe, joka on 0,078 %. Mittausohjelmiston näytteenottoajaksi oli asetettu 50 millisekuntia, joka aiheuttaa pienen virheen mittauksessa sen ollessa kuitenkin lähes mitätön. Vertailun vuoksi mittaustarkkuus määritettiin myös 300 rpm nopeudella. Tällöin mittauksen vaihteluväli oli 300 – 320 rpm, jolloin suhteellinen mittausvirhe oli 6,67 % ja absoluuttinen virhe 20 rpm.

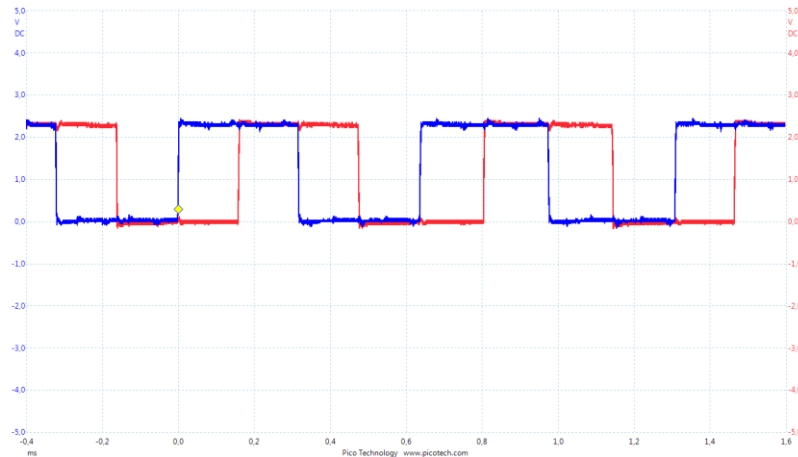


Kuva 28. Pulssianturin 1 mittaama nopeus moottorin pyöriessä maksiminopeudella.

Tämän testin tarkoituksena oli myös todentaa, kuinka sähkömagneettisen jarrun toiminta vaikuttaa magneettianturin mittaukseen. Kun moottori alkaa pyöriä, jarrun sähkömagneetit magnetoituvat. Kuten kuvien 27 ja 28 perusteella voidaan päätellä jarrun magnetoitumisella ei ollut vaikutusta magneettianturin toimintaan, vaikka anturi oli kiinnitetty jarrun viereen. Jarrun ohjauksessa käytettiin puoliaaltotasasuuntaajaa, joka ei synnytä niin voimakasta kenttää kuin kokoaaltotasasuunnauksella syntyisi. Magneettianturia ei testattu kokoaaltotasuunnatun jarrun kanssa.

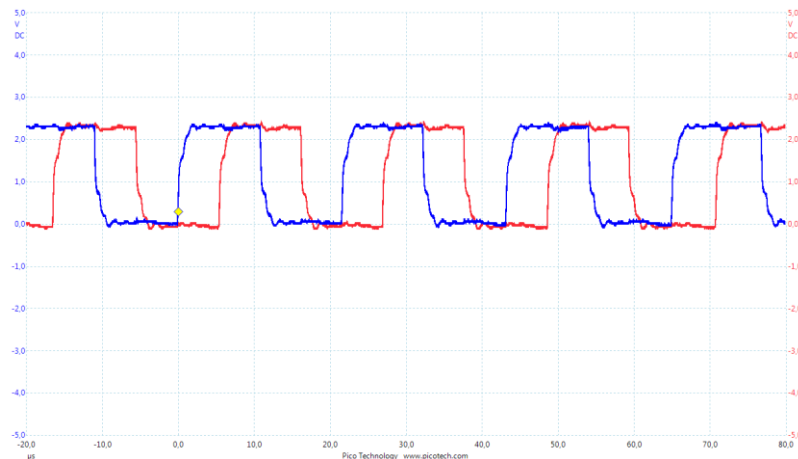
6.2.2 Pulssisignaalin laatu

Toisessa testissä mitattiin pulssianturin pulssisignaalin laatua oskilloskoopin avulla 10 Hz ja 300 Hz nopeudessa sekä kahdella eri kaapelipituudella. Pulssianturin A+ ja B+ kanavien pulssimuotoa mitattiin oskilloskoopilla ja mittaustulosten perusteella voitiin laskea pulssisignaalin nousu- ja laskuajat. Aikojen laskennassa hyödynnettiin oskilloskooppiohjelmiston mittaustyökalua, jolla voitiin helposti määrittää pulssisignaalin nousu- ja laskuaika. Tyypillisesti digitaalelektronikassa nousuaika on määritelty ajaksi, jolloin signaalin jännite on noussut 10 % arvosta 90 % arvoon. Laskuaika on määritetty vastaavasti toisinpäin, kun signaalin jännitetaso on laskenut 90 % arvosta 10 % arvoon. Luvun lopussa taulukossa 4 on esitetty tarkat arvot nousu- ja laskuajoille eri tilanteissa.



Kuva 29. Pulssianturin I A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 10 Hz nopeudella tilanteessa 1.

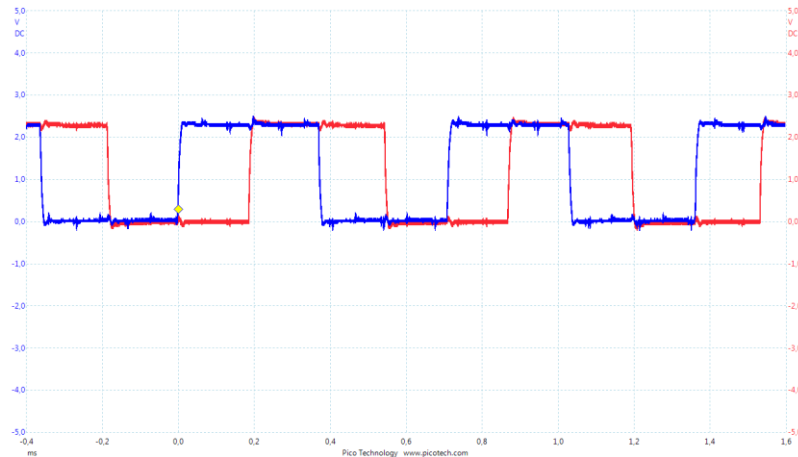
Kuvassa 29 on esitetty pulssisignaalin A+ ja B+ kanavien pulssimuodot 10 Hz nopeudella. Esitetyt pulssisignaalit pysyvät kantimaisina, eikä signaaleissa esiinny pyöristymistä tai suuria jännitepiikkejä. Signaalien jännitetaso ylhäällä on noin 23,2 Vdc ja alhaalla noin 0,4 Vdc. A+ kanavan jaksonajaksi määritetään käyrän perusteella 638,5 μ s, joka vastaa 1566,32 Hz taajuutta. Mittauksia tehdessä huomattiin, että pulssisignaalin taajuus kuitenkin vaihteli 1,342 kHz – 1,644 kHz välillä. Taajuuden vaihtelu määritettiin oskilloskoopin mittaustyökalulla. Vaihteluun vaikuttaa magneettirenkaan akselikiinnityksen epäkeskeisyys, jolloin ilmavälin pituus vaihtelee ja aiheuttaa tällöin virhettä mittaukseen. A+ ja B+ kanavien jaksonaikojen perusteella on mahdollista määrittää signaalien vaihesiirto, joka on tällöin 91,2°.



Kuva 30. Pulssianturin I A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 300 Hz nopeudella tilanteessa 1.

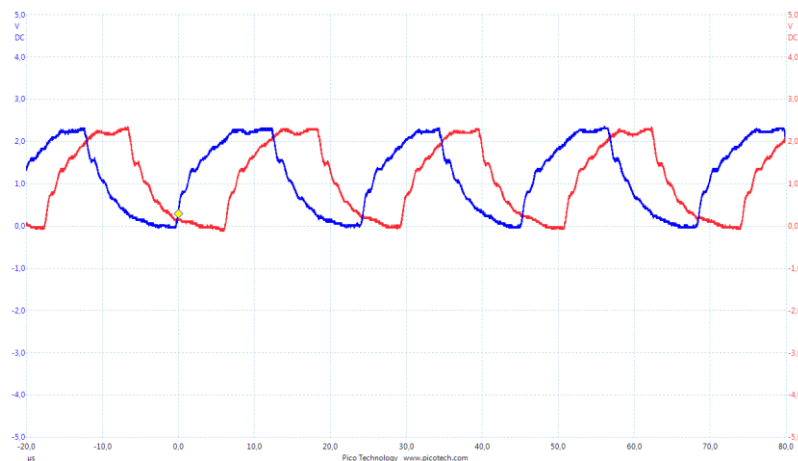
Kuvassa 30 on esitetty pulssisignaalin A+ ja B+ kanavien pulssimuodot 300 Hz nopeudella. Kuvan aika-akselin muuttuessa näyttää, että pulssisignaali on hieman pyöristynyt, mutta todellisuudessa nousu- ja laskuajat ovat samaa luokkaa kuin 10 Hz nopeudella.

Pulssisignaalin jaksonaika on $22,05 \mu\text{s}$, joka vastaa $45\,351,5 \text{ Hz}$ taajuutta. Tälläkin nopeudella huomataan, että taajuus vaihtelee teoreettisen arvon 45 kHz molemmin puolin $41,28 \text{ kHz} - 48 \text{ kHz}$ välillä. Nyt kuitenkin taajuuden vaihtelu on suurempaa kuin 10 Hz nopeudella. Taajuuden vaihtelulla ei ollut kuitenkaan vaikutusta pyörimisnopeuden mittaamiseen tässä tilanteessa. Signaalien jännitetasot 300 Hz nopeudella pysyvät vastaavilla tasoilla kuin 10 Hz nopeudella. Vaihesiirron arvo kuvan perusteella on $91,1^\circ$.



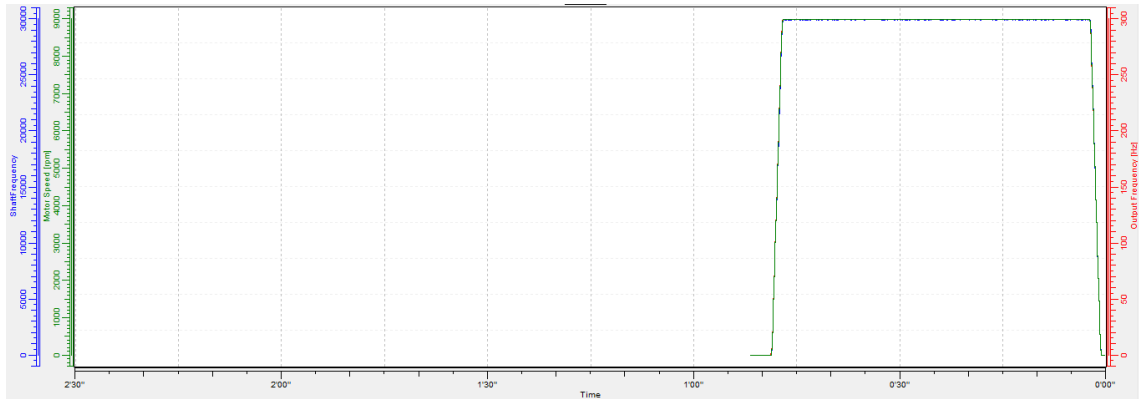
Kuva 31. Pulssianturin $A+$ (sininen) ja $B+$ (punainen) pulssisignaalit 10 Hz nopeudella tilanteessa 2.

Kuvassa 32 on esitetty pulssisignaalit tilanteessa 2 nopeudella 10 Hz . Tässä tilanteessa $A+$, $A-$, $B+$ ja $B-$ kanaviin oli kytketty 33 nF lisäkondensaattorit. Mittauksissa tuuletin oli kytkettyä päälle. Verrattuna tilanteeseen 1 pulssisignaalien nousu- ja laskuajat ovat kasvaneet. Lisäksi signaaleihin on ilmestynyt pieniä jännitepiikkejä, jotka eivät ole kuitenkaan merkittäviä. Signaalien jännitetasoissa ei ole muutoksia verrattuna tilanteeseen 1.



Kuva 32. Pulssianturin $A+$ (sininen) ja $B+$ (punainen) pulssisignaalit 300 Hz nopeudella tilanteessa 2.

Kuvassa 33 on esitetty vastaavat signaalit tilanteessa 2 300 Hz nopeudella. A+ ja B+ kanavat ovat pyöristyneet merkittävästi. Signaalit kuitenkin säilyttävät pulssimaisuutensa eikä pulsseja ole pudonnut pois. Alla kuvassa 34 on esitetty mitattu nopeus ja moottorin nopeus tilanteessa 2, kun moottorin tuuletin on kytkettynä päälle. Tällöin pulssianturi pystyy tuottamaan mittaustietoa eikä pulsseja ole hävinnyt, kun mitattu nopeus pysyy lähellä todellista nopeutta.



Kuva 33. Pulssianturin 1 mittaama nopeus (sininen) ja moottorin todellinen nopeus (vihreä) tilanteessa 2 300 Hz nopeudella.

Taulukossa 4 on esitetty signaalikanavien nousu- ja laskuajat kahdessa eri tilanteessa sekä kahdella eri nopeudella. Kuten taulukosta huomataan ajat ovat moninkertaistuneet lisäkondensaattoreita kytkemällä, sillä anturin tulee ladata suurempi kapasitanssi. Kanavien kesken nousu- ja laskuajoissa ei ole merkittäviä eroja. Aikojen mittaustarkkuuteen vaikuttaa oskilloskoopin tuottaman käyrän sekä mittaustyökalun tarkkuus. Tilanteessa 2 A+ ja B+ kanavien nousu- ja laskuajat ovat 5-6 kertaistuneet tilanteeseen 1 verrattuna.

Taulukko 4. Kahden eri tilanteen pulssisignaalien perusteella lasketut nousu- ja laskuajat.

Moottorin nopeus	Kanava A		Kanava B	
	Nousuaika (μ s)	Laskuaika (μ s)	Nousuaika (μ s)	Laskuaika (μ s)
Tilanne 1				
10 Hz	1,545	1,477	1,503	1,476
300 Hz	1,51	1,407	1,52	1,407
Tilanne 2				
10 Hz	9,909	8,01	8,69	7,499
300 Hz	7,25	8,01	6,799	7,74

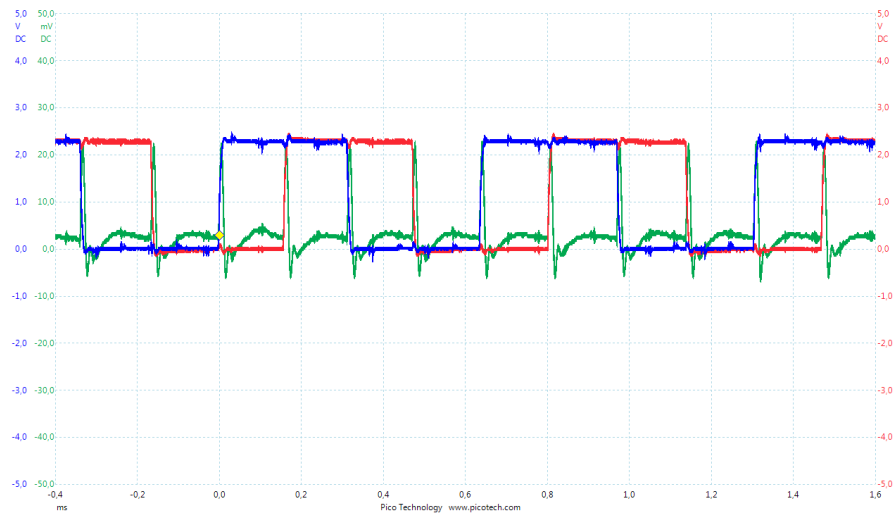
6.2.3 Pulssianturin virransyöttökyky ja -kulutus

Pulssianturin 1 ottama syöttöjännite ja -virta mitattiin tilanteessa 2, jolloin anturin virransyöttökyky on kriittisimmillään. Anturin syöttöjännite tyhjäkäyntitilassa oli 22,92 V. Taulukossa 5 on esitetty pulssianturin syöttöjännitteet sekä anturin ottamat virrat kahdella eri nopeudella. Lisäksi jännitteiden ja virtojen perusteella laskettiin anturin ottamat tehot. Virtojen laskennassa käytettiin oskilloskoopin ohjelmiston mittaustyökaluja.

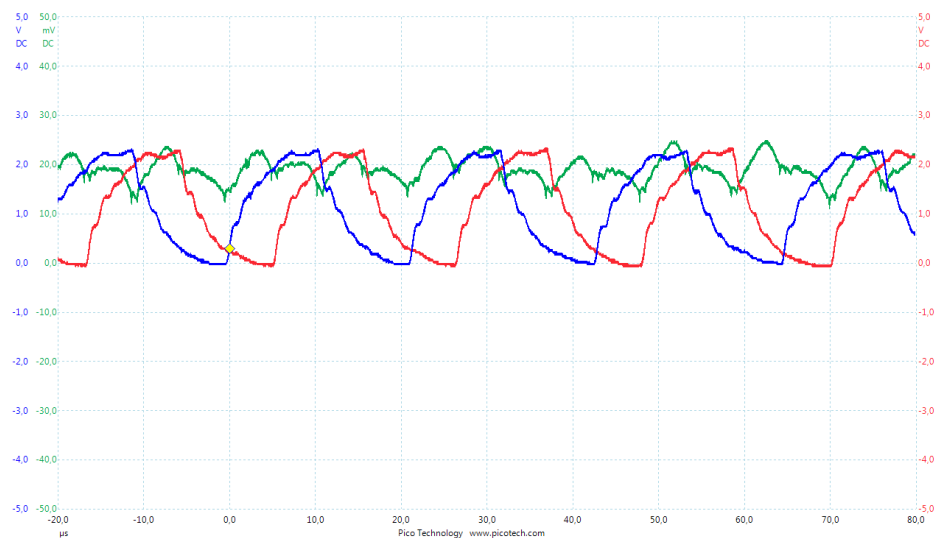
Taulukko 5. Pulssianturin 2 syöttöjännitteet, maksimivirrat, keskiarvovirrat ja tehot kahdessa eri nopeudessa tilanteessa 2.

Moottorin jännitteen ulostulotaajuus	10 Hz	300 Hz
Syöttöjännite (Vdc)	23,08	22,36
Maksimivirta (mA)	73,2	207,4
Keskiarvovirta (mA)	22,7	170,7
Maksimiteho (W)	1,69	4,64
Keskiarvoteho (W)	0,52	3,82

Nopeudella 10 Hz syöttöjännite on hieman noussut verrattuna tyhjäkäyntitilanteeseen. Maksiminopeudella 300 Hz syöttöjännitteen arvo on laskenut 0,56 V. Nopeudella 10 Hz pulssianturin ottama maksimivirta on 73,2 mA, kun vastaava maksimivirran arvon 300 Hz nopeudella on noin 210 mA. Kuvissa 35 ja 36 on esitetty pulssisignaalikäyrien lisäksi virtakäyrät 10 Hz ja 300 Hz nopeudella. Kuvasta 35 huomataan, että pulssien nousevien reunojen kohdilla syntyy suurimmat virtapiikit. Lisäksi mittauksen mukaan virran arvo käy negatiivisena jokaisen virtapiikin jälkeen. Tästä syystä keskiarvovirta on lähellä nolaa taulukossa 4, vaikka maksimivirta on 73.2 mA. Kuvassa 36 on esitetty vastaavat pulssi- ja virtakäyrät 300 Hz nopeudessa. Tällä nopeudella virran arvo vaihtelee välillä 120 mA – 207 mA.



Kuva 34. Pulssianturin 1 A+(sininen) ja B+(punainen) pulssisignaalit sekä syöttövirta (vihreä) 10 Hz nopeudessa.



Kuva 35. Pulssianturin 1 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit sekä syöttövirta (vihreä) nopeudessa 300 Hz.

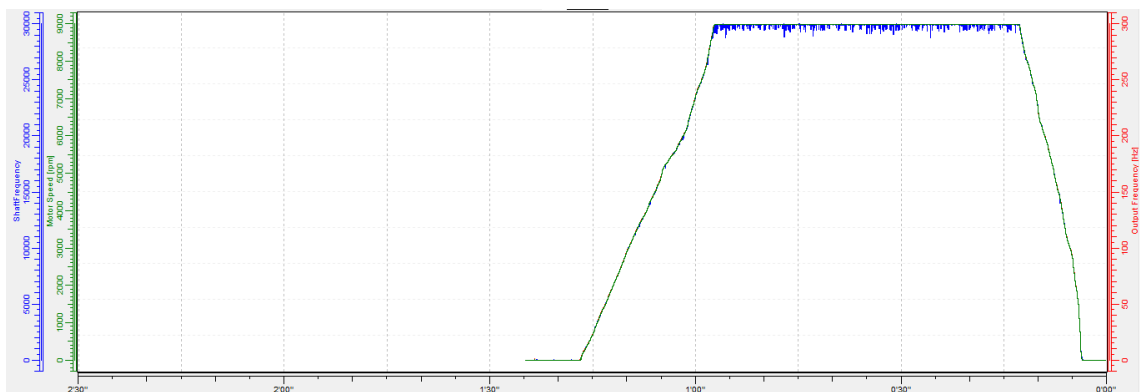
Syöttövirran mittauksen lisäksi pulssianturin 1:n A+ kanavaan syötetyn virran maksimi arvo määritettiin molemmissa tilanteissa 300 Hz nopeudessa, jotta voidaan selvittää anturin suurin mahdollinen virransyöttökyky. Kanavaan A+ syöttämän virran maksimi arvot ovat pulssisignaalin nousevan ja laskevan reunojen kohdilla. Taulukossa 6 on esitetty maksimivirran arvot ja huomataan, että kyseinen anturi pystyy syöttämään pulssikanaviin suurta virtaa, kun ladattavan kapasitanssin arvo on kasvanut. Tilanteessa 2 lisäkondensaattorien ollessa kytkettyinä anturin virransyöttökyky on kasvanut verrattuna tilanteeseen 1 johtuen ladattavan kapasitanssin kasvusta. Tarvittavan virran kasvaessa anturin sisällä kasvaa samalla anturin sisäinen lämpötila. Tilanteessa 2 ilman moottorin ulkoista tuuletinta virran maksimi arvon ollessa noin 300 mA anturin sisäinen lämpötilaraja tulee vastaan ja anturi ei pysty enää luotettavasti mittaamaan nopeutta.

Taulukko 6. Pulssianturin 1 kanavan A+ maksimivirrat tilanteissa 1 ja 2.

	A+ kanavan maksimivirta [mA]	
	Nouseva reuna	Laskeva reuna
300 Hz (Tilanne 1)	174,5	-206,4
300 Hz (Tilanne 2)	286,9	-300,8

6.2.4 Sähköisten häiriöiden kestoisuus

Sähköisten häiriöiden vaikutus pulssianturin toimintaan testattiin kytkemällä 5 nF lisäkondensaattori moottorin kolmivaihesyötön yhden vaiheen ja anturin signaalikaapelin suojavaipan välille. Todellisia häiriötilanteita on haastava mallintaa, koska käyttötilanteet ja ympäristöt ovat erilaisia. Lisäksi anturin kaikkiin kanaviin oli testissä kytkettynä 33nF kondensaattorit. Kuvassa 37 on esitetty pulssianturin mittaama nopeus ja moottorin todellinen nopeus, kun häiriökondensaattori oli kytkettynä. Kuten kuvasta huomataan, mitausarvojen vaihteluväli on suurempi, ja tarkkuus on hieman heikentynyt. Kuitenkin anturi pystyy tuottamaan mittaustietoa, eikä pulsseja ole pudonnut pois. Ulkoinen tuuletin oli kytkettynä päälle mittauksen ajaksi.



Kuva 36. Pulssianturin mittaama nopeus (sininen) ja moottorin todellinen nopeus (vihreä).

Häiriökondensaattori testin yhteydessä mitattiin myös kanavan A+ virransyöttökykyä, joka on esitetty alla taulukossa 7. Virtojen maksimiarvot ovat samaa suuruus luokkaa kuin tilanteessa 2 mitatut, joten häiriökondensaattorilla ei ole vaikutusta kanavaan syötettävään virtaan. Kuitenkin virran maksimiarvojen ollessa korkeita anturi lämpenee ja vaatii erillisen tuulettimen pitääkseen lämpötilan kohtuullisena, jotta pulssisignaaleja voidaan tuottaa.

Taulukko 7. *Pulssianturin 1 kanavan A+ maksimivirta häiriökondensaattori kytkettynä.*

Kanavan A+ maksimivirta [mA]	
Nouseva reuna	Laskeva reuna
270,6	-313,1

6.3 Pulssianturi 2:n mittaustulokset

Toinen vertailuun valittu anturityyppi perustuu optiseen mittaukseen. Anturissa on sokea holkkiakselikiinnitys, jolla anturi kiinnitettiin moottorin akseliin. Holkkiakseli on kiinnitetty moottorin akseliin puristusliittimellä. Anturin kotelo kiinnitettiin joustavalla momenttituella jarrussa olevan alumiinilevyyn. Pulssianturi 2:lle suoritettiin vastaavat mitaukset ja testit kuin ensimmäisellekin anturille. Kuvassa 38 on esitetty pulssianturi 2 kiinnitettynä moottorin akselille. Optisen pulssianturin asennuksessa ei tarvitse tehdä vastaavaa kohdistusta kuin magneettianturin kanssa. Tämä nopeuttaa asennusvaihetta huomattavasti. Asennusvirheiden mahdollisuus on pienempi, kun anturi ei vaadi kohdistamista.

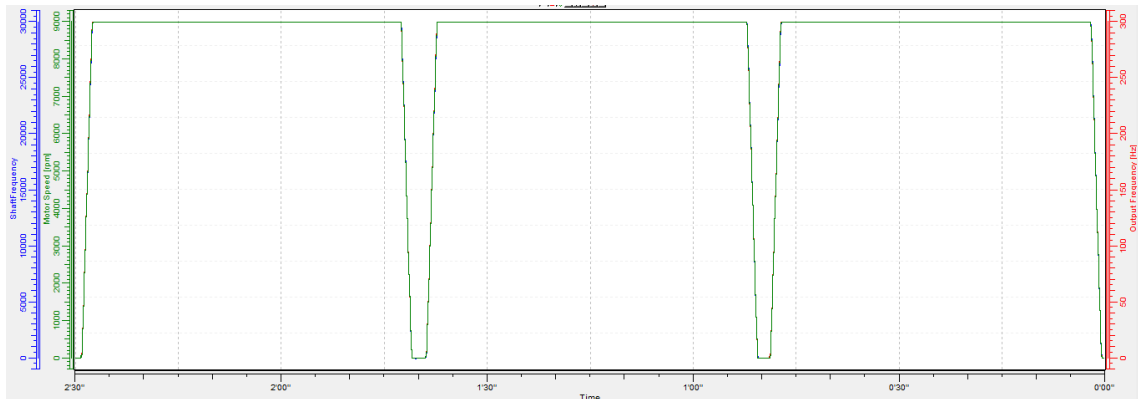


Kuva 37. *Pulssianturi 2 kiinnitettynä moottorin akseliin mittauksia varten.*

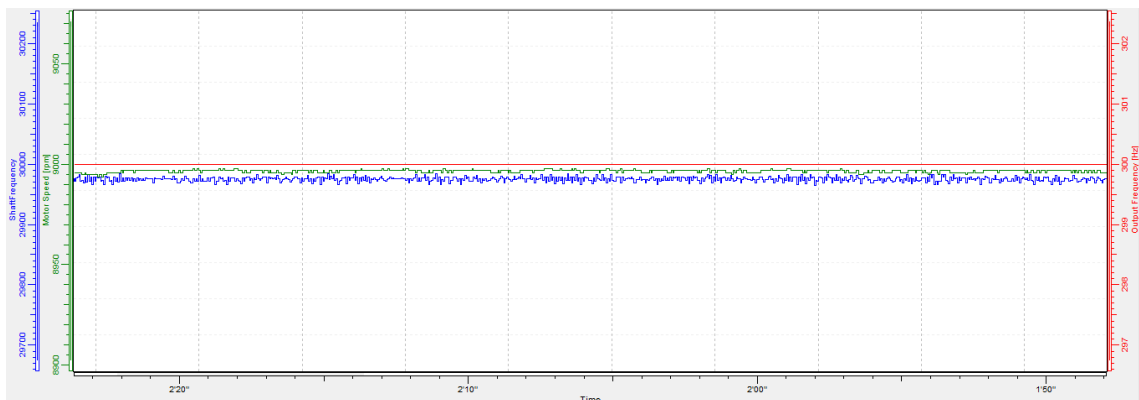
6.3.1 Pulssianturin toiminta ja mittaustarkkuus

Ensimmäisessä testissä tutkittiin pulssianturin 2 mittaussykyä moottorin pyöriessä maksiminopeudella 300 Hz taajuudella. Testissä moottorin tuuletinta ei oltu kytketty päälle. Lisäksi testi toteutettiin 50 metrin signaalikaapelilla ilman lisäkondensaattoreita. Testiajo koostui kolmesta 45 sekunnin ajosta maksiminopeudella. Kuvassa 39 on esitetty pulssianturin 2 mittaama pyörimisnopeus sekä moottorin todellinen pyörimisnopeus. Anturin mittaama nopeus vastaa hyvin moottorin todellista nopeutta.

Kuvassa 40 on tarkennettu kuva pulssianturin mittaamasta nopeudesta sekä moottorin nopeudesta kyseisessä tilanteessa. Moottorin todellinen nopeus on 8997 rpm ja tällöin anturin mittaama nopeusarvo vaihtelee 8990 – 8995 rpm välillä. Mittauksen suurin suhteellinen virhe on 0,08 % ja absoluuttinen mittausrvirhe oli 10 rpm. Vastaava testiajo suoritettiin myös suuntaan S2, jolloin anturin mittauksen suhteellinen virhe pysyi samana kuin suuntaan S1. Mittaustarkkuus määritettiin myös 300 rpm nopeudella, jolloin mittauksen vaihteluväli oli 305 – 310 rpm. Tällöin suhteellinen mittausrvirhe oli 3,3 % ja absoluuttinen mittausrvirhe oli 10 rpm.



Kuva 38. Pulssianturin 2 mittaama pyörimisnopeus (sininen) ja moottorin nopeus (vihreä) suuntaan S1.

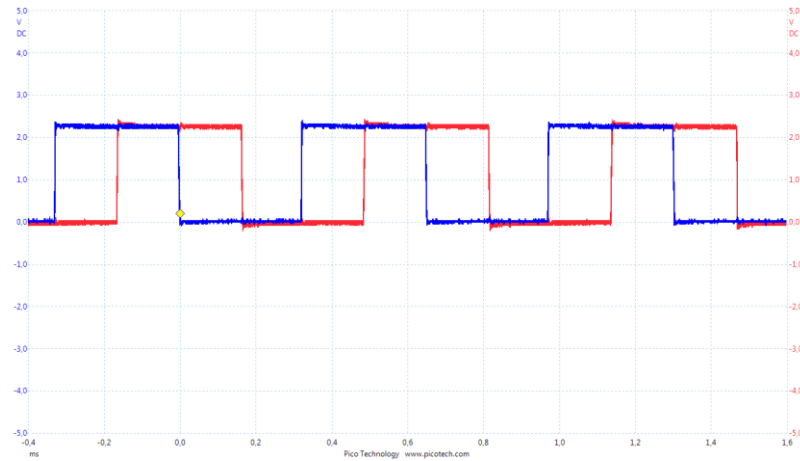


Kuva 39. Pulssianturin 2 mittaama nopeus moottorin pyöriessä maksiminopeudella.

6.3.2 Pulssisignaalin laatu

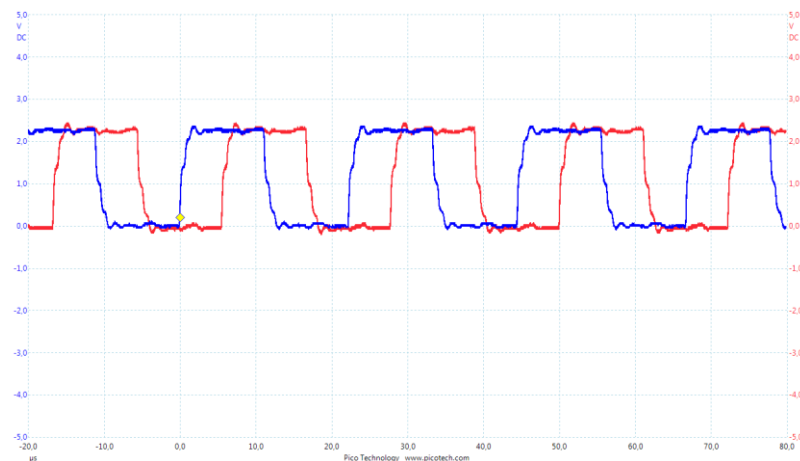
Pulssianturin 2 pulssisignaalin laatua mitattiin oskilloskoopilla kahdessa eri tilanteessa 10 Hz ja 300 Hz nopeuksilla. Ensimmäisessä tilanteessa mittaukset suoritettiin moottorin tuulettimen ollessa kytkettynä pois päältä. Kuvassa 41 on esitetty A+ ja B+ kanavien pulssisignaalit 10 Hz nopeudella. Anturin ulostulosignaaleissa ei esiinny suurempia häiriöitä tai jännitepiikkejä. Signaalien jännite on ylätasolla noin 22,8 V ja alatasolla noin 0,36 V. A+ ja B+ kanavien vaihesiirto on 91,6°. Pulssisignaalin jaksonaika on kuvan perusteella 650 μ s, jolloin pulssianturin ulostulotaajuus on 1538,5 Hz. Kyseisellä nopeudella

pulssisignaalien taajuus vaihteli 1,508 kHz – 1,545 kHz välillä. Huomataan, että taajuuden vaihtelu on pienempää kuin pulssianturi 1:llä. Optisen anturin akselikiinnityksen ollessa epäsuorassa koko anturipaketti pyörii akselin mukana, mikä voi pienentää anturin epäsuoruuden vaikutusta ulostulosignaalin vaihteluun.



Kuva 40. Pulssianturin 2 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 10 Hz nopeudella tilanteessa 1.

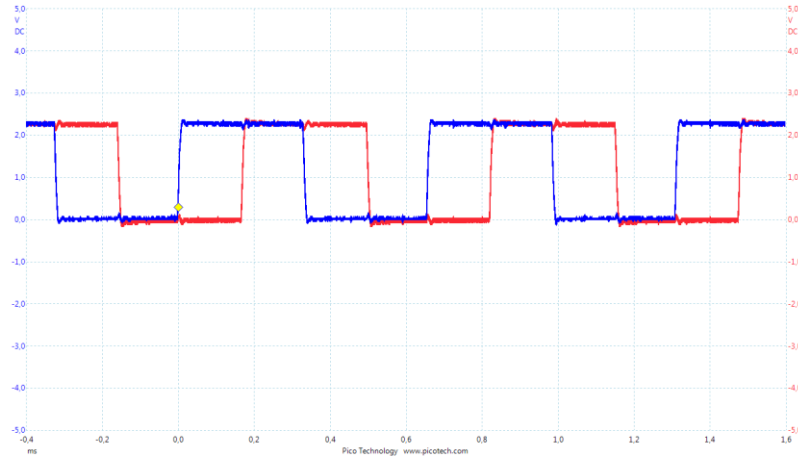
Kuvassa 42 on esitetty vastaavassa tilanteessa pulssisignaalit 300 Hz maksiminopeudella. Pulssisignaaleissa ei esiinny tässäkään tilanteessa suuria häiriöitä tai vääristymiä. Signaalien jännitteet olivat samaa suuruusluokkaa tällä nopeudella kuin 10 Hz nopeudella. A+ ja B+ kanavien välinen vaihesiirto oli $89,6^\circ$. Maksiminopeudella signaalin jaksonaika on $22,24 \mu\text{s}$, jolloin pulssianturin ulostulotaajuus on 44 964,0 Hz. Tällä nopeudella signaalien taajuuden vaihteluväli oli 44,93 kHz – 44,98 kHz. Taajuuden vaihtelu absoluuttinen suuruus on sama kuin 10 Hz nopeudella.



Kuva 41. Pulssianturin 2 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 300 Hz nopeudella tilanteessa 1.

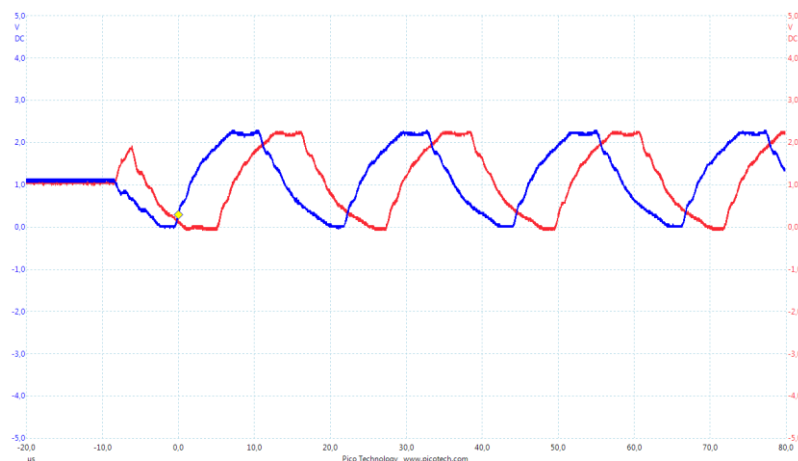
Seuraavaksi pulssianturille 2 toteutettiin mittaukset tilanteessa 2, kun jokaiseen kanavaan oli kytketty 33 nF lisäkondensaattorit. Mittaukset suoritettiin sekä moottorin tuuletin kyt-

kettynä että ilman, mutta sillä ei ollut vaikutusta pulssisignaalin laatuun eikä anturin mitaustulokseen. Kuvassa 44 on esitetty pulssisignaalit 10 Hz nopeudella. Kuvasta voidaan huomata, että pulssisignaalien nousu- ja laskuajat ovat kasvaneet johtuen suuremmasta anturiin kytketystä kapasitanssista. Siitä huolimatta signaaleissa ei esiinny tällä nopeudella häiriöitä tai jännitepiikkejä.



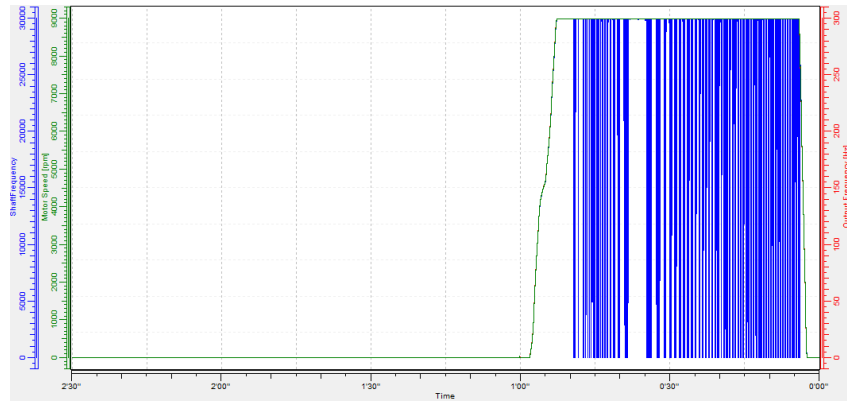
Kuva 42. Pulssianturin 2 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 10 Hz nopeudella tilanteessa 2.

Kuvassa 45 on esitetty pulssianturin 2 signaalit tilanteessa 2 moottorin nopeuden ollessa 300 Hz. Nyt pulsseja on pudonnut pois ja signaalit ovat merkittävästi pyöristyneet verrattuna tilanteeseen 1. Tässä tilanteessa anturi ei enää pystynyt tuottamaan jatkuvasti pulssisignaaleja moottorin pyöriessä maksiminopeudella, eikä siten pystynyt tuottamaan mitaustietoa. Pulssien puuttuminen mittauksessa johtuu anturin virransyöttökyvyn rajoittumisesta, jolloin kaapelin ja lisäkapasitanssien muodostama kokonaiskapasitanssin lataaminen riittävän nopeasti ei ole mahdollista.



Kuva 43. Pulssianturin 2 A+ (sininen) ja B+ (punainen) pulssisignaalit 300 Hz nopeudella tilanteessa 2.

Lisäkondensaattorit kytkettynä pulssianturiin 2 tehtiin 45 sekunnin testiajo maksiminopeudella. Kuvassa 46 on esitetty tilanteessa 2 anturin mittaama nopeus ja moottorin todellinen nopeus. Kuvasta huomataan, että anturi ei pystynyt enää mittaamaan moottorin nopeutta ja mittaustulos vaihtelee rajusti. Mittausarvon vaihtelun aiheuttaa pulssien puuttuminen anturin ulostulosignaalin.



Kuva 44. Pulssianturin 2 mittaama nopeustietoa (sininen) ja moottorin nopeus (vihreä).

Alla olevassa taulukossa 6 on esitetty tarkat nousu- ja laskuajat pulssianturille 2 kahdessa eri tilanteessa ja kahdella eri nopeudella. Tilanteessa 1 nousu- ja laskuajat ovat samaa suuruusluokkaa molemmissa kanavissa. Tilanteessa 2 nousu- ja laskuajat ovat kasvaneet molemmissa kanavissa. Ajat ovat 4 – 5,5 kertaistuneet verrattuna tilanteeseen 1.

Taulukko 8. Kahden eri tilanteen pulssisignaalien perusteella lasketut nousu- ja laskuajat.

Moottorin jännitteen ulostulostaajuus	Kanava A		Kanava B	
	Nousuaika (μs)	Laskuaika (μs)	Nousuaika (μs)	Laskuaika (μs)
Tilanne 1				
10 Hz	1,466	1,459	1,445	1,49
300 Hz	1,418	1,478	1,43	1,488
Tilanne 2				
10 Hz	8,049	7,93	8,163	7,83
300 Hz	6,763	8,253	6,503	8,011

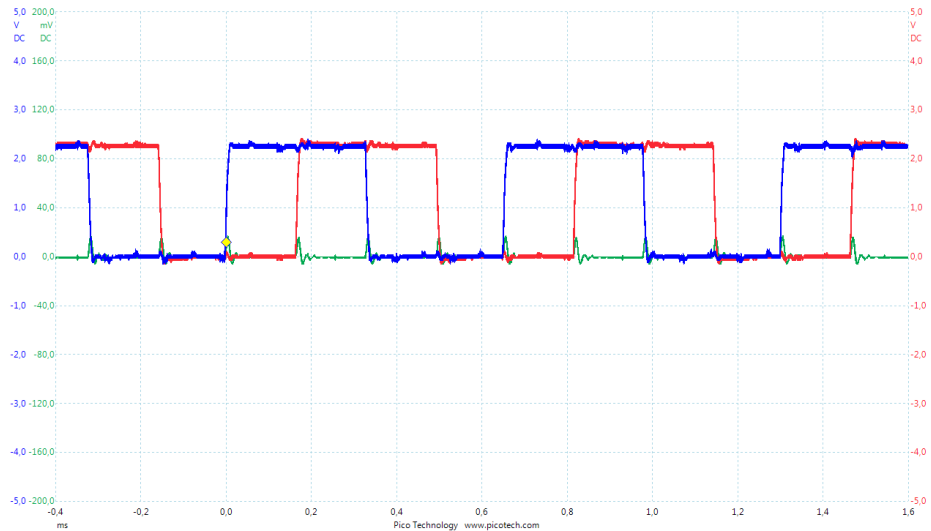
6.3.3 Pulssianturin virransyöttökyky ja -kulutus

Taulukossa 7 on esitetty pulssianturin 2 mitatut syöttöjännitteet ja -virrat tilanteessa, kun anturin kaikkiin kanaviin oli kytketty lisäkondensaattorit. Pulssianturin syöttöjännite tyhjäkäynnissä oli 23,04 V. Nopeudella 10 Hz syöttöjännite ei ole muuttunut merkittävästi verrattuna tyhjäkäyntitilaan. 300 Hz nopeudella jännitteen arvo on alentunut noin 1 voltin 22,6 V arvoon. 10 Hz nopeudella pulssianturin ottama maksivirta on hieman alle 200 mA. Anturin syöttövirran vaihdellessa kyseisessä nopeudessa -58 mA ja 190 mA välillä keskiarvovirraksi tulee 3,6 mA. 300 Hz nopeudella syöttövirta on kasvanut ja tällöin virran maksimi arvon noin 270 mA. Samalla keskiarvovirta on noussut 153 mA arvoon.

Taulukko 9. Pulssianturin 2 syöttöjännitteet, maksimivirrat, keskiarvovirrat ja tehot kahdessa eri nopeudessa tilanteessa 2.

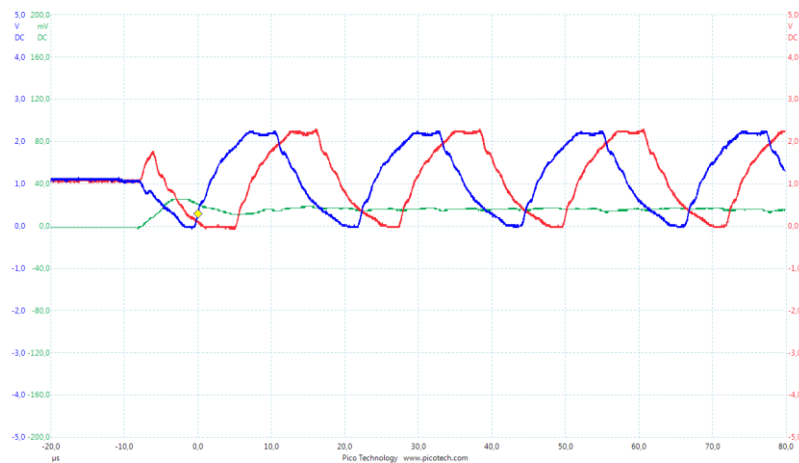
Moottorin jännitteen ulostulotaajuus	10 Hz	300 Hz
Syöttöjännite (Vdc)	23,06	22,6
Maksimivirta (mA)	190,0	269,2
Keskiarvovirta (mA)	3,6	153,0
Maksimiteho (W)	0,083	3,458
Keskiarvoteho (W)	4,381	6,084

Kuvassa 46 on esitetty virtakäyrä 10 Hz nopeudessa. Kuvasta huomataan, että pulssien nousvien ja laskevien reunojen kohdalla pulssianturin ottamassa virrassa esiintyy piikkejä. Jotta jännite voidaan nostaa mahdollisimman nopeasti syöttöjännitteen tasolle, tulee anturiin kytketyn kaapelin kapasitanssi ladata nopeasti, jolloin tarvitaan enemmän virtaa. Virtapiikin jälkeen virran arvo pyrkii palautumaan lähelle nollaa, jolloin virran arvo värähtelee nollan molemmiin puolin. Tästä syystä anturin ottama keskiarvovirran arvo on pieni verrattuna maksimivirran arvoon.



Kuva 45. Pulssianturi 2:n A+ ja B+ kanavien pulssisignaalit sekä virtakäyrä tilanteessa 2 10 Hz nopeudella.

Kuvassa 47 on esitetty pulssianturin 2 pulssisignaalit sekä anturin ottama virta 300 Hz nopeudella. Kuvasta huomataan, että pulsseja muodostaessa anturin ottama virta pysyy lähes vakiona eikä suurempia virtapiikkejä näy. Anturi ei kuitenkaan pysty tuottamaan pulsseja jatkuvasti vaan pudottaa niitä, jolloin anturin ottama virta putoaa nolnaan, kuten kuvan vasemmassa reunassa tapahtuu.



Kuva 46. Pulssianturi 2:n A+ ja B+ kanavien pulssisignaalit sekä virtakäyrä tilanteessa 2 300 Hz nopeudella.

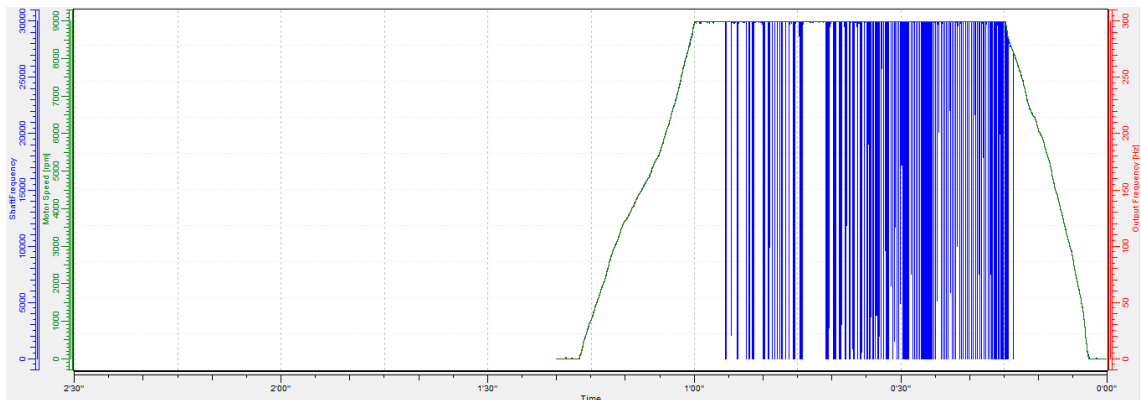
Mittauksissa määritettiin lisäksi pulssianturin 2 virransyöttökyky mittaamalla anturin A+ ulostulokanavan virtaa. Virran maksimiavrot esiintyivät pulssisignaalin nousevien ja laskevien reunojen kohdilla. Taulukossa 9 on esitetty kanavan A+ maksimivirrat. Tilanteessa 1 kanavan maksimivirta on lähes sama nousevalla ja laskevalla reunalla. Laskevalla reunalla virran suunta on negatiivinen. Tilanteessa 2 maksimivirran arvo A+ kanavassa on hieman kasvanut, mutta tässä tilanteessa virta ei ollut riittävä tuottamaan pulsseja jatkuvasti.

Taulukko 10. Pulssianturin 2 kanavan A+ maksimivirrat tilanteissa 1 ja 2.

	A+ kanavan maksimivirta [mA]	
	Nouseva reuna	Laskeva reuna
300 Hz (Tilanne 1)	155,8	-159,9
300 Hz (Tilanne 2)	171,4	-176,2

6.3.4 Sähköisten häiriöiden kestoisuus

Pulssianturille 2 suoritettiin myös sähköisten häiriöiden kestoisuuden mittausta, kun signaalikaapelin suojavaipan ja moottorikaapelin yhden vaiheen välille kytkettiin 5 nF häiriökondensaattori. Lisäksi anturin kaikkiin kanaviin oli kytketty lisäkondensaattorit, kuten tilanteessa 2. Mittaus toteutettiin 300 Hz nopeudessa 45 sekunnin ajona. Kuvassa 48 on esitetty anturin mittaama nopeus ja moottorin todellinen nopeus. Kuten kuvasta huomataan anturin mittaama nopeus ei pysty mittaamaan moottorin pyörimisnopeutta, koska pulssisignaalista putoaa pulsseja pois johtuen rajallisesta virransyöttökäyvyydestä. Mittaus suoritettiin ilman, että tuuletin oli kytketty.



Kuva 47. Pulssianturin mittaama nopeus (sininen) ja moottorin todellinen nopeus (vihreä).

Pulssianturin 2 virransyöttökäyky mitattiin myös häiriökondensaattori kytkettynä. Nousevan ja laskevan reunan kohdilla olevat maksimivirtojen arvot olivat samaa suuruusluokkaa kuin tilanteessa 2 300 Hz nopeudella mitattaessa.

Taulukko 11. *Pulssianturin 2 A+ kanavan maksimivirta häiriökondensaattori kytkettynä.*

Kanavan A+ maksimivirta [mA]	
Nouseva reuna	Laskeva reuna
173,7	-174,4

6.4 Tulosten analysointi

Mittaustulosten perusteella voidaan määrittää vertailuun valittujen pulssiantureiden tekninen suorituskyky nopeasti pyörivän moottorin nopeuden mittauksessa. Molemmat anturit selviytyivät nopeuden mittauksesta koko nopeusalueella ja molempiin pyörimissuuntiin tilanteessa 1, kun anturit olivat kytkettyinä 50 metrin signaalikaapeliin. Lisäksi molempien antureiden suhteelliset mittausvirheet olivat pieniä. Taulukossa 12 on esitetty antureiden suhteelliset mittausvirheet kyseisessä tilanteessa. Taulukosta huomataan, että suhteelliset arvot ovat pienemmät maksiminopeudella kuin hitaalla nopeudella johtuen mittausvirheen absoluuttisen arvon säilyessä samana. Kuitenkin pulssianturi 2:n mittausvirhe oli hieman pienempi 10 Hz nopeudella.

Taulukko 12. *Pulssiantureiden suhteelliset ja absoluuttiset mittausvirheet.*

	Suhteellinen mittausvirhe		Absoluuttinen mittausvirhe	
	10 Hz	300 Hz	10 Hz	300 Hz
Pulssianturi 1	6,7%	0,08 %	20 rpm	7 rpm
Pulssianturi 2	3,3 %	0,08 %	10 rpm	7 rpm

Taulukko 13. *Pulssiantureiden ulostulotaajuuden vaihtelu kahdessa nopeudessa.*

	Taajuuden vaihtelu	
	10 Hz	300 Hz
Pulssianturi 1	1,342 – 1,644 kHz	41,28 – 48,00 kHz
Pulssianturi 2	1,508 – 1,545 kHz	44,93 – 44,98 kHz

Oskilloskoopilla mitattaessa huomattiin, että pulssisignaalien ulostulotaajuudet vaihtelivat mittauksien aikana. Taululukossa 13 on esitetty taajuuksien vaihteluvälit. Pulssianturilla 1 taajuuden vaihtelu on suurempaa kuin pulssianturilla 2. Taajuuden vaihtelun merkittävin aiheuttaja on akselin epäsuoruus tai holkkiakselikiinnityksen epäkeskeisyys, jonka vaikutus magneettianturiin on suurempi kuin optiseen anturiin. Akselikiinnityksen epäkeskeisyys aiheuttaa ilmavälin pituuden muuttumisen magneettirenkaan ja lukijan välillä. Tällöin ilmavälin ollessa pienimmillään lukija havaitsee enemmän pulsseja samassa ajassa kuin tilanteessa, jossa ilmaväli on suurimmillaan. Tästä syystä magneettisen pulssianturin ulostulosignaaleissa on suurempi vaihtelu kuin optisella anturilla.

Taajuuden vaihtelulla ei kuitenkaan ollut merkittävää vaikutusta nopeuden mittaustarkkuuteen, kuten taulukosta 12 voidaan todeta. Taajuusmuuttajan nopeuden laskennassa käytetty näytteistysaika pystyi suodattamaan osan taajuuden vaihtelun vaikutuksesta. Optisen anturin ulostulotaajuuteen akselikiinnityksen epäkeskeisyys ei vaikuttanut yhtä paljon kuin magneettisen. Tämä johtuu siitä, että optisen anturin pyörivä kiekon ja lukijan välinen etäisyys pysyy samana epäkeskeisyydestä huolimatta. Kuitenkin optisella anturilla näkyi hieman taajuuden vaihtelua, joka voi johtua oskilloskoopin mittaustarkkuudesta tai anturin signaalinkäsittelyelektronikasta. Pulssianturin 2 taajuuden vaihteluvälin absoluuttinen arvo pysyi samana molemmissa nopeuksissa.

Tilanteessa 2 lisäkondensaattoreiden ollessa kytkettyinä ja ulkoisen moottorituulettimen ollessa pois päältä pulssianturi 1 pystyi mittaamaan 10 Hz nopeudessa yhtä hyvällä tarkkuudella kuin ilman lisäkondensattoreita. Nopeudella 300 Hz pulssianturi 1 alkoi kuitenkin pudottaa pulsseja 20 sekunnin jälkeen. Moottorituuletin kytkettynä pulssianturi suoriutui kuitenkin mittauksesta myös 300 Hz nopeudella. Ilman tuuletinta 300 Hz nopeudella pulssianturi 1:n syöttämä virta kasvattaa anturin sisäistä lämpötilaa, jolloin anturin sisäisen elektronikan lämpötila kasvaa. Elektronikalla on terminen raja, joka ylittettäessä ulostulo kytkeytyy pois päältä. Moottorin tuuletin kytkettynä anturi pystyi tuottamaan mittaustietoa.

Pulssianturi 2:lla suoritettiin mittaukset tilanteessa 2 tuuletin kytkettynä päälle ja ilman tuuletinta. Tuulettimen jäähdytyksellä ei ollut vaikutusta pulssisignaalin muotoon eikä pulssianturin mittaukseen. Pulssianturi 2 ei kyennyt tuottamaan mittaustulosta 300 Hz nopeudella heikon virransyöttökäyvyn takia, jonka takia pulssisignaalista putosi pulsseja pois. Pulssianturille haettiin rajataajuus, jolla anturi pystyy vielä mittaamaan nopeutta. Ilman tuuletinta rajataajuus oli 140 Hz ja tuulettimen kanssa 220 Hz. Taulukossa 14 on esitetty pulssiantureiden virransyöttökäyvyt kahdella eri nopeudella, kun moottorin tuuletin on kytkettynä. Taulukosta huomataan, että pulssianturi 1:n virransyöttökäyky on tilanteessa 2 lähes kaksinkertainen verrattuna pulssianturi 2:en.

Taulukko 14. *Pulssiantureiden virransyöttökyvyt 300 Hz nopeudella tilanteessa 1 ja 2.*

	Nouseva reuna		Laskeva reuna	
	Tilanne 1	Tilanne 2	Tilanne 1	Tilanne 2
Pulssianturi 1	174,5 mA	286,9 mA	-206,4 mA	-300,8 mA
Pulssianturi 2	155,8 mA	171,4 mA	-159,9 mA	-176,2 mA

Pulssisignaaleiden nousu- ja laskuajat olivat molemmilla testiin valituilla antureilla keskenään samaa suuruusluokkaa tilanteissa 1 ja 2. Tilanteessa 2 molempien antureiden nousu- ja laskuajat olivat noin 5-6 -kertaiset verrattuna tilanteeseen 1, jolloin antureissa ei ollut kytkettynä lisäkondensaattoreita. Tilanteessa 2 pulssisignaalit olivat pyöristyneet molemmilla pulssiantureilla, mutta pyöristyminen pysyi kohtuullisella tasolla.

Lisäksi sähköisten häiriöiden kestoisuutta testattiin häiriökondensaattorin avulla. Mittaustulosten perusteella sillä ei kuitenkaan ollut merkittävää vaikutusta tuloksiin tilanteessa 2. Pulssianturi 1 kykeni mittaamaan nopeutta hieman heikommalla mittaustarkkuudella. Vastaavasti pulssianturi 2 ei suoriutunut tästä mittauksesta, kuten ei tilanteessa 2:kaan. Sähköisten häiriöiden kestoisuutta mitatessa moottorin tuuletin oli kytkettynä. Häiriökondensaattori moottorin yhdestä vaiheesta signaalikaapelin häiriösuojapunoskeen pulssianturin päässä. Signaalikaapelin suojapunos oli kuitenkin maadoitettu molemmista päistä kaapelia, joten kondensaattorin kautta syötetty häiriöjännite ohjautui maihin, eikä sillä siten ollut vaikutusta signaalikanaviin.

Taulukossa 15 on esitetty mittaustulosten, asennettavuuden sekä hintatason perusteella tehty arviointi vertailuun valituille pulssiantureille. Molempien pulssiantureiden mittaustarkkuudet olivat hyväksytyllä tasolla 10 Hz ja 300 Hz nopeuksilla, kun anturit olivat kytkettyinä 50 metrin signaalikaapeliin. Lisäksi molempien antureiden pulssisignaaleissa ei esiintynyt häiriöitä tai merkittäviä epäideaalisuuksia kyseisissä nopeuksissa. Tilanteessa 2 lisäkondensaattorit kytkettyinä pulssianturi 1 pystyi mittamaan hyväksytysti koko mittaussjakson, kun moottorin ulkoinen tuuletin oli kytkettynä. Pulssianturi 2 ei kyennyt tuottamaan nopeusmittaustietoa kyseisessä tilanteessa, vaikka tuuletin oli kytkettynä.

Taulukko 15. *Hyvyyskriteeristön perusteella tehty arviointi pulssiantureille.*

	Pulssianturi 1	Pulssianturi 2
Mittaustarkkuus	Hyväksytty	Hyväksytty
Pulssisignaalin laatu tilanteessa 1	Hyväksytty	Hyväksytty
Pulssisignaalin laatu tilanteessa 2	Hyväksytty	Hylätty
Virransyöttökyky	Hyväksytty	Hylätty
Sähköisten häiriöiden kestoisuus	Hyväksytty	Hylätty
Asennettavuus/vaihdeavuus	2	3
Hintataso	2	3

Pulssianturilla 1 oli mittausten perusteella hyvä virransyöttökyky ulostulokanavan A+ maksimivirran ollessa tilanteessa 2 lähes 300 mA. Vastaava arvo pulssianturi 2:lle oli vain noin 170 mA. Heikomman virransyöttökyvyn takia pulssianturi 2 ei pystynyt tuottamaan nopeusmittaustietoa tilanteessa 2. Sähköisten häiriöiden kestoisuutta testattaessa 200 metrin kaapelikytkennällä pulssianturi 1 kykeni tuottamaan pulssisignaalia häiriökondensaattorista huolimatta. Asennettavuuden kannalta pulssianturi 1 sai heikomman arvosanan asennuksen kohdistamistarpeesta ja siten virheherkkyydestä. Pulssianturin 2 asennus oli nopeaa ja se ei vaatinut kohdistamista, mikä helpotti onnistuneen asennuksen tekemistä. Pulssianturin 1 hinta on noin 1,3-kertainen verrattuna pulssianturi 2, joten paremman kustannustason myötä pulssianturi 2 sai paremman arvosanan.

7. YHTEENVETO

Työssä oli tarkoitus selvittää eri pulssianturitekniikoiden käyttöä nopeasti pyörivän oikosulkumoottorin nopeuden mittauksessa. Työssä tehtiin vertailua kahden eri pulssianturitekniikan välillä. Vertailu toteutettiin käytännön mittausten ja testien perusteella. Mittaustulosten perusteella todennettiin vertailuun valittujen antureiden toimintakyky sähkömoottorikäytössä.

Luvussa 2 perehdyttiin yleisesti nostinkäytöissä käytettäviin sähkömoottorikäyttöihin ja komponentteihin, jotka vaikuttavat pulssianturin valintaan. Pulssianturi toimii kahden rajapinnan välissä, jolloin anturin valinnassa tulee huomioida mekaaninen rajapinta moottorin kanssa sekä sähköinen rajapinta taajuusmuuttajan kanssa. Työn käyttökohteessa oleva taajuusmuuttaja asetti sähköisiä vaatimuksia pulssianturin ulostulosignaalin sekä sen taajuudelle. Pulssianturin ulostulosignaalin tulee HTL-tasoinen ja pulssimäärä saa olla maksimissaan 333 ppr, mikä johtuu taajuusmuuttajan ohjauskortin rajallisesta taajuuskaistasta. Lisäksi nostinkäytöissä tarvittavat pitkät kaapelipituudet huomioitiin mitauksissa.

Luvussa 3 esiteltiin erilaiset pulssianturien toimintaperiaatteet, joista inkrementaalipulssianturi on tämän työn kannalta merkittävin. Lisäksi se on kustannukseltaan edullisempi vaihtoehto kuin absoluuttipulssianturi. Inkrementaalianturit voidaan jakaa vielä useaan toteutusteknologiaan, joiden sopivuutta nopeuden mittauksessa vertailtiin. Toteutusteknologioista optinen ja magneettinen pulssianturi olivat käyttökelpoisimmat nopeasti pyörivän moottorin nopeuden mittauksessa. Muut menetelmät, kuten kapasitiivinen ja mekaaninen eivät olleet mahdollisia korkeiden pyörimisnopeuksien sekä häiriöherkkyyden takia.

Työn vertailua varten valittiin kaksi pulssianturia, joista toinen perustuu magneettiseen mittaustapaan ja toinen optiseen. Pulssiantureiden pulssiluvuksi valittiin 300 ppr. Luvussa 4 määritettiin sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet, jotka tulee ottaa huomioon anturin valinnassa. Sähköisistä ominaisuuksista merkittävimmät ovat pulssien lukumäärä, ulostulosignaalin tyyppi, virransyöttökyky ja sekä maksimi ulostulotaajuus. Mekaanisista ominaisuuksista tärkeimmät ovat maksimi mekaaninen pyörimisnopeus, kiinnitystapa sekä asennettavuus.

Valituille pulssiantureille toteutettiin mitaukset ja testit, joiden perusteella tehtiin johtopäätökset antureiden suorituskyvystä. Testeissä antureiden toimintakykyä ja mittaustarkkuutta testattiin kahdella nopeudella 10 Hz ja 300 Hz. Lisäksi tutkittiin antureiden pulssisignaalin laatua kahdella eri kaapelipituuksilla (50 m ja 200 m). Nostinkäytöissä kaapelipituudet ovat tyypillisesti alle 50 metriä, mutta välillä on tarvetta myös pidemmille kaapelipituuksille.

Mittaustulosten tueksi määritettiin hyvyyskriteeristö, jonka perusteella tulosten johtopäätökset tehtiin. Pulssianturin 1 tekninen suorituskyky oli riittävä läpäistäkseen hyväksytysti kaikki mittaukset, kun tilanteessa 2 moottorin ulkoinen tuuletin oli kytkettynä. Kuitenkin sen asennettavuus ja hintataso olivat heikompia kuin pulssianturi 2:n. Pulssianturi 2 ei kuitenkaan suoriutunut kaikista testeistä teknisesti. Pidemmällä 200 metrin kaapelipituudella anturi ei enää pystynyt tuottamaan pulssisignaaleja ja nopeuden mittaus ei ollut mahdollista, vaikka moottorin tuuletin oli kytketty.

Pulssianturi 1 on siis kokonaisuudessaan teknisten mittaustulosten perusteella parempi valinta nopeasti pyörivän moottorin nopeuden mittaukseen. Kaapelipituuden ollessa 50 metriä voi pulssianturi 2 olla kuitenkin varteenotettava valinta, sillä se on hintatasoltaan kilpailukykyisempi. Anturin valinnassa tulee ottaa huomioon myös elinikä sekä mekaaniset kestävyudet, joita ei tämän työn puitteissa ollut mahdollista testata.

LÄHTEET

- [1] New for 2016/2017 -catalogue, Kübler Group, 2017. Saatavissa (viitattu 16.2.2017): https://www.kuebler.com/k2016/pdf?New_for_2016-2017_en.pdf
- [2] Halminen, A., Johdatus nosturitekniikkaan, Konecranes Koulutusmateriaali, 2007.
- [3] Bastman, J., Sähkökoneet, luentokalvot, Tampereen teknillinen yliopisto, 2012.
- [4] Facts Worth Knowing about Frequency Converters -handbook, Danfoss, 2014, p. 180. Saatavissa (viitattu 16.2.2017): <http://danfoss.ipapercms.dk/Drives/DD/Global/SalesPromotion/FWK/FWKComplete/>
- [5] Technical guide No. 7 – Dimensioning of a drive system, Helsinki, ABB, 2011.
- [6] Rekola, J., Sähkösäätötekniikka, Lecture 7: Control of asynchronous machine -luentokalvot, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017.
- [7] Konecranes materiaali, D2V-taajuusmuuttajaohje, 2017.
- [8] Veltman, A., Pulle, D., De Doncker, R., Fundamental of electric drives, Second edition, 2007,
- [9] Niiranen, J. Sähkösäätötekniikka, Helsinki, Otatieto, 1999.
- [10] Technical guide No. 1 – Direct torque control - the world's most advanced AC drive technology, Helsinki, ABB, 2011.
- [11] De Doncker, R., Pulle, D., Veltman, A., Advanced Electrical Drives – Analysis, Modeling, Control, First edition, 2011, 475 p.
- [12] The use of rectifiers in brake motors, Diequa corporation, 2016. Saatavissa (viitattu 16.2.2017): <http://www.diequa.com/newsroom/201601-the-use-of-rectifiers-in-brake-motors.html>
- [13] Encoder application handbook, Danaher Industrial Controls, 2003. Saatavissa (viitattu 13.2.2017): https://www.dynapar.com/uploadedFiles/Products/Danaher_Encoder_Handbook.pdf
- [14] Wilson, J., Sensor Technology Handbook, 1st edition, Amsterdam, Elsevier Inc., 2005.
- [15] The advantages of capacitive vs optical encoders, Cui inc, 2014. Saatavissa (viitattu 8.3.2017): <http://www.cui.com/catalog/resource/capacitive-vs-optical.pdf>
- [16] Fraden, J., Handbook of modern sensors, Fifth edition, Springer, 2014, 765 s.

- [17] Posital Fraba, 2017. Saatavissa (viitattu 7.12.2016): <https://www.posital.com/en/products/communication-interface/incremental/incremental-encoders.php>
- [18] Dynapar, Absolute rotary encoders, Saatavissa (viitattu 6.2.2017): <http://www.dynapar.com/technology/absolute-rotary-encoders/>
- [19] Le, H. T., Hoang, H. V., Jeo, J. W., Efficient method for correction and interpolation signal of magnetic encoders, 2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, Daejeon, 2008, pp. 1383-1388.
- [20] Magnetic encoders, Dynapar, 2017. Saatavissa (viitattu 15.3.2017): https://www.dynapar.com/Technology/Encoder_Basics/Magnetic_Encoder/
- [21] Position and Motion Sensors -katalogi, Kübler Group, 2017. Saatavissa (viitattu 16.2.2017): https://www.kuebler.com/k2016/pdf?PBS_Position_Motion_Sensors_en.pdf
- [22] Honeywell, Hall effect sensing and application, Freeport, Illinois, p. 126.
- [23] Application examples: magnetic sensing, iCHaus, 2016. Saatavissa (viitattu 10.4.2017): http://www.ichaus.de/upload/pdf/iC-Haus_Product_Selector_Magnetic_Encoder_Applications_6-16.pdf
- [24] iC-MA -datalehti, iCHaus, 2014. Saatavissa (viitattu 10.4.2017): http://www.ichaus.de/upload/pdf/MA_datasheet_C1en.pdf
- [25] iC-MZ -datalehti, iCHaus, 2014. Saatavissa (viitattu 10.4.2017): http://www.ichaus.de/upload/pdf/MZ_datasheet_B2en.pdf
- [26] Ebbesson, C., Rotary Position Sensors Comparative study of different rotary position sensors for electrical machines used in a hybrid electric vehicle application, Lund University, Industrial electrical engineering and automation, 2011.
- [27] Craig, K., Actuator & Sensors in Mechatronics, Optical Encoders -luentokalvot, 2015.
- [28] Petrella, R., Tursini, M., Peretti, L., Zigliotto, M., Speed measurement algorithms for low-resolution incremental encoder equipped drives: a comparative analysis, International Aegean conference on electrical machines and power electronics, 2007, pp. 780 – 787.
- [29] Electronics tutorial, Amplifier classes, 2017. <http://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>
- [30] National instruments, knowledge base, 2017. <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/D9B4018C3E540CE4862570F30068C0DB>

- [31] Interface to Sin/Cos Encoders With High-Resolution Position Interpolation, Texas Instruments, 2015. Saatavissa (viitattu 10.4.2017): <http://www.ti.com/lit/ug/tidua05a/tidua05a.pdf>
- [32] Storey, N., Electronic: a system approach. Third edition, Great Britain, Pearson Education Limited, 2006, p. 645.
- [33] Twisted pair testing, Cirris systems, 2016. Saatavissa (viitattu 3.3.2017): <http://www.cirris.com/learning-center/testing-guidelines/special-topics/36-twisted-pair-testing>
- [34] Senior, J. M., Yousif Jamro, M., Optical fiber communications: principles and practice. Third edition, England, Pearson Education, 2009, p. 1127.
- [35] Eliminating magnetic encoder interference from brakes & motors, Avtron industrial automation. Saatavissa (viitattu 10.4.2017): <http://www.nidec-avtron.com/encoders/documents/white-papers/wp-elim-mtr-shft-crnts.pdf>
- [36] Technical guide No. 5 – Bearing current in modern AC drive systems, Helsinki, ABB, 2011.
- [37] Prolonging encoder life, Encoder products company, Saatavissa (viitattu 10.4.2017): http://encoder.com/literature/e-book_prolonging%20encoder%20life.pdf
- [38] Understanding IP Encoder Ratings, Dynapar. Saatavissa (viitattu 8.3.2017): http://www.dynapar.com/uploadedFiles/_Site_Root/Technology/White_Papers/Choosing%20the%20Right%20IP%20Rating_vf.pdf