ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Electrical Engineering
Ville Niskanen

Wireless torque measurement system

Master's thesis

1.10.2010
116 pages, 47 figures, 13 tables and 5 appendices
Examiners:
D.Sc, Professor Jero Ahola
D.Sc, Research manager Markku Niemelä

Keywords: Torque, Wireless, Measurement system

In this master's thesis, a wireless torque measurement system for use in industrial applications is designed and implemented. Wireless data transfer is executed through XBee modules based on Zigbee radio networking technology. The target application for this solution are rotating shafts, to which it is laborious, if not impossible, to install a wired measurement system. The paper describes the functionality of the system, outlines the most essential structural and operational principles, and evaluates measurement uncertainty of the system, as well as reports measurement results made with the system. Furthermore, some of the measurement results are compared with those of another torque measurement system.

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikka
Ville Niskanen

Langaton vääntömomentin mittausjärjestelmä

Diplomityö

1.10.2010
116 sivua, 47 kuvaa, 13 taulukkoa ja 5 liitettä
Tarkastajat:
TkT, Professori Jero Ahola
TkT, Tutkimusjohtaja: Markku Niemelä

Hakusanat: Vääntömomentti, Langaton, Mittausjärjestelmä

Diplomityössä suunnitellaan ja toteutetaan teollisuusympäristöön soveltuva langaton vääntömomentin mittausjärjestelmä. Langaton tiedonsiirto toteutetaan soveltaen Zigbee-radiotekniikkaan perustuvia XBee-moduuleja. Käyttökohteina sovellukselle ovat pyörivät akselit, joihin langallisen mittausjärjestelmän asentaminen on hankalaa tai mahdotonta. Työssä kuvataan järjestelmän toiminnallisuus, esitellään oleellisimmat järjestelmän rakenteeseen ja toimintaan liittyvät asiat, arvioidaan järjestelmän mittausepävarmuus sekä esitellään järjestelmällä saatuja mittaustuloksia. Lisäksi osaa mittaustuloksista verrataan referenssilaitteistolla saataviin tuloksiin.

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET 4

Merkinnät 4

Lyhenteet 5

1 JOHDANTO 7

1.1 Järjestelmän tekninen määrittely 7

2 MITTAUSEPÄVARMUUDEN ARVIOINTI 11

2.1 Venymäliuskamittasillan ja mittasiltavahvistimen mitoitus 11

2.2 Järjestelmän mittausepävarmuus 13

2.2.1 Akselin ominaisuuksista aiheutuva mittausepävarmuus 14

2.2.2 Mittasillan- ja mittasiltavahvistimen mittausepävarmuusrajat 15

2.2.3 A/D-muuntimen mittausepävarmuus 16

2.2.4 Mittausjärjestelmän kokonaisepävarmuuden arviointi 17

3 MITTAUSJÄRJESTELMÄN TOTEUTUS 21

3.1 Kiinnityslaippojen lujuuslaskenta 21

3.1.1 Kiihtyvän liikkeen edellyttämä tukivoima 27

3.2 Lämpötilamuutosten aiheuttaman mittausvirheen kompensointi 30

3.2.1 Lämpötilan mittausepävarmuus 34

3.3 Langaton tiedonsiirto 35

3.3.1 Langattomantiedonsiirron ongelmat 35

3.3.2 Dopplerin-ilmiö vaikutuksen arviointi 36

3.4 IEEE 802.15.4 LR-WPAN 38

3.4.1 PHY- ja MAC-kerros 38

3.4.3 CRC/FCS-virheentarkastussumma 40

3.4.4 CSMA-CA-kanavanvarausalgoritmi 41

3.4.5 DSSS-kanavointitekniikka 42

3.5 ZigBee 44
3.5.1 XBee PRO-moduulit 45
3.5.2 Paketin lähetysjaksonajan laskenta 47
3.5.3 CSMA-CA-kanavnavarausalgoritmin viive 48
3.5.4 Datapaketin siirtoaika 49
3.5.5 Datapaketin vastaanotonkuittaus 49
3.5.6 Datapaketin uudelleenlähetys 51
3.5.7 Efektiivinen hyötydatan siirtonopeus 51
3.5.8 XBee-moduulin ohjelmointi 55
3.5.9 Lähetin ja vastaanotin 57
3.5.10 XBee-moduulin lähetysteho 58
3.6 Järjestelmän toiminta 60
3.6.1 Mikrokontrolleri 60
3.6.2 Mikrokontrollerin toiminta 63
3.6.3 16-bittinen ajastin 64
3.6.4 A/D-muunnin ADS-7813 65
3.6.5 SPI-väylä 66
3.6.6 USART-väylä 67
3.6.7 Lämpötilamittaus 68
3.6.8 Mikrokontrollerin ohjelmointi 69
3.6.9 Oheiskomponenttilevy 71
3.7 Elektroniikan suojaus 72
3.8 Järjestelmän tehonsyöttö 72
3.8.1 Mittasillan ja mittasiltavahvistimen virran- ja tehonkulutus 73
3.8.2 A/D-muuntimen virran- ja tehonkulutus 74
3.8.3 Mikrokontrollerin virran- ja tehonkulutus 74
3.8.4 RF-moduulin virran- ja tehonkulutus 74

3.8.5 Järjestelmän tehonkulutus ja teholähteen varauskapasiteettitarve 75
3.9 Järjestelmän kotelointi ja EMC-suojaus 76
3.9.1 Sähkö- ja magneettikentät 77
3.9.2 Kaukokenttä 79
3.10 Mittaustiedon käsittely 82
3.10.1 Mittaustiedon tallennus Realterm-ohjelmalla 82
3.10.2 Mittaustiedon analysointi Matlab-ohjelmalla 83
3.11 Järjestelmäprototyypin kustannusarvio 84
4 MITTAUSJÄRJESTELMÄN TOIMINNALLISUUDEN TESTAUS 86
4.1 Järjestelmän kohina 86
4.3 Dynaaminen vääntömomentti 88
4.2 Lämpötilan vaikutus mittausjärjestelmään 94
4.2 Värähtelymittaus 95
4.4 Vertailukoe 97
4.7 Mediaanisuodatin 102
4.7 Kentänvoimakkuusmittaus 103
5 YHTEENVETO 107
LIITTEET 110
LÄHTEET 123

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Merkinnät

c	valon nopeus tyhjiössä $[3 \cdot 10^8\ \mathrm{m/s}]$
C	kaistanleveys $[b/s]$
d	etäisyys [m]
D	halkaisija [m]
E	kimmomoduuli $[\mathrm{N/m^2}]$
ε ,$\mu\varepsilon$	suhteellinen venymä $[\mathrm{m/m}]$, $[\mathrm{mm/m}]$
f	taajuus [Hz]
I	tasavirta [A]
m	massa [kg]
η	hyötysuhde
Pa	paine $[\mathrm{N/m^2}]$
P	teho [W]
R	resistanssi [Ω]
T	vääntömomentti [Nm]
T_c	Lämpötila [℃]
U	tasajännite [V]
v	kehänopeus $[\mathrm{m/s}]$

Lyhenteet

ACK	ACKnowledgement, virheentarkastuksen läpäisseen paketin kuittaus
AES	Advanced Encryption Standard
ARM	Advanced RISC Machine
Baud	Symbolinopeus, Baud/s, kertoo kuinka montako symbolia esitetään sekunnissa.
BER	Bit Error Rate, bittivirhesuhde
CCA	Clear Channel Assessment
CRC	Cyclic Redundancy Check
CS	Carrier Sense
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance
DLE	Differential Linearity Error
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EMC	Electromagnetic Compatibility
FCS	Frame Check Sequence
FET	Field Effect Transistor
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
ILE	Integral Linearity Error
ISR	Interrupt Service Routine, keskeytysaliohjelma
JTAG	Joint Test Action Group
LDO	Low Drop Out
LED	Light Emitting Diode
LIFS	Long Inter Frame Space
LiPo	LithiumPolymeeri, akkutyyppi
LNA	Low Noise Amplifier
LR-WPAN	Low data rate - WPAN
LSB	Least Significant Bit
LSByte	Least Significant Byte
MAC	Media Access Control
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPDU	Mac Protocol Data Unit
MSB	Most Significant Bit

MSByte	Most Significant Byte
MSDU	MAC Service Data Unit
NWK	NetWorK
OQPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OVF	Over Flow
PA	Power Amplifier
PC	Personal Computer
PHR	PHY Header
PHY	Physical layer, laitteen fyysinen taso
PPDU	PHY Protocol Data Unit
PSDU	PHY Service Data Unit
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RFI	Radio Frequency Interference
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RP-SMA	Reverse Polarity-SMA
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RVE	Reference Voltage Error
SHR	Synchronization Header
SIFS	Short Inter Frame Space
SMA	Sub Miniature version A, radiotekniikassa käytetty koaksiaalikaapelin liitintyyppi
SPI	Serial Peripheral Interface
USART	Universal Serial Asyncronous Receiver Transmitter
USB	Universal Syncronous Bus
WPAN	Wireless Personal Area Network
XBee	ZigBee-moduuli
XOR	Exclusive OR
Zigbee radiotekniikka	IEEE 802.15.4 standardiin pohjautuva lyhyen kantaman
µC	Mikrokontrolleri

1 JOHDANTO

Langallisten mittalaitteiden käyttö pyörivän akselin vääntömomentin mittauksessa edellyttää voimansiirtoon lisättävää väliakselia. Väliaikaisissa mittaustarkoituksissa langallisen järjestelmän käyttö ja asennus on hankalaa. Tarvitaan helposti asennettava laitteisto mekaanisten vääntömomenttien mittaamiseen. Työssä suunnitellaan langaton vääntömomentin mittausjärjestelmä. Mittauslaitteisto suunnitellaan siten että se voidaan kiinnittää ilman väliakselia. Mittausjärjestelmällä saatujen mittaustulosten avulla voidaan tutkia kuinka hyvin teoreettisilla simulaatiomalleilla pystytään simuloimaan vääntömomentin huippuarvoja sekä järjestelmässä esiintyviä mekaanisia värähtelyjä. Päätavoitteet työlle ovat langattoman mittausjärjestelmän kehitys ja testaus sekä suunnittelu- ja testausvaiheessa mahdollisesti ilmenevien ongelmatilanteiden ratkaiseminen ja varmentaminen. Yleisesti käytössä olevien akselille liimattavien venymäliuskojen sijaan työssä sovelletaan valmista venymäliuskamittasiltapantaa ja sille suunniteltua vahvistinta. Työn ensimmäisessä kappaleessa esitellään ja asetetaan järjestelmän reunaehdot. Lisäksi esitellään järjestelmän toiminnallisuuden jakautuminen eri toimilohkoille. Toisessa kappaleessa mitoitetaan venymäliuskamittasilta sekä mittasiltavahvistin. Lisäksi arvioidaan järjestelmän mittausepävarmuus. Kolmannessa kappaleessa esitetään mittausjärjestelmän toiminnallisuus. Yhtenä isona järjestelmän osakokonaisuutena työssä tutkitaan ja sovelletaan teollisuusolosuhteisiin sopivaa ja sovelluksen asettaman kaistanleveysvaatimuksen täyttävää ZigBee-radiotekniikkaa. Radiotekniikan soveltuvuus varmennetaan järjestelmän suorituskykymittauksien yhteydessä. Kaikkien sulautettujen järjestelmien tavoin suunniteltava mittausjärjestelmä käsittää niin fyysisen kuin myös ohjelmallisen laitesuunnitteluosan. Molemmat osakokonaisuudet esitellään kolmannessa kappaleessa. Neljäs kappale käsittää järjestelmän suorituskykymittaukset. Järjestelmän suorituskykyä tutkitaan mm. vertailumittauksin. Viides kappale sisältää yhteenvedon työstä.

1.1 Järjestelmän tekninen määrittely

Järjestelmän suunnittelun lähtökohtana pidetään sovelluskohteesta tiedossa olevia parametreja, joiden puitteissa mittausjärjestelmän tulee toimia. Prototyyppi

rakennetaan siten että mittalaitteistoa on mahdollisuus käyttää mahdollisimman pienillä muutoksilla myös terästeollisuudessa käytettävän viisinapaparisen (600 RPM) 3-vaihemoottorin (3,1 kV / 599 A / 2450 kW) akselin vääntömomentin mittaamisessa. Tässä työssä esitettävät mittaukset suoritetaan Lappeenrannan teknillisen yliopiston tehoelektroniikan laboratoriossa. Mittauksissa käytetään kaksinapaparista (400 V / 193 A /110 kW) taajuusmuuntajaohjattua 3-vaiheinduktiomoottoria. Taulukkoon 1 on koottu keskeisiä mittausjärjestelmälle asetettuja reunaehtoja. Lisäksi taulukkoon 2 on listattu mittausjärjestelmän kiinnitykseen ja digitaaliseen tiedonsiirtoon liittyviä keskeisiä parametreja.

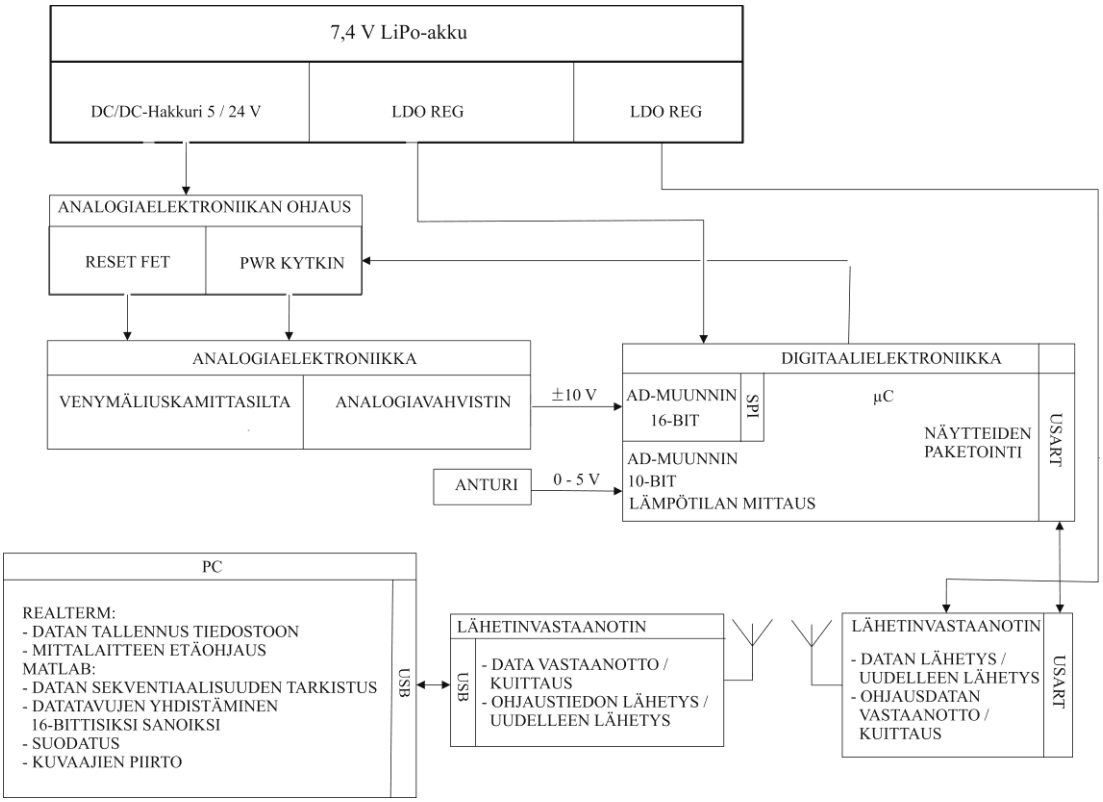
Taulukko 1. Mittausjärjestelmälle asetettuja teknisiä vaatimuksia.

Järjestelmän teknisiä reunaehtoja	
Vääntömomenttialue	± 700 Nm
Toimintalämpötila	20 - 60 °C
Toiminta-aika	min. 8 h
Näytteistystaajuus	1 kHz
Näytteiden koko	16-bittiä
Mittaustiedon käsittely	PC
Tiedonsiirtotapa (Lähetin- Vastaanotin)	Langaton, RF
Järjestelmän etäohjaus	Langaton, RF
Lämpötilan mittaus	10 bittiä
Kaistanleveys	> 16 kb/s
Yksinkertainen mukautettavuus	

Taulukko 2. Mittausjärjestelmän parametreja.

Järjestelmän parametreja	
Akselin pyörimisnopeus	1500 RPM
Akselin halkaisija	80 mm
Vapaatila akselilla	165 mm
Liikennetyyppi (RF-linkki)	Half-duplex
Liityntärajapinnat:	
A/D-muunnin - µC	SPI
µC - RF-moduuli	USART (8, N, 1) 115,2 kb/s
RF-moduuli - PC	USB (sarjaliikenne emul.) (8, N, 1) 57,6 kb/s

Taulukosta 2 nähdään eri digitaalielektroniikka osioiden väliset tiedonsiirtorajapinnat. Kuvassa 1 on esitetty mittausjärjestelmän periaatteellinen lohkokaavio sekä eri lohkoihin sijoittuva toiminnallisuus.



Kuva 1. Mittausjärjestelmän lohkokaavio sekä eri lohkoihin sijoittuva toiminnallisuus.

Mittausjärjestelmäprototyyppi rakennetaan mahdollisuuksien rajoissa markkinoilta löytyvistä valmiista elektroniikkamoduuleista. Tällöin pystytään varmistamaan

laitteiston toimintavarmuus sekä lyhentämään suunnitteluun kuluvaa aikaa. Valmiiden elektroniikkamoduulien etu on niiden tarjoamat valmiit selkeät liityntärajapinnat, jolloin moduulit valitaan siten että moduulien välillä on yhteensopivat tiedonsiirtoprotokollat. Tyypillisesti moduulit testataan tehtaalla kokoonpanon jälkeen, jolloin toimintavarmuus edelleen paranee. On huomioitavaa että moduulirakenteen ansiosta ongelma- tai rikkoutumistilanteessa järjestelmä tarvitsee uusia tai korjata vain viallisen moduulin osalta. Joillekin järjestelmän osille joudutaan kuitenkin suunnittelemaan ja piirtämään piirilevy. Kyseistä piirilevyä kutsutaan tässä työssä oheiskomponenttilevyksi, sillä sille sijoitetaan kaikkien valmiiden elektroniikkamoduulien toimintaa tukevat komponentit. Akselin koon vaihtuessa, tarvitsee vaihtaa vain kiinnityslaippaparit sekä venymäliuskamittasilta. Mittausdatan käsittely keskitetään mahdollisimman laajalti vastaanottopään PC:lle (Personal Computer), jolloin järjestelmän ohjelmalliset muutokset ovat helposti tehtävissä. Työssä arvioidaan myös järjestelmään kohdistuvia mekaanisia rasituksia.

2 MITTAUSEPÄVARMUUDEN ARVIOINTI

Tässä kappaleessa arvioidaan laskennallisesti mittausjärjestelmän mittausepävarmuus. Mittalaitteen ja mittalaitteella suoritettujen mittausten kannalta mittausepävarmuus on yhtä tärkeä tieto kuin itse mittaustulos. Ilman tietoa vallitsevista mittausepävarmuusrajoista mittaustulos on hyödytön.

Mittausepävarmuus on mittaustulokseen liittyväarvo, joka ilmoittaa rajat joiden välillä mitatun suureen arvo tietyllä todennäköisyydellä on [Aaltonen K, 2002].

Työssä arvioidaan mittausjärjestelmän absoluuttista mittausepävarmuutta. Mittausepävarmuuden arviointi perustuu useasti tilastollisiin menetelmiin. Käytännössä jonkin mittalaitteen mittausepävarmuuden määrittämiseen tarvitaan vähintään kymmenen kertaa tarkempi mittalaite. tällöin saatujen tulosten perusteella mittalaite voidaan kalibroida. Työssä arvioidaan järjestelmän mittausepävarmuutta matemaattisin menetelmin, jotka pohjautuvat komponenttivalmistajilta saatuihin tietoihin. Komponenttikohtaisten virherajojen määritystapa ei ole tiedossa. Laskelmissa komponenttien epävarmuusrajojen oletetaan olevan absoluuttisia, jolloin komponenteista, joiden absoluuttiset epävarmuusrajat ovat tiedossa, rakennetun järjestelmän epävarmuusrajojen oletetaan niin ikään olevan absoluuttisia.

2.1 Venymäliuskamittasillan ja mittasiltavahvistimen mitoitus

Venymäliuskamittasillan venymäliuskoissa esiintyvän suhteellisen venymän arvioiminen mahdollistaa järjestelmän tarkan mitoituksen. Oikealla mitoituksella saadaan järjestelmän dynaamiset ominaisuudet hyödynnettyä mahdollisimman hyvin. Tällöin esimerkiksi A/D-muuntimen tuloalue saadaan mahdollisimman hyvin käyttöön. Mitattavassa suuressa tapahtuvat ilmiöt havaitaan myös mahdollisimman tarkasti. Toisaalta myös mitta-alueen riittävyys voidaan varmistaa, tällöin ei tapahdu mitta-signaalin kyllästymistä vaan kaikki ilmiöt pysyvät mittalaitteen lineaarisella toiminta-alueella.

Tiedetään että suhteellinen venymä saadaan jännityksen ja materiaalille ominaisen kimmomoduulin suhteesta yhtälön 1 mukaisesti

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\mathrm{E}} \tag{1}$$

missä on σ jännitys sekä E materiaalin kimmomoduuli. Jännitystä σ merkitään akselin tapauksessa τ_{max}, joka on jännitys akselin pinnalla. τ_{max} lasketaan yhtälön 2 mukaan

$$\tau_{max} = \frac{T}{W_{\mathrm{v}}} \tag{2}$$

missä T on akseliin kohdistuva vääntömomentti sekä W_{v} vääntövastus. W_{v} on yhtälön 3 mukaan

$$W_{\mathrm{v}} = \frac{\pi \cdot D^3}{16} \tag{3}$$

Missä D on akselin halkaisija. Sijoittamalla yhtälö 3 yhtälöön 2 ja edelleen yhtälö 2 yhtälöön 1, saadaan

$$\varepsilon = \frac{T \cdot 16}{\pi \cdot D^3 \cdot \mathrm{E}} \tag{4}$$

Sijoittamalla tiedossa olevat arvot $T = 700$ Nm, $D = 0{,}08$ m sekä $\mathrm{E} = 210 \cdot 10^9$ Pa saadaan

$$\varepsilon = \frac{700\ \mathrm{Nm} \cdot 16}{\pi \cdot (0{,}08\ \mathrm{m})^3 \cdot\ 210 \cdot 10^9\ {}^{\mathrm{N}}/_{\mathrm{m}^2}} = 0{,}0000332$$

suhteellinen venymä ilmoitetaan με (mm/m), joka saadaan kertomalla yhtälöllä yksi laskettu tulos miljoonalla, jolloin saadaan

$$0{,}0000332 \cdot 1 \cdot 10^6 = 33.2\ \mu\varepsilon$$

Tulos on suhteellinen venymä puolelleen väännöttömästä tilasta.

Mittasiltavahvistimen datalehden mukaan valitaan tarjolla olevista mittasiltavahvistimista 350 με vahvistin, joka on mahdolliset jatkoprojektit huomioiden sopiva molempiin. Kyseisellä vahvistimella saadaan 350 με venymästä aiheutuvasta jännitteestä 10 V lähtöjännite. Vahvistimen lähtöjännitealue on ± 10 V

[DABU-AD2T-2Q Datasheet], [suhteellinen venymä, 2008], [suhteellinen venymä, 2009], [Aalto J, 2002]. Lasketaan kuinka suurta vääntömomenttia 350 με vastaa

$$T = \frac{\varepsilon \cdot \pi \cdot D^3 \cdot E}{16} = 7389{,}03 \text{ Nm} \approx 7{,}4 \text{ kNm} \tag{5}$$

Noin 7,4 kNm vääntömomentilla saadaan mittasiltavahvistimen lähtöjännitteeksi 10 V [DABU-AD2T-2Q Datasheet], [DABU-AD2T-2Q Instruction manual], [DSRC-AX Datasheet], [DSRC-AX Installation manual].

2.2 Järjestelmän mittausepävarmuus

Mittausjärjestelmän mittaustarkkuuteen ja mittausepävarmuusrajoihin vaikuttavat akselin fyysiset ominaisuudet, mittasillan epävarmuustekijät, mittasiltavahvistimessa syntyvä mittausepävarmuus sekä A/D-muuntimen mittausepävarmuus. Lasketaan kuinka suuri suhteellinen venymä mittasillan venymäliuskoihin kohdistuu tapauksessa, jossa oletettu vääntömomentti on 7,4 kNm. Mitta-alue on kaksipuolinen eli kyseinen vääntömomentti voi vaikuttaa molmepiin suuntiin.

Mittausjärjestelmällä mitatun suureen arvo voi sisältää poikkeamaa varsinaisesta suureen arvosta. Poikkeamaa mittaustuloksen ja todellisen suureen arvon välille aiheuttaa muun muassa komponenttien hajonta, toleranssit dimensioissa sekä muuttuvat mittausolosuhteet esimerkiksi lämpötila. Osa poikkeaman aiheuttajista voidaan kompensoida, koska niiden käyttäytyminen on tiedossa. Kompensoitavissa olevaa poikkeamaa nimitetään virheeksi. Osaa poikkeaman aiheuttajista ei voida kompensoida, mutta niiden vaikutusta järjestelmään voidaan arvioida tilastollisiin menetelmiin perustuvien tutkimusten pohjalta. Jokaiselle suureelle voidaan määrittää epävarmuusrajat, joiden sisällä suureen arvo mitä todennäköisimmin on. Arvioitavan järjestelmän tapauksessa mittausepävarmuus koostuu kolmesta osatekijästä. Osatekijät ovat akselin parametrien hajonnasta johtuva mittausepävarmuus, venymäliuskamittasillasta ja mittasiltavahvistimesta johtuva mittausepävarmuus sekä signaalin digitalisoinnista aiheutuva mittausepävarmuus. Osatekijät oletetaan toisistaan riippumattomiksi. Arvioidaan järjestelmän mittausepävarmuus *Worst-case-*

tapauksena. Eli oletetaan että kaikki epävarmuustekijät vääristävät mittaustulosta samaan suuntaan mitatun suureen todellisesta arvosta [Strain Gages].

2.2.1 Akselin ominaisuuksista aiheutuva mittausepävarmuus

Hajonta akselin halkaisijassa sekä nuorrutusteräksen kimmomoduulissa aiheuttavat mittausepävarmuutta. Hajonnat aiheuttavat epävarmuustekijän suhteelliseen venymään. Akselin halkaisija ilmoitetaan 0,1 mm:n tarkkuudella. Tiedetään että akselin halkaisijan hajonta on $\pm$ 0,05 mm, $\Delta D = 5 \cdot 10^{-5}$ m, sekä nuorrutusteräksen kimmomoduulin hajonta on ± 0,5 GPa, $\Delta E = 5 \cdot 10^{8}$ Pa. Akselin parametreistä aiheutuva vääntömomentin mittausepävarmuus saadaan osittaisderivoimalla yhtälö 5. Osittaisderivointi suoritetaan yhtälön 6 mukaisesti

$$\Delta T = \left|\frac{\vartheta T}{\vartheta D}\right| \cdot \Delta D + \left|\frac{\vartheta T}{\vartheta E}\right| \cdot \Delta E + \left|\frac{\vartheta T}{\vartheta \varepsilon}\right| \cdot \Delta \varepsilon \tag{6}$$

Koska virheen suuruus lasketaan 350 με suhteelliselle venymälle, supistuu yhtälö muotoon

$$\Delta T = \left|\frac{\vartheta T}{\vartheta D}\right| \cdot \Delta D + \left|\frac{\vartheta T}{\vartheta E}\right| \cdot \Delta E$$

Jolloin derivoimalla saadaan

$$\Delta T = \left|\frac{350 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 210 \cdot 10^{9}\ \mathrm{Pa} \cdot 3 \cdot 0{,}08^{2}\ \mathrm{m}^{2}}{16}\right| \cdot 5 \cdot 10^{-5}\mathrm{m} + \left|\frac{350 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 0{,}08^{3}\ \mathrm{m}^{3}}{16}\right| \cdot 5 \cdot 10^{8}\ \mathrm{Pa}$$

$$\Delta T = \pm 31{,}5\ \mathrm{Nm}$$

Yhtälöstä 5 nähdään että akselin ominaisuuksien toleranssista aiheutuva mittausepävarmuus on lineaarisesti riippuvainen akseliin vaikuttavasta vääntömomentista. Jos suhteellinen venymä on nolla, jolloin mittausepävarmuus on niin ikään nolla. Mittasiltavahvistimessa on venymäliuskamittasillan nollaustoiminto (Reset), jolla asetetaan venymäliuskamittasillan vertailupiste. Resetoinnilla poistetaan mittasillan asennuksesta aiheutunut venymäliuskojen esijännitys (offset).

Akselin parametreista aiheutuvaa mittausepävarmuutta nimitetään vääntömomentista riippuvaksi mittausepävarmuudeksi.

2.2.2 Mittasillan- ja mittasiltavahvistimen mittausepävarmuusrajat

Tiedetään että mittasillan ja mittasiltavahvistimen mittausepävarmuus on < 1 % mittasiltavahvistimen lähdön jännitealueesta. Mittasiltavahvistimen Lähtöjännitealue on 0 - 10 V [Strain Gages]. Mittasiltavahvistimen mittausepävarmuus on sisällytetty mittasillan mittausepävarmuuteen. Näin ollen vahvistimen lähdön huippuarvosta saadaan analogiaosan mittausepävarmuusrajat yhtälön 7 mukaisesti.

$$U_{Eanalog} = U_{max} \cdot 0{,}01 \tag{7}$$

jolloin mittausepävarmuus lähtöjännitteessä on

$$10\ \mathrm{V} * 0.01 = 100\ \mathrm{mV}$$

Analogiaelektroniikkaosan mittausepävarmuus on ± 100 mV. Lisäksi tiedetään että 7400 Nm vääntömomentti tuottaa mittasiltavahvistimen lähtöön 10 V:n jännitteen. Yhtälön 8 verrannosta saadaan

$$\Delta T_{ANALOG} = \frac{U_{Eanalog} \cdot T_{max}}{U_{max}} \tag{8}$$

Missä $U_{Eanalog}$ on mittasiltavahvistimen lähdön jännitteen mittausepävarmuus. Ratkaistaan analogiaelektroniikkaosassa syntyvä mittausepävarmuus sijoittamalla arvot yhtälöön 8

$$\Delta T_{ANALOG} = 0{,}01 \cdot 7{,}4\ \mathrm{kNm} \approx 74\ \mathrm{Nm}$$

Analogiaelektroniikkaosan mittausepävarmuudeksi saadaan 74 Nm. Mittasillasta aiheutuva mittausepävarmuustekijän suuruus on riippumaton mitattavan suureen arvosta.

2.2.3 A/D-muuntimen mittausepävarmuus

ADS-7813 on 16-bittinen A/D-muunnin, jonka sisääntulo voidaan kytkeä toimimaan bi-polaarisena, jolloin sisääntulomitta-alue on $\pm$ 10 V.[ADS-7813 Datasheet]

A/D-muuntimen resoluutio on tulojännite jaettuna A/D-muuntimen jännitetasojen määrällä. Yhtälön 9 mukaisesti

$$LSB = \frac{U_{\mathrm{in}}}{(2^{b_{\mathrm{ADC}}}-1)} \tag{9}$$

missä U_{in} on A/D-muuntimen tulojännitealue sekä b_{ADC} A/D-muuntimen bittien määrä. Sijoittamalla tulojännitealue yhtälöön 9 saadaan A/D-muuntimen kvantisointiepävarmuus.

$$LSB = \frac{20\ \mathrm{V}}{(2^{16}-1)} \approx 305\ \mu\mathrm{V}$$

Yksi LSB (Least Significant Bit) vastaa 305 µV jännitealuetta. A/D-muuntimessa syntyvien epävarmuuksien suuruus ilmoitetaan suhteessa kvantisointiepävarmuuteen, eli LSB:iin. A/D-muuntimen mittausepävarmuutta laskettaessa syntyvä epävarmuus koostuu kahdesta pääkomponentista. Lineaarisuusepävarmuudesta ILE (InLinearity Error) sekä kvantisointiepävarmuudesta (Differential Linearity Error). Lisäksi epävarmuussummaan voidaan liittää käyttöjännitetason vaihtelusta aiheutuva referenssijännite-epävarmuus RVE (Reference Voltage Error).

ADS-7813:n lineaariepävarmuuden suuruus on $\pm$ 2 LSB, kvantisointiepävarmuus $\pm$ 2 LSB sekä RVE $\pm$ 12 LSB. RVE pätee mikäli, A/D-muuntimen käyttöjännite on välillä 4,75 - 5,25 V. Kokonaismittausepävarmuus saadaan yhtälön 10 mukaan, jolloin mittausepävarmuustekijöiden oletetaan olevan toisistaan riippumattomia.

$$\Delta_{TOTAL} = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 \ldots + \Delta_n^2} \tag{10}$$

A/D-muuntimen tapauksessa sijoittamalla epävarmuustekijät yhtälöön 10 saadaan A/D-muuntimesta aiheutuva mittausepävarmuus

$$\Delta_{ADC} = \sqrt{ILE^2 + DLE^2 + RVE^2} \tag{11}$$

Tällöin A/D-muuntimessa syntyvä mittausepävarmuus on

$$\Delta_{\mathrm{ADC}} = \sqrt{(2 \cdot 305\ \mu\mathrm{V})^2 + (2 \cdot 305\ \mu\mathrm{V})^2 + (12 \cdot 305\ \mu\mathrm{V})^2} \approx 3760\ \mu\mathrm{V}$$

Nyt muistettaessa että maksimi mittasiltavahvistimen lähtöjännitteen aikaan saamiseksi tarvitaan normaalilämpötilassa 7,4 kNm vääntömomentti, joka vastaa 350 $\mu\varepsilon$ suhteellista venymää. Koska mitta-alue on kaksisuuntainen, vääntömomenttialue on

$$T = 2 \cdot 7{,}4 \cdot 10^3\ \mathrm{Nm} = 14{,}8 \cdot 10^3\ \mathrm{Nm}$$

A/D-muuntimen mittausepävarmuus tuloalueeseen suhteutettuna on

$$\frac{3760 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{V}}{20\ \mathrm{V}} \cdot 100\ \% = 0{,}0188\ \%$$

Tällöin A/D-muuntimen mittausepävarmuudeksi saadaan

$$\Delta_{\mathrm{ADC}} = 14{,}8 \cdot 10^3\ \mathrm{Nm} \cdot 0{,}0188\ \% \approx 2{,}78\ \mathrm{Nm}$$

A/D-muunnin aiheuttaa mittaustulokseen n. $\pm$ 2,78 Nm mittausepävarmuuden. A/D-muuntimen epävarmuus on riippumaton mitatun suureen arvosta.

2.2.4 Mittausjärjestelmän kokonaisepävarmuuden arviointi

Jokaisen järjestelmäosan aiheuttama mittausepävarmuus oletetaan toisista mittausepävarmuuslähteistä riippumattomaksi, jolloin kokonaisepävarmuus saadaan yhtälön 10 mukaan. Sijoittamalla edellä lasketut mittausjärjestelmässä syntyvät vääntömomenttiepävarmuudet yhtälöön 12, saadaan järjestelmän kokonaismittausepävarmuudeksi 7,4 kNm vääntömomentilla

$$\Delta \mathrm{T}_{\mathrm{TOTAL}} = \sqrt{\Delta^2_{\mathrm{SHAFT}} + \Delta^2_{\mathrm{BRIDGE}} + \Delta^2_{\mathrm{AMP}} + \Delta^2_{\mathrm{ADC}}} \approx \pm 80{,}5\ \mathrm{Nm} \quad (12)$$

Tällöin suhteellinen epävarmuus saadaan yhtälön 13 mukaan

$$\Delta \mathrm{T}_{\mathrm{MAX}} = \frac{\Delta \mathrm{T}_{\mathrm{TOTAL}}}{\mathrm{T}_{\mathrm{MAX}}} \tag{13}$$

Jolloin suhteellinen mittausepävarmuus mittaustuloksessa on

$$\Delta \mathrm{T}_{\mathrm{MAX}} = \frac{80{,}5\ \mathrm{Nm}}{7{,}4 \cdot 10^3\ \mathrm{Nm}} \cdot 100\ \% \approx 1{,}09\%$$

Epävarmuusrajat lasketaan yhtälöllä 14, joka käsittää vääntömomentista riippuvan sekä riippumattomat mittausepävarmuustekijät.

$$\Delta T_{TOTAL} = \sqrt{\Delta T(T)^2_{AKSELI} + \Delta T^2_{ANALOGIA} + \Delta T^2_{ADC}} \tag{14}$$

Missä $\Delta T(T)^2_{AKSELI}$ on akselin materiaalisesta sekä dimensionaalisesta poikkeamasta aiheutuva mittausepävarmuus. Kuten aiemmin todettiin, akselin parametreista aiheutuva vääntömomentista riippuvainen mittausepävarmuus on suoraan verrannollinen venymäliuskojen suhteelliseen venymään. Vääntömomentista riippuvan mittausepävarmuus lasketaan yhtälöllä 15. Lisäksi tiedetään että n. 7,4 kNm vääntömomentilla saavutetaan 350 $\mu\varepsilon$ suhteellinen venymä.

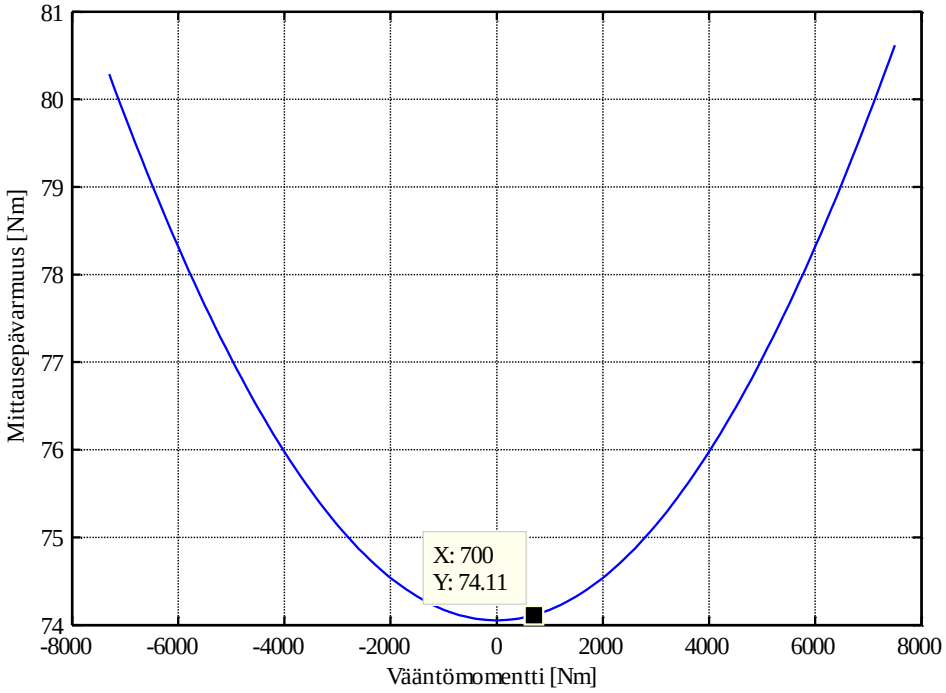
$$\Delta T(T)_{\mathrm{SHAFT}} = \left| \frac{\frac{\varepsilon_{\mathrm{MAX}}}{\mathrm{T}_{\mathrm{MAX}}} \cdot T \cdot \pi \cdot D^{3'} \cdot E}{16} \right| \cdot \Delta D + \left| \frac{\frac{\varepsilon_{\mathrm{MAX}}}{\mathrm{T}_{\mathrm{MAX}}} \cdot T \cdot \pi \cdot D^{3} \cdot E'}{16} \right| \cdot \Delta E \tag{15}$$

Sijoittamalla arvot lasketaan vääntömomentin arvosta riippuvainen mittausepävarmuustekijä

$$\Delta T(T)_{SHAFT} = \left| \frac{\frac{350 \cdot 10^{-6}}{7{,}4 \cdot 10^3\ \mathrm{N}} \cdot T \cdot \pi \cdot 3 \cdot 0{,}08^2\ \mathrm{m}^2 \cdot 210 \cdot 10^9\ \mathrm{Pa}}{16} \right| \cdot 5 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{m}$$

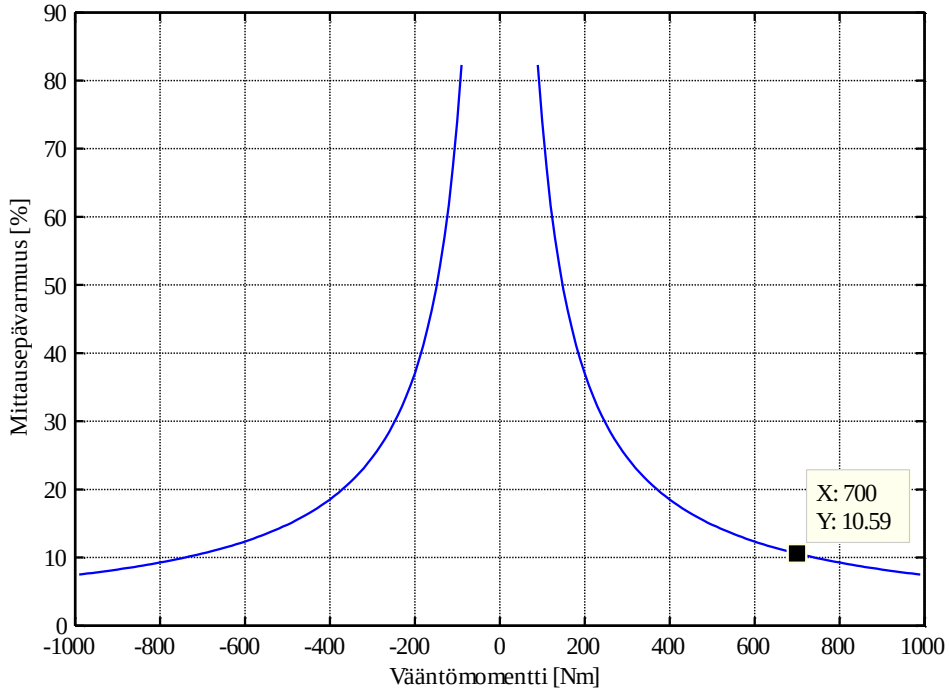
$$+ \left| \frac{\frac{350 \cdot 10^{-6}}{7{,}4 \cdot 10^3\ \mathrm{N}} \cdot T \cdot \pi \cdot 0{,}08^3\ \mathrm{m}^3}{16} \right| \cdot 5 \cdot\ 10^8\ \mathrm{Pa}$$

Suurin yksittäinen mittausepävarmuustekijä on vääntömomentista riippumaton analogiaelektroniikkaosassa syntyvä mittausepävarmuus. Tästä syystä pieniä vääntömomentteja mitattaessa itse mittaustulos peittyy mittausepävarmuuden alle. Kuvassa 2 on esitetty absoluuttinen mittausepävarmuus vääntömomentin funktiona.



Kuva 2. Mittausepävarmuus vääntömomentin funktiona.

Kuvasta 2 nähdään että mittausepävarmuus on riippumaton vääntömomentin suunnasta. Kuvan mukaan testauslaitteiston nimellisvääntömomentilla esiintyvä mittausepävarmuus on n. ± 74,1 Nm. Kuvassa 3 on esitetty vääntömomentin prosentuaalinen mittausepävarmuus.



Kuva 3. Vääntömomentin prosentuaalinen mittausepävarmuus.

Kuvan 3 perusteella voidaan sanoa että suhteessa vääntömomenttiin ja sitä kautta mittaustulokseen, mittausepävarmuus on suurin pienillä vääntömomentin arvoilla. Tämä aiheutuu siitä että mittausepävarmuus koostuu pääasiallisesti vääntömomentista riippumattomasta mittausepävarmuuskomponentista. Kuvan perusteella voidaan todeta myös että mittausjärjestelmän testipenkin koneen nimellisellä vääntömomentilla mittausepävarmuus on n. 10,6 % vääntömomentista. Tällöin vääntömomenttin mittausarvon on oltava välillä 620 - 780 Nm.

On huomioitavaa että arvioitu mittausepävarmuus on suurin mahdollisesti järjestelmässä esiintyvä mittausepävarmuus. Mikäli mittausepävarmuutta aiheuttavat muuttujat eroavat odotusarvoistaan eri suuntiin, kumoavat epävarmuustekijät toisiaan. Todellisia parametriarvoja ei kuitenkaan koskaan tiedä ilman tapauskohtaisia mittauksia. Vaikka A/D-muuntimen aiheuttama mittausepävarmuus on pientä suhteessa muihin epävarmuutta aiheuttaviin tekijöihin, voidaan mittausepävarmuutta A/D-muuntimen osalta pienentää esimerkiksi vaihtamalla ADS-7813 A/D-muunnin ADS-8513 muuntimeen, joka on suoraan yhteensopiva pinnijärjestykseltään ja toimintatavaltaan ADS-7813 kanssa. Tällöin A/D-muuntimen mittausepävarmuus pienenisi noin kolmasosaan nykyisestä arvosta.

3 MITTAUSJÄRJESTELMÄN TOTEUTUS

Tässä kappaleessa esitetään järjestelmäprototyypin toteuttamiseen kuuluvat osakokonaisuudet. Aluksi arvioidaan laskennallisesti mittausjärjestelmän kiinnipitämiseen tarvittavat tukivoimat. Seuraavaksi varmistetaan laskennallisesti radioprotokollan soveltuvaisuus käyttökohteeseen sekä perehdytään radiomoduulien keskeisiin ominaisuuksiin.

Tarkasteltavia osakokonaisuuksia ovat:

- Keskeisimmät suorituskykylaskelmat, joiden avulla varmennetaan järjestelmän toimivuus riittävällä nopeudella.
- Mikrokontrollerille implementoitu toiminnallisuus.
- Tiedonsiirrossa käytettävät väyläprokollat.
- Mikrokontrollerin ja radiomoduulin ohjelmoinnit.
- Mittausjärjestelmän tehonkulutuksen arviointi.
- Häiriön suojaus koteloinnilla.
- Mittaustiedon tallennus ja käsittely.

3.1 Kiinnityslaippojen lujuuslaskenta

Mittausjärjestelmän elektroniikkamoduulit kiinnitetään kiinnityslaipoilla mitattavan laitteen akseliin. Kiinnityslaippamateriaalina käytetään 15 mm paksua polyasetaattilevyä. Liitteessä 1 on esitetty 80 mm akselille mitoitetut kiinnityslaipat. Lasketaan kiinnityslaipoilta edellytettävät tukivoimat Newtonin toisen lain (dynamiikan peruslaki) mukaan

$$F = m \cdot \bar{a} \tag{16}$$

missä m on kappaleen massa sekä $\bar{a}$ kappaleen kiihtyvyys. Ympyrän kehälle kiinnitetyn tasaisella nopeudella liikkuvan kappaleen normaalikiihtyvyys lasketaan yhtälön 17 mukaisesti

$$\bar{a}_{\mathrm{n}} = \frac{v^2}{r} \tag{17}$$

missä v kehänopeus sekä r kappaleen kiertämän kehän säde. Tällöin tasaisella kehänopeudella liikkuvan kappaleen kiinni pitämiseksi tarvittava vähimmäistukivoima lasketaan yhtälöllä 18

$$F_n = \mathrm{m} \cdot \frac{v^2}{r} \tag{18}$$

Lisäksi tiedetään, että ympyrän kehän pituus saadaan yhtälön 19 mukaan

$$P = \pi \cdot D \tag{19}$$

Missä D on ympyrän halkaisija. Kehänopeus saadaan kertomalla kehän pituus kierrosnopeudella yhtälön 20 mukaan

$$v = P \cdot rps \tag{20}$$

Missä rps on akselin kierrosmäärä sekunnissa. Kun tiedetään akselin kierrosmäärä minuuttia kohden, saadaan kierrosmäärä sekuntia kohden yhtälön 21 mukaan

$$rps = \frac{RPM}{60} \tag{21}$$

Missä RPM on kierrosmäärä minuutissa. Tiedetään, että testilaitteiston moottorin akseli pyörii nopeimmillaan 1500 kierrosta minuutissa, tällöin sijoittamalla minuuttikierrosnopeus yhtälöön 21 saadaan

$$rps = \frac{1500}{60\ \mathrm{s}} = 25/\mathrm{s}$$

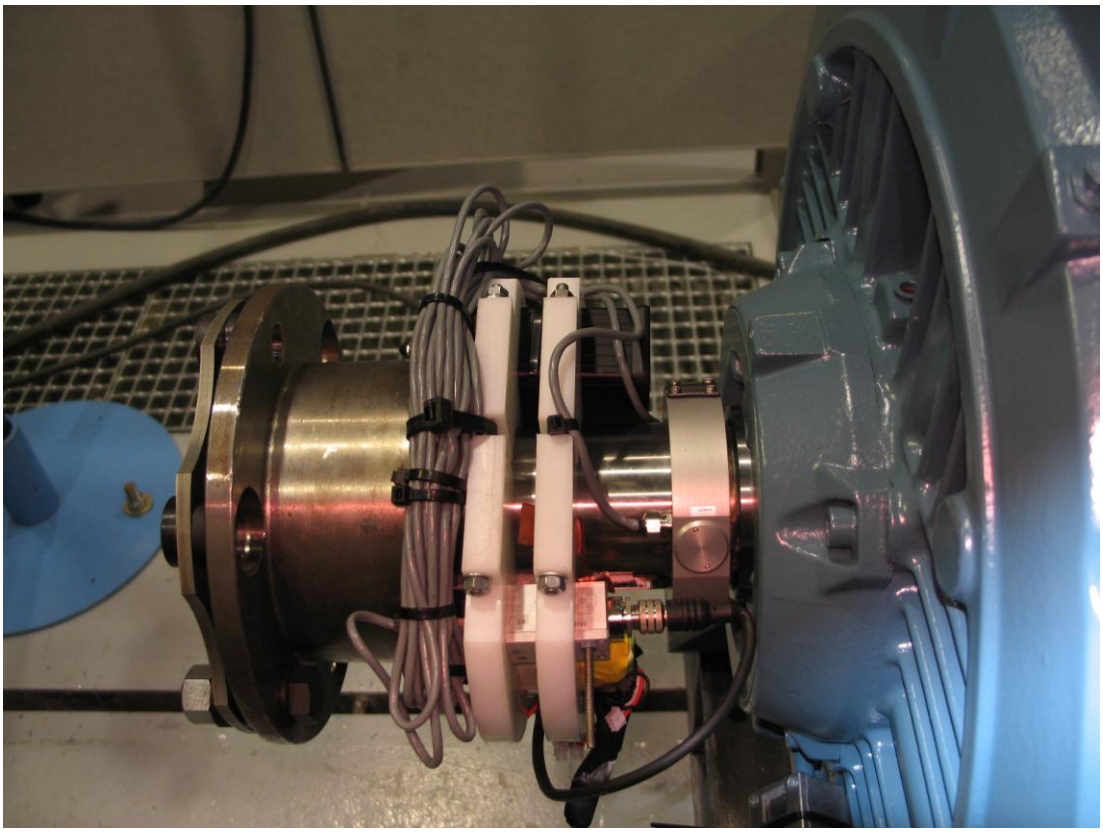
25 kierrosta sekunnissa. Kehänopeus saadaan sijoittamalla tulos yhdessä yhtälön 19 kanssa yhtälöön 20, jolloin laskettaessa kiinnityslaippapareihin kohdistuvia voimia, halutaan tietää kappaleiden massakeskipisteiden kehänopeus. Arvioidaan että massakeskipisteet sijaitsevat 2,5 cm akselin pinnasta. Tällöin massakeskipisteen kehänopeus on

$$v = 2 \cdot \pi \cdot 0{,}065\ \mathrm{m} \cdot \frac{25}{\mathrm{s}} \approx 10{,}2 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Kiinnityslaippaparien lujuuslaskennassa käytettävien massakeskipisteiden kehänopeus on 10,2 m/s. Samalla tavalla lasketaan moottorin akselin pinnan kehänopeus, joka on suurimmillaan 6,3 m/s. Elektroniikkamoduulien kiinnipitämiseen tarvittavat tukivoimat lasketaan yhtälön 18 mukaan

$$F_n = m \cdot \frac{(10{,}2\ \mathrm{m/s})^2}{0{,}065\ \mathrm{m}}$$

Mittausjärjestelmän osasijoittelu toteutetaan siten että mittasiltavahvistin sekä LiPo-akku (Lithium Polymeeri) sijoitetaan samaan kiinnityslaippaan sekä vastaavasti digitaalielektroniikkaosa vastakkaiseen laippaan, tällöin moduulien massat jakautuvat akselin keskipisteen suhteen mahdollisimman tasan. Kuvassa 4 on esitetty mittausjärjestelmän kiinnitys mitattavan koneen akseliin. Kuvan alareunassa keskellä edessä näkyy mittasiltavahvistin sekä sen takana samaan kiinnityslaippaan kiinnitetty LiPo-akku (LithiumPolymeeri). Vastakkaisella puolella akselia näkyy digitaalielektroniikkaosio. Venymäliuskamittasiltapanta on sijoitettu aivan moottorin rungon viereen akselin tyveen.



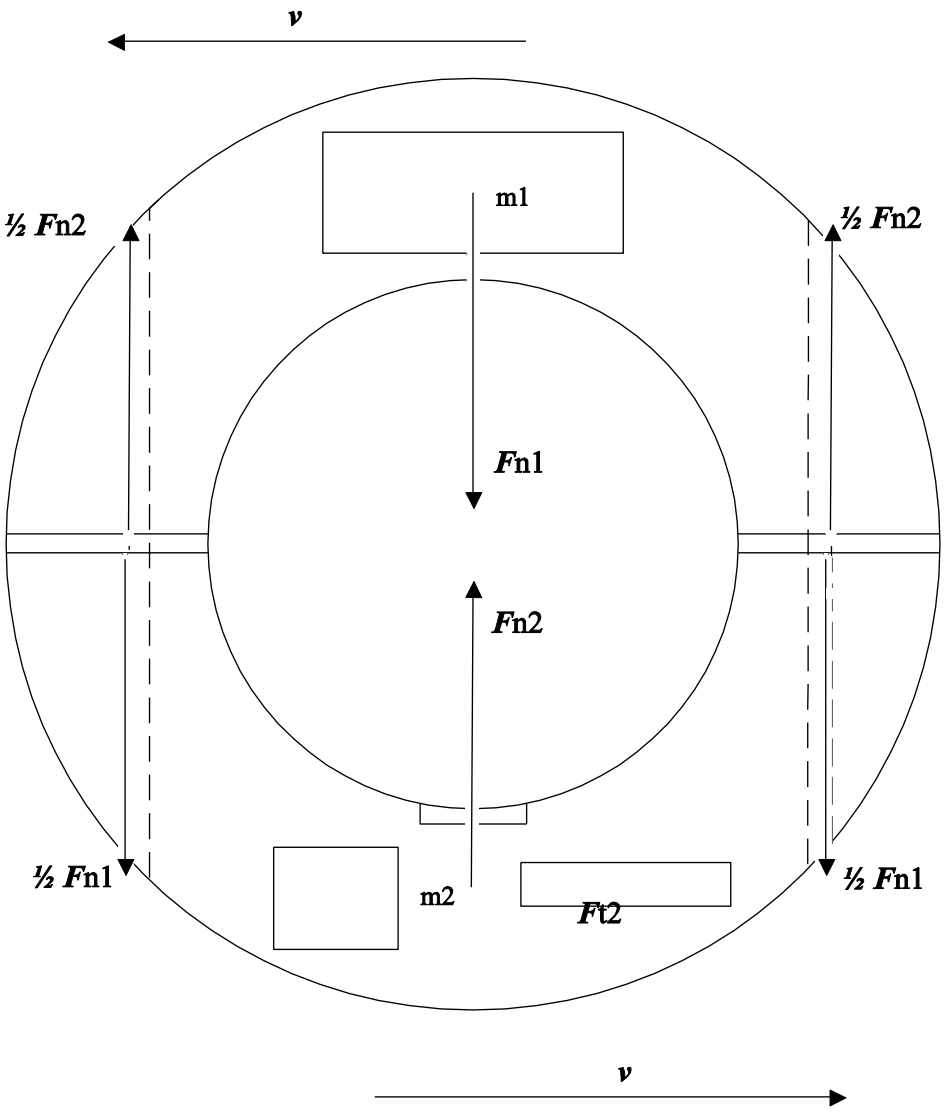
Kuva 4. Mittausjärjestelmän kiinnitys kahdella polyasetaattilaippaparilla taajuusmuuttajaohjatun 110 kW kolmivaiheinduktiomoottorin akselille.

Kuvasta 4 nähdään järjestelmäosien kiinnitykset polyasetaattilaippapareihin. Kuvan tapauksessa mittausjärjestelmän sijoittamiseen tarvittava vapaatila akselilla on n. 14 cm. On huomioitavaa että pienellä järjestelmäosien sijoittelumuutoksella mittausjärjestelmän vaatimaa tilaa akselilla voidaan pienentää. Nostamalla moduulien paikkoja kiinnityslaipoissa hieman kauemmas akselin pinnasta, voidaan venymäliuskamittasilta sijoittaa kiinnityslaippaparien väliin. Tällöin on huomioitavaa että toista laippaparia ei voida lukita akseliin kiilalla. Ratkaisuna on tehdä toiseen tai molempiin mittasiltavahvistimen ja LiPo-akun kiinnityslaippoihin kiilauraan istuva kieleke. Taulukkoon 3 on listattu akselille kiinnitettävien komponenttien massat sekä kappalemäärät mittausjärjestelmässä.

Taulukko 3. Mittausjärjestelmän osakomponenttien massat sekä kappalemäärät.

Kappale	Paino [g]	kpl	yht. [g]
Digitaalielektroniikka + radiolähetin	210	1	210
3000 mAh 7,4 V LiPo-akku	126	1	126
Analogivahvistin - Digitaaliosa välikaapeli	109	1	109
Analogiavahvistin	101	1	101
Venymäliuskamittasilta+ välikaapeli	535	1	535
1/2 kiinnityslaippa digitaalielektr.	167	2	334
1/2 kiinnityslaippa vahvistin+ akku	187	2	374
Epäbalanssi			52
Punnittu: EK-12KA			

Taulukoon 3 on laskettu järjestelmän osasijoittelusta aiheutuva epätasapaino. Tämä tarkoittaa sitä, ettei mittausjärjestelmän massakeskipiste sijaitse akselin pitkittäissuuntaisella keskijanalla. Akselin pyöriessä epätasapaino aiheuttaa tärinää. Epätasapaino voidaan poistaa tasapainottamalla mittausjärjestelmän kiinnityslaipat. Ilmavastuksen aiheuttama voima pois lukien ympyrän kehällä tasaisessa liikkeessä olevaan kappaleeseen kohdistuu vain akselin pinnan normaalin suuntainen voima. Järjestelmä kiinnitetään akseliin kahdella rinnakkaisella laippaparilla. Laippojen rasitusta laskettaessa oletetaan komponenttien massojen jakautuvan tasaisesti molemmille laippapareille, jolloin yhden laipan tukivoimaa laskettaessa laipan oman painon lisäksi voiman suuruuteen vaikuttaa puolet laippaan kiinnitettyjen komponenttien massasta. Laippapari kiristetään akselin pinnalle kahdella M6-kokoisella kierretankotapilla. Suurin rasitus järjestelmässä kohdistuu kierretankoihin, kiristysmuttereihin sekä muttereiden tukipintoihin laipoissa. Järjestelmään kohdistuvien voimien tarkastelun yksinkertaistamiseksi mittausjärjestelmän kiinnitys laippapuolikkaiden massakeskipisteet arvioidaan samalle etäisyydelle akselin pitkittäissuuntaisesta keskijanasta. Kuvassa 5 on esitetty vakionopeutta pyörivään järjestelmään vaikuttavat voimat.



Kuva 5. Tasaisella nopeudella pyöriviin kiinnityslaippapareihin kohdistuva normaalivoima.

Kuvasta 5 nähdään että tarkasteltaessa järjestelmää kierretangon kannalta, molemmat laippaparin puolikkaat aiheuttavat kierretankoihin vastakkaissuuntaiset voimakomponentit. Lasketaan kierretankoihin kohdistuva kokonaisvoima, kun moottorin oletetaan pyörivän 1500 RPM. Siltavahvistimen ja akun kiinnityslaipan aiheuttama voimakomponentti on

$$F_{\mathrm{n\ analog}} = \frac{0{,}414\ \mathrm{kg} \cdot \left(10{,}2 \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)^2}{0{,}065\ \mathrm{m}} \approx 65\ \mathrm{N}$$

sekä digitaaliosan aiheuttama voimakomponentti

$$F_{\text{n digi}} = \frac{0{,}377\ \text{kg} \cdot \left(10{,}2 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0{,}065\ \text{m}} \approx 59\ \text{N}$$

Koska syntyvät voimat ovat vastakkaissuuntaiset, kokonaisvoima on osavoimien summa, silloin kun tarkastelupisteenä on kierretanko. Mikäli tarkastelupisteenä pidetään akselin keskipistettä, voimat kumoavat toisiaan. Kokonaisvoimaksi saadaan

$$F_{\text{n}} = 65\ N + 59\ N = 124\ N$$

koska laippapareja on kaksi ja kumpikin laippapari kiinnitetään yhteen kahdella kierretangolla, voima jakautuu neljään osaan. Yhteen kierretankoon kohdistuu

$$F_{\text{n kierretanko}} = \frac{1}{4} \cdot 124\ N \approx 31\ N$$

Kierretankoon kohdistuva rasitus on noin 31 N. Koska venymäliuskamittasilta on suunniteltu kiinnitettäväksi ja käytettäväksi pyörivissä akseleissa, venymäliuskamittasillan tukivoimien voidaan todeta olevan riittävän suuria kestämään mittasiltaan kohdistuva rasitus. Lisäksi elektroniikkamoduulien välisten johtojen kiinnittämiseen tarvittavien tukivoimien voidaan todeta olevan riittäviä, kun johdot kiinnitetään akseliin nippusiteillä. On huomioitavaa että jokainen osamoduuli vaatii kiinnityslaippaan nähden tukivoiman. Tarvittavat tukivoimat on listattu taulukkoon 4.

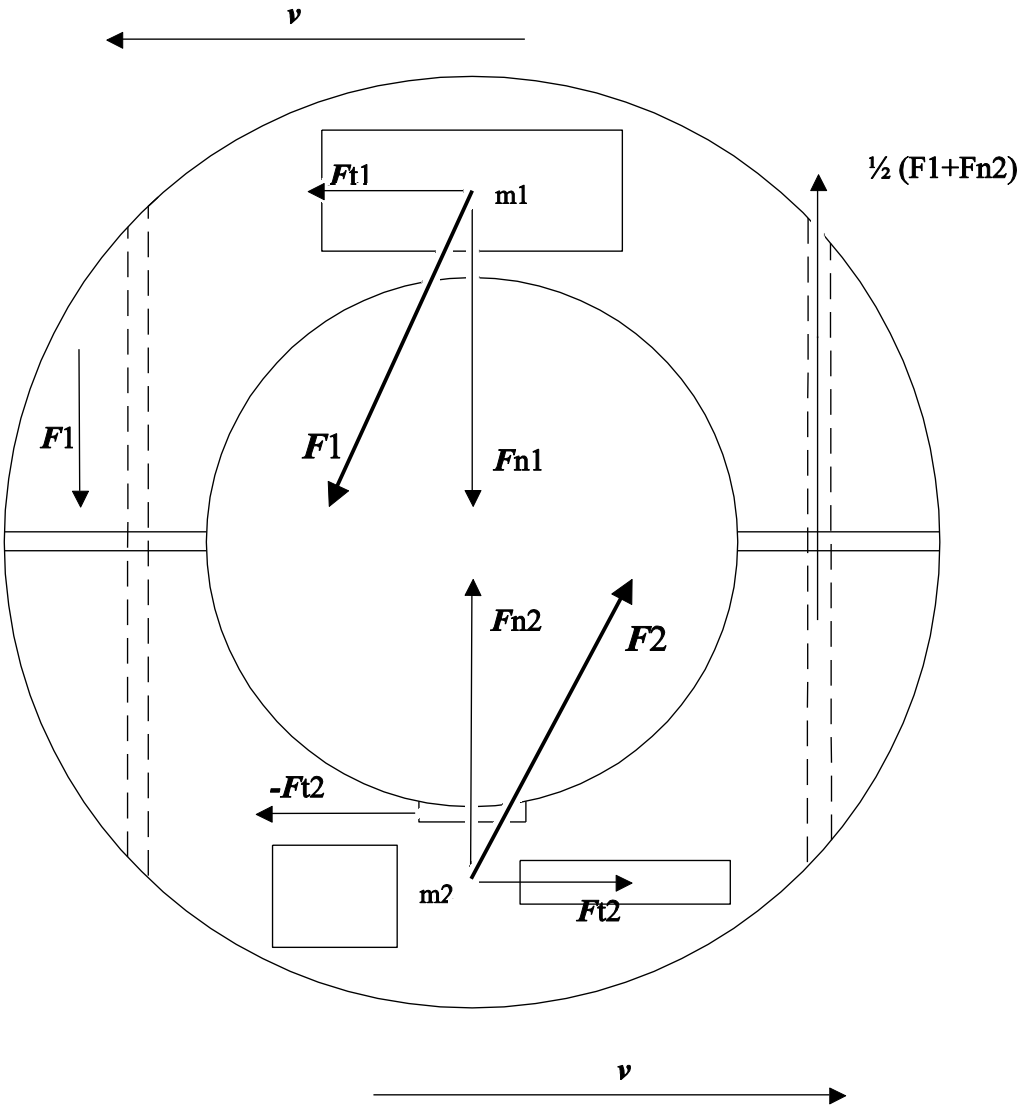
Taulukko 4. Järjestelmämoduuleihin kohdistuvat normaalivoimat.

OSA	Tukivoima [N]
Digitaalielektroniikka	33
LiPo-Akku	20
Analogiavahvistin	16

3.1.1 Kiihtyvän liikkeen edellyttämä tukivoima

Pyörimisnopeuden muuttuessa järjestelmään vaikuttavien voimakomponenttien määrä kasvaa. Kiihtyvässä ympyräliikkeessä normaalivoiman lisäksi järjestelmään vaikuttaa tangentiaalinen voimakomponentti, joka lisää

mittalaitteistonkiinnityslaippojen rasitusta. Tällöin kokonaisvoima on osavoimavektoreiden summavektori, eli resultantti. Toinen kiinnityslaippaparin puolikas lukitaan paikoilleen akselilla olevalla kiilalla. Tällöin kiinnityslaipoilla ei ole mahdollisuutta luistaa akselin pinnalla. Akselin pinnan suuntaisen tukivoiman voidaan olettaa riittävän suureksi estämään mittauslaitteiston liikkuminen akselin suhteen. Kuvassa 6 on esitetty laippapuolikkaisiin kohdistuvat voimat kiihtyvässä liikkeessä. On huomioitavaa että kiinnityslaippapuolikkaiden massat eroavat toisistaan, vaikka massakeskipisteet arvioidaankin samoiksi.



Kuva 6. Kiinnityslaippoihin vaikuttavat voimat.

Kuvan 6 mukaisesti kappaleisiin vaikuttaa kaksi voimakomponenttia normaali- sekä tangentiaalinen voima. Tangentiaalinen voimakomponentti esiintyy vain silloin kun

kappale on kiihtyvässä liikkeessä. Tangentiaalinen kiihtyvyys lasketaan yhtälön 22 mukaan

$$\bar{a}_{\mathrm{t}} = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \tag{22}$$

jolloin tangentiaalinen voima on yhtälön 23 mukaisesti

$$F_{\mathrm{t}} = m \cdot \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \tag{23}$$

Koska toinen laippaparin puolikas on kiinnitetty akseliin kiilalla, kiihtyvässä liikkeessä voima kohdistuu laippaparin toiseen kierretappiin, jolloin rasitus on suurempi. Oletetaan vielä ettei laippojen ja akselin pinnan välillä esiinny kitkaa, jolloin kaikki rasitus kohdistuu kierretankoihin. Nyt voima jakautuu kahdelle kierretangolle neljän sijaan. F2 kumoutuu koska laippaparin puolikas on lukittu kiilalla akseliin. Tällöin

$$F_{\mathrm{t1}} = 0{,}377\ kg \cdot \frac{(0 - 10{,}2\ \mathrm{m/s})}{0{,}1\ \mathrm{s}} \approx 38\ N$$

Kokonaisvoima on osavoimavektorien resultantti, koska voimakomponentit ovat toisiaan vastaan kohtisuorassa, lasketaan voiman resultantti Pythagoraan lauseen mukaisesti yhtälöllä (24)

$$F_{\mathrm{summa}} = \sqrt{F_{\mathrm{t}}^2 + F_{\mathrm{n}}^2} \tag{24}$$

Tällöin vaikuttavia voimia ovat

$$F_{\mathrm{summa\ kierretanko}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot F_{\mathrm{t1}}^2 + F_{\mathrm{n\ kierretanko}}^2} \approx 41\ N$$

Arvion perusteella voidaan todeta, että kierretangot kestävät niihin kohdituvat voimat. Taulukkoon 5 on listattu elektroniikkamoduulien resultanttivoimat. Syntyvät voimat lasketaan yhtälöllä 24

Taulukko 5. Järjestelmän osiin kohdistuvat kokonaisvoimat.

Osa	Ft [N]	Voiman resultantti [N]
Digitaalielektroniikka	26	36
Vahvistin	13	32
Akku	16	33

3.2 Lämpötilamuutosten aiheuttaman mittausvirheen kompensointi

Lämpötilavaihtelut aiheuttavat mittausvirhettä. Kun mittausjärjestelmän reagointi lämpötilan muutoksiin tiedetään, voidaan lämpötilan muutosten aiheuttama virhe mittaustuloksiin poistaa laskennallisesti. Metric Oy:n edustajan Timo Pellin kanssa käydyn sähköpostikeskustelun pohjalta tiedetään, että vertailulämpötila on 20 °C, lämpötilan vaikutus K-kertoimeen on 0,012 % / °C sekä kimmomoduuliin - 0,9 % / °C. Tästä johtuen lämpötilan noustessa mitattavat vääntömomenttiarvot ovat todellisia vääntömomenttiarvoja suurempia.

Lasketaan tarvittava mittasiltavastuksien resistanssien muutos vertailupisteen arvoon nähden tilanteessa, jossa saavutetaan mittasiltavahvistimen lähdön maksimiarvo. Tiedetään että venymäliuskamittasillalle pätee yhtälö 25

$$K = \frac{\Delta R}{R \cdot \varepsilon} \tag{25}$$

sijoitetaan yhtälö 4 yhtälöön 25, jolloin saadaan

$$K = \frac{\Delta R}{\mathrm{R}} \cdot \frac{\pi \cdot D^3 \cdot \mathrm{E}}{16 \cdot T}$$

Tiedetään, että lämpötilan muutokset vaikuttavat mittasillan toimintaan yhtälön 26 mukaisesti

$$\Delta R = (\Delta T_{\mathrm{c}} \cdot 12 \cdot 10^{-4} \cdot K + K) \cdot \frac{\Delta T_{\mathrm{MAX}} \cdot 16}{\pi \cdot (E - E \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T_{\mathrm{c}}) \cdot D^3} \cdot R \tag{26}$$

missä ΔT_{c} on lämpötilanmuutos vertailupisteeseen nähden, joka on 20 °C. Lämpötilan muutos lasketaan yhtälön 27 mukaisesti

$$\Delta T_c = Tc - 20\ ℃ \tag{27}$$

Lasketaan mittasillan vastusarvon muutos kun vääntömomentti muuttuu 14,8 kNm. Lisäksi pätee K = 2, E = $210 \cdot 10^9$ sekä mittasillan ominaisvastus R = 350 Ω. Ratkaistaan ΔR yhtälöstä 28

$$\Delta R = \left(0\ ℃ \cdot 12 \cdot 10^{-4}\ \frac{1}{℃} \cdot 2 + 2\right) \cdot \frac{1{,}48 \cdot 10^4\ \mathrm{Nm} \cdot 16}{\pi \cdot \left(210 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} - 210 \cdot 10^9\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} \cdot 3 \cdot\ 10^{-6}\ \frac{1}{℃} \cdot 0\ ℃\right) \cdot 0{,}08^3\ \mathrm{m}^3} \cdot 350\ \Omega$$
$$\approx 0{,}049\ \Omega$$

Mittasiltavahvistimen lähtöjännite muuttuu 20 V, silloin kun mittasillan vastusarvo muuttuu 0,49 Ω. Tiedetään että vääntömomentin muutos, jolla saavutetaan 700 με suuruinen venymän muutos, saadaan ratkaistua yhtälöstä 28. Tällöin yhtälö on

$$\Delta T_{\mathrm{MAX}} = \frac{\frac{\Delta R}{R} \cdot \pi \cdot \left(\mathrm{E} - \mathrm{E} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T_c\right) \cdot D^3}{(\Delta T_{\mathrm{c}} \cdot 12 \cdot 10^{-4} \cdot \mathrm{K} + \mathrm{K}) \cdot 16} \tag{28}$$

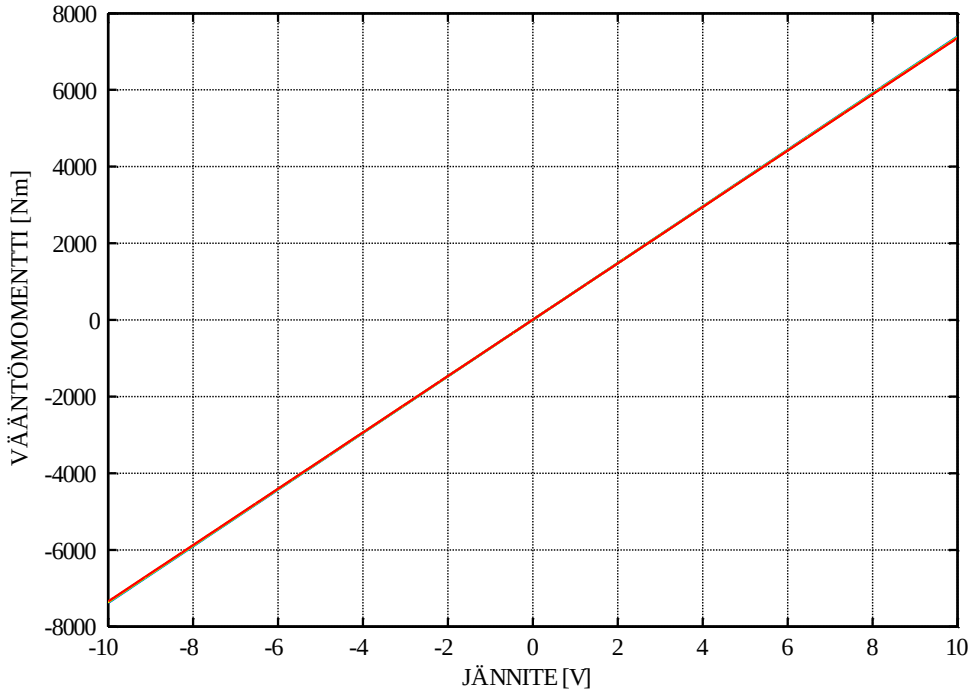
$\Delta \mathrm{T}_{\mathrm{MAX}}$ on kaksi kertaa $\mathrm{T}_{\mathrm{MAX}}$. $\mathrm{T}_{\mathrm{MAX}}$:ia suuremmilla vääntömomenteilla mittasiltavahvistin ei toimi enää linearisella alueella. Näin ollen $\mathrm{T}_{\mathrm{MAX}}$ suuremmilla vääntömomentin arvoilla lähtö kyllästyy. Lisäksi tiedetään, että 16-bittisellä A/D-muuntimella vääntömomenttimitta-alue $\Delta \mathrm{T}_{\mathrm{MAX}}$ voidaan jakaa 2^{16} yhtä suureen osaan. Kun vääntömomenttialue jaetaan muunnostasojen määrällä ja kerrotaan mittasiltavahvistimen lähdöstä otetun A/D-muunnoksen arvolla, saadaan vääntömomentti yhtälön 29 mukaisesti

$$T = \frac{\Delta T_{MAX}}{(2^{16})} \cdot ADC \tag{29}$$

Sijoittamalla yhtälö 29 yhtälöön 28 saadaan

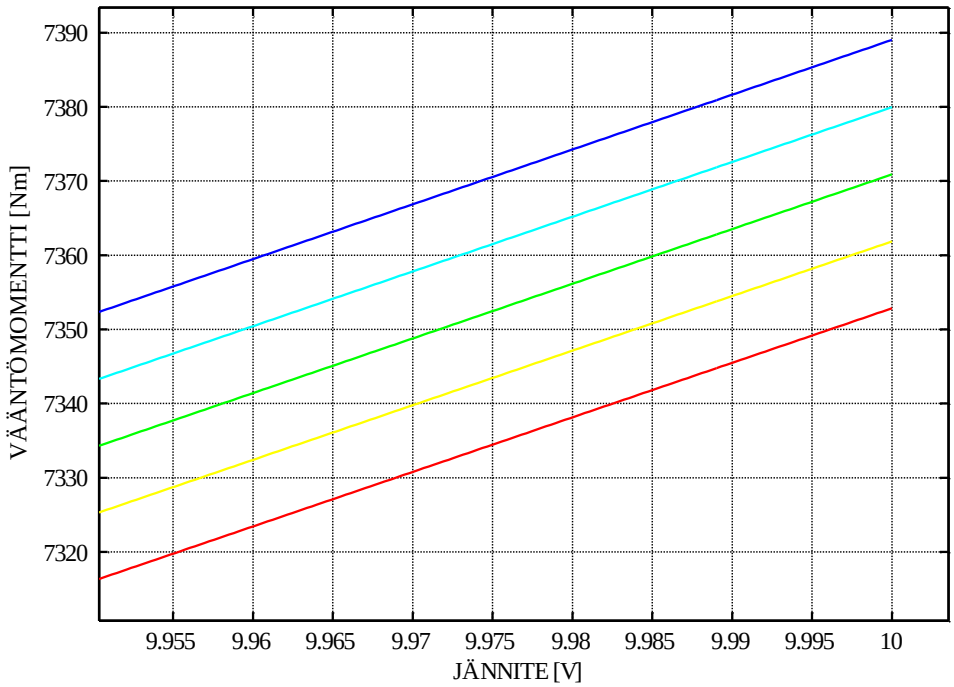
$$T = \frac{1{,}4 \cdot\ 10^{-3}\ \cdot\ \pi\ \cdot (\mathrm{E} - \mathrm{E}\ \cdot 3 \cdot\ 10^{-6}\ \cdot \Delta T_c) \cdot\ 0{,}08^3\ \cdot ADC}{(\Delta T_{\mathrm{c}}\ \cdot 12\ \cdot 10^{-4}\ \cdot \mathrm{K} + \mathrm{K}) \cdot 16\ \cdot\ (2^{16})}$$

Kuvissa 7a ja 7b on esitetty mittasiltavahvistimen lähtöjännite vääntömomentin funktiona eri lämpötiloissa. Koska lämpötilan vaikutus mittasillan toimintaan on suhteellisen pientä kuvassa 7a näkyy vain yksi kuvaaja.



Kuva 7a. Mittasiltavahvistimen lähtöjännite vääntömomentin funktiona eri lämpötiloissa.

Kuvassa 7b on mittausalueen yläpää suurennettuna, jolloin nähdään lämpötilan vaikutus mittasiltavahvistimen lähtöjännitteeseen. Sininen on mittasiltavahvistimen lähtöjännitteen kuvaaja 20 °C, punainen 30 °C, vihreä 40 °C, keltainen 50 °C sekä violetti 60 °C.



Kuva 7b. Tarkennettu kuva mittasillan lämpötilariippuvuudesta.

Kuvasta 7b nähdään että 60 ℃ asteen lämpötilassa 10 V lähtöjännite saavutetaan n. 7,39 kNm sekä 20 ℃ asteen lämpötilassa n. 7,35 kNm vääntömomentilla. Lämpötilan muutoksista johtuva mittausvirhe kasvaa vääntömomentin suhteen lineaarisesti. Mitä suurempi vääntömomentin itseisarvo on, sitä suurempi on lämpötilanmuutoksesta aiheutuva mittausvirhe. On huomioitavaa että vääntömomentin suunta ei vaikuta lämpötilan muutoksista aiheutuvan mittausvirheen suuruuteen. Suhteellinen mittausvirhe on 60 ℃ asteen lämpötilassa 10 V lähtöjännitteellä

$$\frac{7{,}39 - 7{,}35}{7{,}39} * 100\% \approx 0{,}54\ \%$$

Lämpötilan vaikutus mittaustulokseen voidaan kompensoida lämpötilan kompensointifunktiolla, joka on muotoa

$$T = \frac{1{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot (\mathrm{E} - \mathrm{E} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T_{\mathrm{c}}) \cdot D^3 \cdot ADC}{(\Delta T_{\mathrm{c}} \cdot 12 \cdot 10^{-5} \cdot \mathrm{K} + \mathrm{K}) \cdot 16 \cdot (2^{16})}$$

Silloin kun $ADC \in [-32768,\ 32768]$

Missä ADC on mittasiltavahvistimen lähtöjännitteen A/D-muunnos sekä ΔT_c lämpötilan muutos 20 ℃ asteen vertailulämpötilasta.

3.2.1 Lämpötilan mittausepävarmuus

Vääntömomentin mittauspisteen lämpötila mitataan LM-19 lämpötila-anturilla, jonka jännitesignaali näytteistetään mikrokontrollerin sisäisellä 10-bittisellä A/D-muuntimella. Lämpötila-anturista ja A/D-muunnoksesta aiheutuu mittausepävarmuutta. LM-19 lämpötila-anturin mittausepävarmuus on $\pm$ 3,8 ℃, kun mittausalue on 130 ℃ – 55 ℃ [LM-19, 2001]. Lisäksi A/D-muunnin aiheuttaa mittausepävarmuuden, joka on suuruudeltaan $\pm$ 2 LSB [AVR-128, 2009]. A/D-muuntimen kvantisoinnista aiheutuva mittausepävarmuus on yhtälön 30 mukaan

$$LSB_{\mathrm{TEMP}} = \frac{TEMP_{\mathrm{HI}} - TEMP_{\mathrm{LOW}}}{(2^{b_{ADC}} - 1)} \tag{30}$$

missä $TEMP_{\mathrm{HI}}$ on lämpötila-anturin toiminta-alueen yläraja sekä $TEMP_{\mathrm{LOW}}$ lämpötila-anturin toiminta-alueen alaraja. Nyt A/D-muuntimen resoluutio on

$$\frac{185\ ℃}{(1024 - 1)} = 0{,}18\ ℃$$

Kvantisointiepävarmuus on 0,18 ℃. A/D-muuntimen absoluuttinen mittausepävarmuus on

$$2 \cdot 0{,}18\ ℃ = 0{,}36\ ℃$$

Kokonaismittausepävarmuus saadaan summaamalla mittausepävarmuuden osatekijät yhteen.

$$3{,}8\ ℃ + 0{,}36\ ℃ = \pm 4{,}16\ ℃$$

Maksimissaan aiheutuva mittausepävarmuus on suurilla vääntömomentin arvoilla

$$T_{\mathrm{MAX}} - T_{\mathrm{MAX}+|4{,}16|}$$

Jolloin sijoittamalla arvo, saadaan

$$7{,}389\ \mathrm{kNm} - 7{,}385\ \mathrm{kNm} \approx 4\ \mathrm{Nm}$$

n. 4 Nm. Lämpötilanmittausepävarmuus on lineaarisesti riippuvainen vääntömomentista, suhteellinen mittausepävarmuus on

$$\frac{4\ \mathrm{Nm}}{7{,}385\ k\mathrm{Nm}} * 100\ \% \approx\ 0{,}054\ \%$$

lämpötilan kompensoinnin jälkeen vaikuttava mittausepävarmuus on niin pientä, että sen voidaan katsoa olevan merkityksetön järjestelmän mittausepävarmuusrajojen kannalta. Lisäksi Lämpötilamitta-anturin itselämmityksen oletetaan olevan merkityksetöntä. Lämpötila-anturin jännitteellistäminen vain mittaushetkien ajaksi on mahdollista. Tällöin lämpötila-anturin jännitesyöttöön kytketään mikrokontrollerilla ohjattava MOSFET. Lämpötilan muutokset eivät vaikuta ratkaisevasti venymäliuskamittasillan toimintaan. Lämpötilan kompensoinnilla lämpötilan muutoksista aiheutuva mittausvirhe saadaan pienennettyä kymmenesosaan kompensoimattomasta tilanteesta. Kompensoituna mittausvirhettä voidaan laitteiston tarkkuuden kannalta pitää merkityksettömän pienenä.

3.3 Langaton tiedonsiirto

Mittaustiedonsiirto pyörivälle akselille kiinnitetystä mittalaitteesta edellyttää langattoman tiedonsiirtolinkin käyttöä. Langattomat tiedonsiirtomenetelmät voidaan jakaa kolmeen pääryhmään, jotka ovat radioaaltoihin, lähikenttäkytkeytymiseen tai IR-signaaliin (Infra Red) perustuvia menetelmiä.

3.3.1 Langattomantiedonsiirron ongelmat

Teollisuusympäristö on haasteellinen toimintaympäristö radiotaajuisen tiedonsiirron kannalta. Teollisuushalleissa on usein heijastavia metallipintoja. Heijastuessaan, taittuessaan sekä sirotessaan lähettimen lähettämä signaali saapuu vastaanottimeen eri ajan hetkillä. Signaalin etenemiseen kuluva aika on suoraan verrannollinen

signaalin kulkeman reitin pituuteen. Monitie-eteneminen aiheuttaa vastaanotettavan signaalin tason vaihteluita. Mikäli eri reittejä pitkin saapuvat signaalit aiheuttavat vastaanotettavan signaalin tason vahvistumisen, puhutaan konstruktiivisesta interferenssistä. Mikäli summautuvat signaalit vaimentavat toisiaan, puhutaan destruktiivisesta interferenssistä. Monitie-eteneminen aiheuttaa myös peräkkäisten symboleiden keskinäistä summautumista ISI:ä (Inter Symbol Interference) [Pupolin S, 2007], [Juutilainen M, 2006 - 2007], ISI-ongelma korostuu kapeakaistaisilla suuridatanopeuksisilla modulaatiotavoilla. Monitie-etenemistä aiheuttavia mekanismeja on kahta erityyppiä. Staattinen monitie-eteneminen johtuu ympäristöolosuhteista sekä dynaaminen monitie-eteneminen aiheutuu hetkellisesti siirtotiehen ja signaalin kulkuun vaikuttavista asioista. Käyttökohteessa dynaamiseen monitie-etenemiseen vaikuttava asia on akselin pyöriminen. On huomioitavaa, että jossain vaiheessa roottorin akseli on lähettimen ja vastaanottimen välisellä linjalla, jolloin LOS-yhteys (Line Of Sight) häviää. Teollisuusympäristön häiriölähteiden tuottamat taajuudet rajautuvat yleisesti ottaen alle 30 MHz:n taajuuksille.[Silventoinen P], [Särkimäki V, 2006], [Häkkinen E, 1999]

3.3.2 Dopplerin-ilmiö vaikutuksen arviointi

Dopplerin-ilmiö tunnetaan paremmin äänisignaalien yhteydessä, jolloin lähestyvästä kohteesta tulevan äänen taajuus on kuullaan signaalilähteen varsinaista taajuutta korkeampana, kun taas vastaavasti loittonevan äänilähteen äänen taajuus on varsinaista signaalilähteen taajuutta matalampi. Sama ilmiö esiintyy myös radioaaltojen yhteydessä. Lasketaan kuinka paljon radioaallon taajuus muuttuu kun radiolähetin on kehäliikkeessä ja tarkastelupiste eli vastaanotin paikoillaan. Lasketaan vastaanottimessa koettava signaalin taajuuden muuttumisen suuruus. Lähettimen arvioidaan sijoittuvan kiinnityslaipan massakeskipisteeseen, jolloin lähettimen kehänopeutena voidaan käyttää aiemmin laskettua kiinnityslaipan massakeskipisteen kehänopeutta, joka on 10,2 m/s. Tällöin tietyssä kohdassa kierrosta lähetin lähestyy vastaanotinta 10,2 m/s nopeudella sekä vastaavasti tietyssä kehän pisteessä loittonee samalla nopeudella. Lähettimen liikkumisnopeus suhteessa vastaanottimeen on suurimmillaan silloin kuin lähetin liikkuu kohtisuoraan vastaanottimeen nähden. Dopplerin-siirtymä lasketaan yhtälöllä 31

$$f_{\mathrm{D}} = \left| f_0 \cdot \frac{\mathrm{c}}{\mathrm{c} \pm v} - f_0 \right| \tag{31}$$

missä f_{D} on suurin Dopplerin-siirtymä, f_0 on lähettimen taajuus sekä v lähettimen kehänopeus. Tiedetään että 2,4 GHz:n ISM-taajuusalueella toimii paljon erityyppisiä radioprotokollia. Lasketaan Dopplerin-siirtymä kun lähetin toimii 2,4 GHz:n ISM-taajuusalueella sekä lähettimen kehänopeus on 10,2 m/s.

$$f_D = \left| \left(2{,}4 \cdot 10^9 \text{ Hz} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \pm 10{,}2 \text{ m/s}} \right) - 2{,}4 \cdot 10^9 \text{ Hz} \right| = 81{,}6 \text{ Hz}$$

Dopplerin-siirtymä on suurimmillaan itseisarvoltaan 81,6 Hz. Dopplerin-siirtymän aiheuttama koherenssiaika saadaan Dopplerin-siirtymän käänteislukuna yhtälön 32 mukaisesti

$$T_c = \frac{1}{f_D} \tag{32}$$

sijoittamalla yhtälöllä 31 laskettu Dopplerin-siirtymän arvo yhtälöön 32, saadaan koherenssiaika

$$T_c = \frac{1}{81{,}6} = 0{,}012\ s$$

Mikäli koherenssiaika on paljon suurempi kuin yhden symbolin kesto, voidaan Dopplerin-ilmiön vaikutuksia pitää merkityksettömän pieninä. On huomioitavaa että Dopplerin-ilmiö on vain yksi siirtotiehen vaikuttavista ilmiöistä. Esimerkiksi akselin halkaisijan vaikutusta on vaikea arvioida. On ilmeistä että jokaisella akselin pyörähdyksellä on ajanjakso, jolloin akseli on lähettimen ja vastaanottimen välisellä linjalla. Mikäli akseli estää suoran radioyhteyden, on radioyhteyden säilyttäminen tällaisessa tilanteessa hankalaa. Koska radiosignaalin suora etenemisreitti lähettimeltä vastaanottimelle on poikki, radioyhteyden säilyminen riippuu toimintaympäristön materiaaleista ja niistä tapahtuvista heijastumisista. Tiedonsiirron aikana hetkellinen radioyhteyden katoaminen tarkoittaa käytännössä sitä, ettei osaa lähetetystä datasta koskaan saada vastaanotetuksi. [Särkimäki V, 2006],

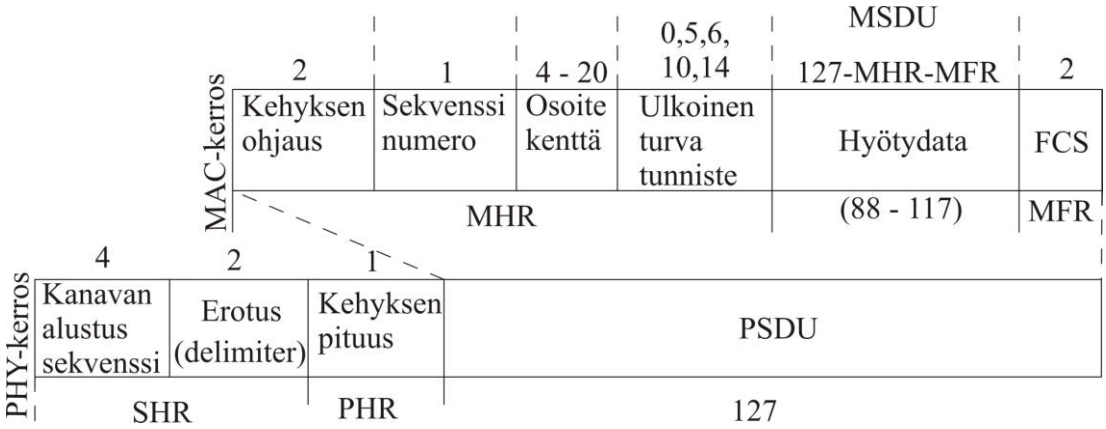
3.4 IEEE 802.15.4 LR-WPAN

IEEE 802.15.4-standardin tiedonsiirtoprotokolla ja sen mukaiset radiolaitteet on suunniteltu pieniä datanopeuksia tarvitseville ohjaus- ja mittausverkoille. Kulutuselektroniikassa IEEE 802.15.4-standardiin pohjautuvia radiopiirejä ja verkkokokonaisuuksia hyödynnetään langattomissa valojen yms. ohjaimissa. Teollisuudessa tekniikkaa sovelletaan langattomissa mittaus- ja kulunvalvontaverkoissa. Yleisesti ottaen langattomien antureiden etuna langallisiin antureihin verrattaessa perustuu mitta-anturiverkon muunneltavuuteen ja joustavuuteen. Mittauspisteitä voidaan vaihtaa ilman kaapeloinnin suunnittelua. Lisäksi mittauspisteitä voidaan asettaa paikkoihin joihin langallisen mittausverkon asentaminen on käytännössä mahdotonta. Useissa langallisissa teollisuusautomaatiossa käytettävissä väyläprotokollissa sovelletaan perustaajuusmodulaatiota, tämä tarkoittaa sitä että bitit lähetetään siirtotielle sellaisinaan moduloimatta niitä kantoaaltoon. Joissakin tapauksissa tiedonsiirron varmuutta pyritään parantamaan esim. Machester-koodauksella, jolloin 0 ja 1 määrä siirrettävässä datassa saadaan balansoitua. Tällaisten verkkojen haavoittuvaisuus ilmenee tilanteissa, joissa tiedonsiirtotaajuudelle ilmaantuu häiriö. Radiotaajuisen tiedonsiirron etu on myös siirrettävän signaalin moduloiminen korkeammalle taajuudelle, jossa teollisuusympäristölle ominaisia häiriötä ei esiinny. Kaikki yleisesti käytetyt pakettipohjaiseen tiedonsiirtoon perustuvat radioprotokollat sisältävät virheenkorjauksen tai -havainnoinnin, tällöin siirtotiellä kytkeytyvien häiriöiden vaikutusta varsinaiseen siirrettävään hyötydataan saadaan oleellisesti vähennettyä. On huomioitavaa että virheenkorjausta sekä havainnointia käytetään myös langallisissa tiedonsiirtoprotokollissa.

3.4.1 PHY- ja MAC-kerros

Pakettipohjaisessa tiedonsiirrossa jokaisella OSI-mallin kerroksella on oma pakettikehys, joka koostuu kerroksen ohjausdataosiosta sekä hyötydataosiosta. Hyötydataosioon sijoitetaan ylemmän kerroksen pakettikehys. IEEE 802.15.4-standardin fyysisen kerroksen pakettikehys koostuu kolmesta osiosta lähetyksen synkronointiosa SHR (Synchronization Header), fyysisen kerroksen tunnisteesta PHR (PHY Header) sekä fyysisen kerroksen hyötydataosiosta, joka voi sisältää 127-tavuisen MAC-pakettikehyksen PSDU (PHY Service Data Unit).[Stevanovic D,

2007], [Yuxiang Y]. SHR-osiolla vastaanotin synkronoidaan lähettimen signaaliin. PHR-osio sisältää PSDU:n pituustiedon. SHR ja PHR lisäävät MAC-pakettikehyksen mittaan 48 bittiä. Fyysisen tason siirtonopeudeksi IEEE 802.15.4-standardi määrittää 250 kb/s, kun modulaationa käytetään OQPSK:ä ja kun toimitaan 2,4 GHz:n ISM-taajuusalueella. Liikenne RF-linkissä on half-duplex-tyyppistä. [Farahani S, 2008]. Kuvassa 8 on esitetty IEEE 802.15.4 standardin mukainen fyysisen- sekä MAC-kerroksen pakettikehysrakenne.



Kuva 8. 802.14.5-standardin määrittelemä fyysisen- ja MAC-kerroksen pakettikehysrakenteet [Eenennam M, 2009].

Kuvasta 8 nähdään MAC-kerroksen pakettikehyksen sisältävän *overhead*-tavuja maksimissaan 39. IEEE 802.15.4-standardi määrittää MAC-kerroksen hyötydataosion maksimipituudeksi 102 tavua. Tämä pätee silloin kun liikenne on salaamatonta. Jos liikenne salataan, salauksen vaatima tila lyhentää hyötydataosion pituutta. Mikäli MAC-osoitteina käytetään vain lyhyitä 16-bittisiä osoitteita, IEEE 802.15.4b-standardi mahdollistaa pakettikehykseen syntyvän tilan hyödyntämisen hyötydataosiossa. [Jennic, 2006]

Lopullinen RF-linkin kautta siirrettävän sovelluskohtaisen hyötydatan määrä riippuu ylempien OSI-kerrosten pakettikehysrakenteista. 2,4 GHz:n ISM-taajuusalueella toimivan 802.15.4-standardin mukaisen radiopiirin modulaatiotapa on OQPSK, jolloin fyysisellä tasolla yhdellä symbolilla voidaan esittää kaksi bittiä kerrallaan. On huomioitavaa että DSSS-tekniikassa käytettävistä alibiteistä johtuen symbolinopeus on ¼-osa fyysisen tason siirtonopeudesta. 2,4 GHz ISM-taajuuskaistaa käyttävät useat lupavapaat radiotekniikat, joista tunnetuimpia ovat WLAN (Wireless Local Area Network 802.11), Bluetooth (802.15.3), ZigBee sekä teollisuusympäristöissä

lisäksi vielä Wireless HART.[Zigbee, 2007]. Lasketaan IEEE-802.15.4-standardin mukainen symbolin kesto. Symbolin kesto on symbolinopeuden käänteisluku yhtälön 33 mukaisesti

$$T_s = \frac{1}{f_{baud}} \tag{33}$$

Missä f_{baud} on symbolinopeus. Tiedetään että IEEE 802.15.4-standardin määrittämä fyysisen tason siirtonopeus on 250 kb/s. Koska symboliopeus on neljäsosa siirtonopeudesta, on symbolinopeus 62,5 kb/s. Sijoittamalla symbolinopeus yhtälöön 33 saadaan symbolin kestoksi

$$Ts = \frac{1}{62{,}5\ \mathrm{kbaud/s}} = 16\ \mu\mathrm{s}$$

Yhden symbolin kesto on 16 µs, jolloin voidaan todeta koherenssiajan ja symbolin kestoajan välille asetetun ehdon Tc >> Ts täyttyvän, sillä 12 ms >> 0,016 ms. Dopplerin-ilmiön vaikutusta RF-linkin toimintaan voidaan pitää merkityksettömän pienenä.

3.4.3 CRC/FCS-virheentarkastussumma

CRC-tarkastussumma (Cyclic Redundancy Check) on algoritmi, jolla varmennetaan datan muuttumattomuus siirtoteillä. Lähetettävästä datasta lasketaan lähettimessä CRC-tarkastussumma lähetettävän datan ja CRC-polynomin välisellä XOR-operaatiolla (Exclusive OR). Laskuoperaatiosta saatu tulos liitetään lähetettävään pakettikehykseen. Vastaanottopäässä vastaanotetusta datasta lasketaan uudelleen CRC-tarkastussumma ja saatua tulosta verrataan datapaketin mukana saapuneeseen tarkastussummaan. Mikäli paketin mukana tullut ja vastaanottimessa laskettu tarkastussumma eroavat toisistaan, on paketin siirrossa tapahtunut virhe. FCS (Frame Check Sequence) on CRC:stä jatkokehitetty menetelmä, jossa tarkastussumman piiriin lasketaan myös pakettikehys pois lukien PHY-kerroksen pakettikehysosio. Lisäksi FCS:ssä suoritetaan lähetettävän datan käsittelyä ennen XOR-operaatiota. [Schmidt T, 2000], [Xianchun Y]

3.4.4 CSMA-CA-kanavanvarausalgoritmi

CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance) on dynaaminen kanavanvarausalgoritmi, joka toimii kilpavarausmenettelyllä. IEEE 802.15.4-standardissa toinen mahdollinen kanavanvarausalgoritmi on verkon koordinaattorilaitteen synkronoima majakkajaksoihin perustuva varausmenetelmä, jossa kanava-aika jaetaan jokaiselle verkon laitteelle etukäteen. Kanava-aika jaetaan kiinteä mittaisiin aikaikkunoihin GTS:iin (Guaranteed Time Slots), jolloin jokaisella verkon laitteella on etukäteen määrätty liikenneikkuna kanavalla. CSMA-CA:ssa datapaketin lähettävä laite kuuntelee kanavaa ennalta määrätyn pituisen ajanjakson verran, jonka jälkeen kanavan ollessa vapaa lähettää datapaketin. Muut laitteet, joilla on lähetettävää dataa tarkkailevat kanavan signaalitasoa ja aloittavat lähetyksen vasta kun kanava on todettu vapaaksi. Laitteille määritetään kanavan pohjakohina eli *threshold*-taso, joka on samalla signaalitaso jonka mukaan laite tulkitsee onko kanava vapaa. Tarkkailtaessa kanavan signaalitasoja, puhutaan ED-tyyppisestä kanavanvarausmenettelystä (Energy Detection). Toinen versio CSMA-CA:sta on CS-tyypin (Carrier Sense) kanavanvarausmekanismi. Tällöin kuunnellaan kanavalla olevaa liikennettä ja tulkitaan sitä, mikäli liikenne on saman protokollan alaista liikennettä, laite voi pidättäytyä lähetyksestä, vaikka signaalin voimakkuus olisikin alle asetetun *threshold*-tason. CSMA-CA:ssa kanavaa kuunnellaan tietty ajanjakso ja mikäli kanavalla ei havaita liikennettä, aloitetaan lähetys. Mikäli kanava havaitaan varatuksi algoritmi käynnistää laskurin, jonka päättyessä kanavan tila tarkastetaan uudelleen. Lähetyksen viivästämistä nimitetään *backoff*:ksi. Lähetyksen viivästysfunktio on eksponenttifunktio, jonka eksponenttiarvo voidaan asettaa. CSMA-CA viivästysfunktio on esitetty yhtälössä 34 [Farahani S, 2008], [Jennic, 2006]

$$T_{\mathrm{CH_delay}} = (2^{BE} - 1) \cdot \mathrm{T_{backoff}} \qquad (34)$$

On huomioitavaa että CSMA-CA-algortimiin sisältyy myös kanavan kuuntelujakso CCA (Clear Channel Assessment), jolloin kanavan tarkkailu periodin pituus lasketaan yhtälön 35 mukaan

$$T_{\mathrm{CSMA_CA}} = T_{\mathrm{CH_delay}} + \mathrm{CCA} \qquad (35)$$

missä CCA on kanavan tarkkailuun kuluva aika, joka on määritetty IEEE 802.15.4-standardissa 128 µs mittaiseksi. [CSMA-CA, 2007], [Jennic, 2006]

3.4.5 DSSS-kanavointitekniikka

DSSS-kanavointitekniikka (Direct Sequence Spread Spectrum) on käyttökelpoinen kanavointitekniikka häiriöllisessä ympäristössä toimiville radioprotokollille. DSSS-tekniikan verraten pitkästä symbolin kestosta johtuen ISI-immuniteetti on parempi kuin lähetteissä, joissa symbolin kesto on lyhyt. Symbolin bittinopeuden kasvattamiseksi lähetettävä data jaetaan nelibittisiin ryhmiin, joista jokaisella on oma 32-bittinen alibitti, ”alisana”. Symbolin bittinopeuden noustessa signaalin kaistanleveys kasvaa lineaarisesti symbolin sisältämien bittien ja vastaavien alibittien määrän suhteessa. Eli korvattaessa alkuperäiset neljä bittiä 32-bittisellä alisanalla, signaalin kaistanleveys kasvaa 8-kertaiseksi. Nelibittisiä ryhmiä vastaavia 32-bittisiä alisanojen määrä saadaan yhtälön 36 mukaan

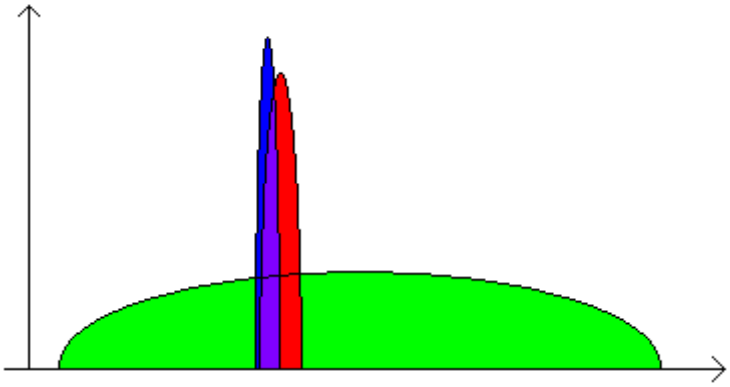
$$M = 2^b \tag{36}$$

Missä M on mahdollisten tasojen määrä sekä b käytössä olevien bittien määrä. Nelibittisten pakettien tapauksessa mahdollisia kombinaatioita on

$$M = 2^4 = 16$$

Vastaanottimessa vastaanotettua 32-bittistä alisanaa verrataan 16 mahdolliseen vaihtoehtoon ja valitaan todennäköisin vaihtoehto. Koska alisanojen bittisekvenssit on valittu siten että alisanat ovat keskenään kvasiortogonaalisia, hieman muuttunut bittisekvenssi korreloi vahvasti vain yhden alisanan kanssa. Tällöin symboli voidaan palauttaa sisällöltään muuttumattomana. Koska tieto siirretään laajemmalla taajuuskaistalla, kapeakaistaisille modulaatioille tyypillistä koko taajuuskaistan peittävän häiriösignaalin esiintyminen on epätodennäköisempää. Verrattaessa DSSS-kanavointia ja FHSS-tekniikalla kanavoitua GFSK-moduloitua signaalia. Voidaan todeta, että DSSS-tekniikassa lähetysteho jakautuu laajemmalle taajuuskaistalle. Näin ollen pistetaajuutta kohden lähetysteho on kapeakaistaisempaa GFSK-

moduloitua signaalia pienempi. Lähetyskaistalla jonkin kapealla taajuusalueella olevan signaalin esiintyminen ei estä viestin perille pääsyä. Kuvassa 9 on havainnollistettu DSSS-kanavointitekniikan ja kapeakaistaisten lähetelajien ero [Farahani S, 2008].



Kuva 9. Kapeakaistaiset signaalit häiritsevät tiedonsiirron kannalta ratkaisevasti toisiaan, sen sijaan kapeakaistaisten signaalien vaikutus DSSS-kanavoituun signaalin on vähäinen, sillä ne häiritsevät vain pientä osaa DSSS-kanavoidun signaalin kaistasta.

Kuvasta 9 nähdään kuinka kaksi lähekkäin olevaa kapeakaistaista signaalia häiritsevät toisiaan. Vaikka DSSS-tekniikalla lähetetty tehotiheydeltään alhainen signaali peittyy kapeakaistaisten signaalien kohdalla, löytyy lähetystaajuuskaistalta vapaa taajuusalue, jolla tieto saadaan siirrettyä. DSSS-tekniikan symbolinopeus saadaan jakamalla alibittien lähetysnopeus yhtä symbolia vastaavalla bittimäärällä. 32-bittiset alisanat ovat keskenään kvasiortogonaalisia, joka tarkoittaa sitä että alisana korreloi vain itsensä kanssa. Tiedetään että bittinopeus lähettimessä on 2 Mb/s, jolloin symbolinopeus on

$$Baud = \frac{2 \cdot 10^6 \ \mathrm{b}/\mathrm{s}}{32 \ \mathrm{b}/\mathrm{symboli}} = 62{,}5 \cdot 10^3 \ \mathrm{symboli}/\mathrm{s}$$

Koska yksi symboli sisältää neljä bittiä, saadaan fyysisen tason tiedonsiirtonopeudeksi 250 kb/s. On huomioitavaa että pakettipohjaisessa tiedonsiirrossa hyötydatan siirtonopeus on aina fyysisen tason siirtonopeutta pienempi. Saavutettava hyötydatan siirtonopeus on suoraan verrannollinen hyötydatan ja ohjausbittien määrän suhteeseen pakettikehysrakenteessa.

Ohjausbittejä ovat mm. osoite- ja virheentarkastusbitit. [Särkimäki V, 2006] Taulukkoon 6 on koottu IEEE-802.15.4-standardin määrittelemiä fyysisen- sekä MAC-kerroksen parametreja. Standardia käyttää mm. ZigBee sekä HART 7-tekniikka (Wireless HART).

Taulukko 6. IEEE 802.15.4 parametreja.

IEEE 802.14.5			
Taajuusalueet	2,4 GHz	915 MHz	868 MHz
Fyysisen tason siirtonopeus	250 kb/s	40 kb/s	20 kb/s
Modulaatio	OQPSK	BPSK	BPSK
Kanavointi	DSSS		
Tiedonsiirto	Paketti, sarjamuotoinen		
PSDU	127		
MSDU	102		
Verkkotopologiat	mesh, star, P2P, P2multipoint		
Kanavien määrä	16	10	1
Kanavan varaus	CSMA-CA		
Vierekkäisten kanavien keskitaajuuksien etäisyys	5 MHz		
toimintaetäisyys [m]	+ 100		
osoitekentän pituus	16 tai 64 tavua		
symbolinopeus [kBaud]	62,5	40	20

[Farahani S, 2008] [Jennic, 2006] [Stevanovic D, 2007] [Odrej S, 2006]

3.5 ZigBee

ZigBee-standardi määrittää OSI-mallin verkkoyhteys- sekä kuljetuskerrokset. OSI-mallin ylemmät kerrokset jätetään kolmannen osapuolen sovelluksien tehtäväksi. Nykyisin ZigBee-standardin kehitystyöstä vastaa ZigBee-allianssi [Zigbee alliance]. Allianssiin kuuluu monia suuria yrityksiä kuten Intel, HP ja Philips. Tällä hetkellä allianssin jäsenmäärä on n. 200 yritystä ja yhteisöä. Allianssin tekemän ensimmäisen standardin määritys valmistui vuonna 2004. Standardi on tällä hetkellä avoin vain jäsenille ja ei kaupallisiin tarkoituksiin. ZigBee-tunnuksen käyttäminen edellyttää laitemallin testauttamista ja toteamista ZigBee-yhteensopivaksi. ZigBee:tä käytetään paljon teollisuusautomaatiossa langattomissa anturiverkoissa, sillä ZigBee-protokolla tukee mesh-, star-, point-to-point- sekä point-to-multimoint-verkkotopologioita, täten mahdollistaen monimutkaisten verkkotopologioiden muodostamisen ja solujen reitityksen. Yhteen verkkoon voidaan liittää tuhansia ZigBee-laitteita. Verkon

tiedonsiirtonopeus on kääntäen verrannollinen verkkoon kytkettyjen laitteiden määrään nähden. Suurin tiedonsiirtonopeus saavutetaan point-to-point yhteydessä. Työssä käydään läpi ZigBee:n ominaisuuksia koskien point-to-point verkkotopologiaa.

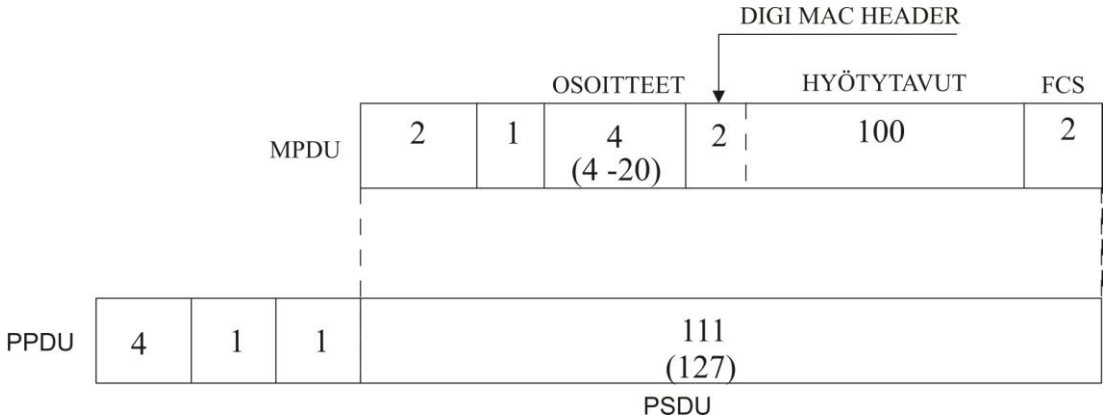
3.5.1 XBee PRO-moduulit

Mittausjärjestelmä suunnittelu ja toteutus perustuu moduulirakenteisiin. Langattomassa tiedonsiirrossa sovelletaan IEEE 802.15.4-standardin sekä Zigbee-protokollan mukaisen toiminnallisuuden sisältäviä valmiita XBee-radiomoduuleita. Kuvassa 10 on esitetty XBee-moduulipari sekä kaksi erityyppistä kytkentäalustaa, joita voidaan käyttää XBee-moduulien normaalitoiminnan lisäksi ohjelmointiin ja testaukseen. Oikean puoleinen kytkentäalusta soveltuu parhaiten XBee-moduulien ohjelmointiin ja testaukseen, sillä laudalle on asennettu valmiiksi XBee-moduulin I/O-porttinastoihin kytkettyjä LED:ja sekä painonappeja. Lisäksi kyseisellä alustalla voidaan suorittaa ohjelmallisessa vikatilanteessa edellytettävä moduulin resetointi. Mittausjärjestelmän vastaanottimena käytetään vasemmanpuolesta piirikorttia, joka on hinnaltaan halvempi, sekä kooltaan pienempi. Kuvassa 10 ei ole esitetty lähettimen XBee-moduulin kytkentäalustaa.

Kuva 10. RPSMA-antenniliittimelliset XBee-PRO-moduulit liityntärajapintapiirilevyillä.

XBee-PRO on DIGI International:n (entinen MaxStream) valmistama ZigBee-tekniikaan perustuva radiomoduuli. Moduuli sisältää MC9S08GT60 ARM-mikrokontrollerin (Advanced RISC Machine) sekä MC13193RF-radiopiirin. Eroavaisuutena tavalliseen XBee-moduliin nähden XBee-PRO sisältää LNA-yksikön (Low Noise Amplifier), joka parantaa moduulin vastaanottimen herkkyyttä. Niin ikään XBee-PRO:n lähettimen PA-yksikön (Power Amplifier) lähtöteho on suurempi (+17 dBm vrt. + 1dBm). XBee-moduulit sisältävät Freescale:n valmistavan ZigBee-ohjelmapinon. XBee-moduulin tapauksessa MAC-moodiksi asetetaan XBee-moduuleita varten muunneltu MAC-moodi: 802.15.4 + DIGI HEADER W/ACKS. Kyseisessä moodissa MPDU:n (MAC Protocol Data Unit) pituus on ZigBee-standardin mukainen 127 tavua. 802.15.4 + DIGI HEADER W/ACKS-moodissa toimittaessa MAC-kerroksen hyötydataosion eteen liitetään kaksitavuinen ohjauslohko. Lohkon sisältämien tietojen pohjalta voidaan havaita duplikaattipaketit yms. XBee-moduleissa on kaksi toimintatilaa AT- sekä API-moodi. API-moodi mahdollistaa XBee-moduulien etäohjelmoinnin sekä -ohjauksen. Työssä XBee-moduulin toimintaa tarkastellaan ainoastaan AT-moodissa. AT-moodi on perustoimintatila, jossa XBee-moduulilla emuloidaan RS-232-kaapelia. XBee-

moduulien välistä liikennettä ei salata, jolloin pakettikehykseen voidaan sisällyttää 100 hyötytavua. Lisäksi siirrettäviin paketteihin sisällytetään vain lähettimen ja vastaanottimen 16-bittiset osoitteet, jolloin osoitekentän pituus on neljä tavua. NWK-kerros (NetWorK), joka sijaitsee MAC-kerroksen päällä, on MSDU:n pituinen. NWK-kerros sisällyttää pakettikehykseen USART:a (Universal Serial Asyncronous Receiver Transmitter) pitkin XBee-moduulille saapuneen datapaketin. MAC-kehyksen ohjausosiossa määritetään MPDU:n rakenne sekä käytettävät MAC-kerroksen palvelut. Ohjausosio määrittää osoitekenttien pituudet, salauksen, paketin kuittauksen jne. [XBee, Pro, 2008]. Freescale:n ZigBee-pinon pakettirakenne 802.15.4 + DIGI HEADER W/ACKS-moodissa on esitetty kuvassa 11.[Farahani S, 2008]



Kuva 11. Freescale:n pakettirakenne 802.15.4 + DIGI HEADER W/ACKS-moodissa, kun XBee-moduulia käytetään AT-tilassa. [Jennic, 2006]

Kuvasta 11 nähdään IEEE 802.15.4-standardiin pohjautuva XBee-moduulien välisessä tiedonsiirrossa käytettävä pakettikehysrakenne. IEEE 802.15.4-standardin mukaiset tavumäärät on ilmoitettu suluissa. On huomioitavaa että paketteja ei salata AES-algoritmilla (Advanced Encryption Standard).

3.5.2 Paketin lähetysjaksonajan laskenta

Jokainen paketti varustetaan vorheiden havainnointia varten 16-bittisellä FCS-tarkastussummalla. Mikäli paketin sisältö muuttuu, FCS-tarkastussumma ei täsmää, jolloin vaihtoehdoiksi jää paketin uudelleen lähettäminen tai vioittuneen paketin hylkääminen. Jos virheen aiheuttaja on riittävän suurella taajuudella toistuva ilmiö, ei paketin uudelleenlähettäminen välttämättä auta asiaa. Mikäli pakettivirheen

aiheuttava toistuva mekanismi on tiedossa, täytyy pakettien lähetyksen kesto asettaa niin lyhyeksi, ettei toistuva häiriö pilaa kaikkia lähetyksiä. Koska jokainen pakettikehys sisältää tietyn määrän ohjausbittejä, aiheuttaa lähetettävän datan pilkkominen useampaan pakettikehykseen hyötydatan siirtonopeuden laskemisen.

3.5.3 CSMA-CA-kanavnavarausalgoritmin viive

XBee-moduulit ohjelmoidaan MM (Mac Mode) = 0, 802.15.4 + DIGI HEADER W/ACKS. Kanavanvarausalgoritmina käytetään asynkronista CSMA-CA-algoritmia koordinaattorilaitteen majakkajaksojen sijaan. Asynkroninen CSMA-CA on kanavanvarausalgoritmi, jossa lähettämistä aikova laite kuuntelee toimintakanavaa tietyn ajan (128 µs, CCA), jonka jälkeen kanavan signaalitason ollessa alle asetetun *threshold*-tason, lähettää paketin. *Threshold*-tasoksi nimitetään kanavalle asetettavaa pohjakohinaksi tulkittavaa signaalitasoa. CSMA-CA algoritmi käyttää CCA-algoritmina kantoaaltotunnistusta (carrier sense), eli paketin lähettämisen viivästää toinen kanavalla meneillään oleva *threshold*-signaalitason ylittävä radioliikenne. Lähetin kuuntelee kanavaa 128 µs, minkä jälkeen todetessaan kanavan vapaaksi lähettää paketin.

Lasketaan ennen paketin lähetystä kanavan tarkkailuun kuluva aika. Lasketaan CSMA-CA sekvenssiin kuluva aika kun paketin lähetys halutaan aloittaa mahdollisimman pikaisesti kanavan vapautumisen jälkeen. Määrätään *backoff*-ekponentiksi 1 (BE=1). Tällöin kanavan tila tarkastetaan mahdollisimman useasti. Lasketaan kanavan varaussekvenssin kesto aikaisemmin esitetyn yhtälön 37 mukaan

$$1 \cdot 320\,\mu s + 128\,\mu s = 448\,\mu s$$

Mikäli kanavalla on *threshold*-tason ylittävää radioliikennettä, lähetin odottaa 320 µs, jonka jälkeen yrittää lähettää paketin uudelleen. Kuuntelusekvenssin kesto on 448 µs. Lähetin kuuntelee kanavaa maksimissaan kolme kertaa, jonka jälkeen luopuu paketin lähettämisestä kokonaan. Jos BE asetetaan nollaksi, tällöin lähetystä ei lykätä. Paketti lähetetään CCA-ajan kuluttua riippumatta kanavan tilasta. [Jennic, 2006]

3.5.4 Datapaketin siirtoaika

Lasketaan datapaketin lähettämiseen kuluva aika. Tiedetään että fyysinen kerros lisää MPDU-osion (MAC Protocol Data Unit) eteen kuusi tavua paketin ohjausbittejä. Lisäksi tiedetään että fyysisen tason kaistanleveys on 250 kb/s. Kehyksen siirtoaika lasketaan yhtälöllä 37

$$\frac{(PHYpayload+SHR+PHR)\cdot 8\ b}{250\cdot 10^3\ b/s} \tag{37}$$

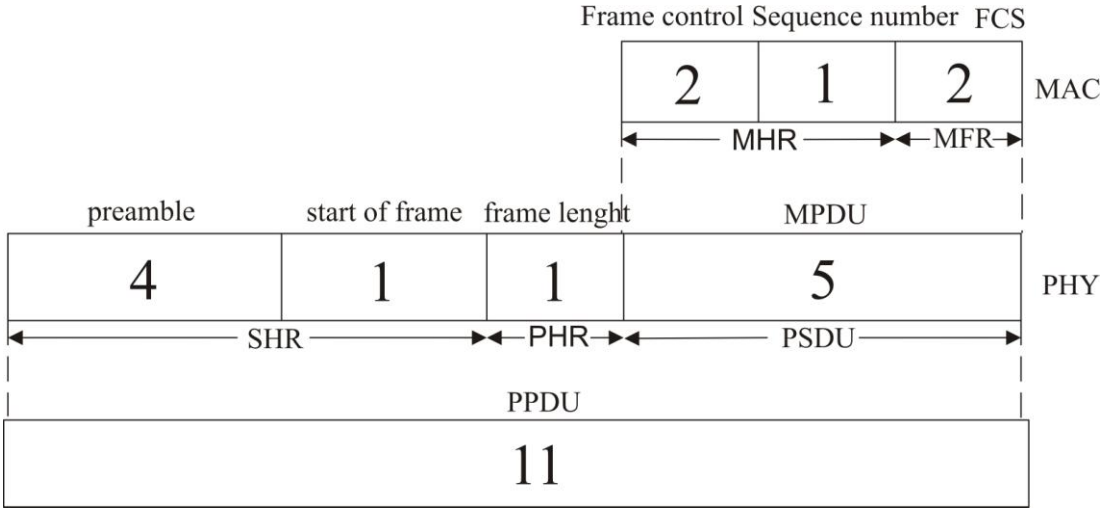
802.15.4 + DIGI HEADER W/ACKS-moodissa toimivan XBee-laitteen täyden pakettikehyksen lähetykseen kuluva aika on

$$\frac{(117+5+1)\cdot 8\ b}{250\cdot 10^3\ b/s} = 3{,}936\ \text{ms}$$

Pakettikehyksen lähetykseen kuluva aika on 3,936 ms. silloin kun tiedonsiirtoa ei salata sekä käytetään lyhyitä laiteosoitteita [Jennic, 2006].

3.5.5 Datapaketin vastaanotonkuittaus

Kun vastaanotin vastaanottaa saapuneen paketin, tarkistetaan saapuneen paketin sisältö FCS:n avulla. Mikäli paketin FCS täsmää sekä vastaanoton kuittaus on laitettu päälle, lähettää vastaanotin kuittauspaketin vastaanoton onnistumisen merkiksi. Kuittauspaketti sisältää 11 tavua. Paketin lähettämiseen kuluva aika on 352 µs. Kuittauspaketin lähetyksessä ei hyödynnetä CSMA-CA:ta. Kuittauspakettikehyksen rakenne on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. ACK-pakettikehyksen dataosiot fyysisellä ja MAC-tasolla [Jennic, 2006].

Kuittauspaketin lähetys aloitetaan tilanvaihtoajan kuluttua datapaketin vastaanotosta. IEEE 802.15.4-standardissa tilanvaihtoajan pituudeksi on määrätty 192 µs, tässä ajassa ZigBee-laite ehtii lähetystilasta vastaanottotilaan ja päinvastoin. Vastaanotettu paketti kuitataan ainoastaan, mikäli FCS-tarkastussumma on oikein ja paketinkuittaustoiminto on otettu käyttöön. FCS-tarkastus on toteutettu fyysisellä tasolla, joten tarkastus tapahtuu miltei reaaliajassa. Mikäli datapaketin lähettänyt laite ei vastaanota kuittauspakettia 864 µs sisällä datapaketin lähettämisen päättymisestä, lähettää laite datapaketin uudelleen. Sovelluksessa kaikki datapaketit täyttävät pitkän datapaketin vaatimuksen, joka on MPDU > 18 tavua. Tällöin jokaisen vastaanottokuittauksen jälkeen pidetään vähintään 640 µs mittainen tauko (LIFS) (Long Inter Frame Space), ennen seuraavan mahdollisen datapaketti lähetystä. Viiveen tarkoitus on antaa vastaanottimelle aikaa käsitellä vastaanotettu data. IFS:n kesto on riippuvainen vastaanotetun datapaketin koosta. Alle 18-tavuisten MPDU-pakettien jälkeen seuraa SIFS-periodi (Short Inter Frame Space), joka on vähintään 12 symbolin mittainen (192 µs). Yli 18-tavuisten MPDU-kehysten jälkeen seuraa LIFS, joka on vähintään 40 symbolin mittainen (640 µs). IFS-periodi on samanaikainen toimenpide CSMA-CA:n kanssa, jolloin lyhyempi kestoinen toiminto peittyy pidempi kestoisen toiminnon alle. Radioliikennesekvenssissä näkyvä viive on siis pidempi kestoisen toiminnon mittainen.

3.5.6 Datapaketin uudelleenlähetys

Käytännössä bittivirhesuhde eli BER (Bit Error Rate) ei koskaan ole nolla. Virhetarkistusta käytettäessä tiedonsiirrossa syntyneet virheet havaitaan. Useasti virheenkorjaus vaatii paljon laskentatehoa. Tästä syystä pakettipohjaisiin tiedonsiirtoprotokolliin on implementoitu paketin uudelleenlähetys algoritmi. XBee-moduulien tapauksessa paketin uudelleenlähetysalgoritmi on toteutettu siten että datapaketin lähettänyt ZigBee-laite odottaa ACK-pakettia *macAckWaitDuration*-pituisen ajanjakson, joka vastaa 54:n symbolin kestoa (864 µs). Mikäli kuittauspakettia ei kyseisen periodin kuluessa vastaanoteta, lähetin lähettää datapaketin uudelleen. Mikäli ACK-ominaisuus otetaan käyttöön, IEEE 802.15.4-standardi rajaa pakettien uudelleenlähetyskertojen määrän kolmeen. Mikäli kolmannen uudelleenlähetyskerran jälkeen paketin lähettäjä ei vastaanota paketin kuittausta, luovutaan paketin lähettämisestä kokonaan. 802.15.4 + DIGI HEADER W/ACKS käytetään mahdollisten duplikaatti pakettien havaitsemiseen. 802.15.4 + DIGI HEADER W/ACKS MAC-moodin käyttö mahdollistaa pakettien uudelleenlähetyksen, jota on mahdollista käyttää lisäkertoina 802.15.4-standardissa määritellyille kolmelle uudelleenlähetykselle. Tätä ominaisuutta ei kuitenkaan hyödynnetä, koska toiminnon vasteaika on aivan liian suuri käytettäväksi sovelluksessa.

3.5.7 Efektiivinen hyötydatan siirtonopeus

Todellinen siirtonopeus lasketaan realistisessa ympäristössä tapahtuvalle liikenteelle, jossa oletetaan tapahtuvan pakettien sisällön korruptoitumista, jolloin paketin uudelleenlähetystä tarvitaan. Oletetaan tilanne, jossa jokainen paketti täytyy lähettää kolme kertaa uudelleen. RF-linkissä pätevät seuraavat määritykset.

- Ei majakkajaksolla synkronoitua kanava-ajan varausta.
- CSMA/CA-algoritmi toteaa kanavan olevan heti vapaa 802.15.4-standardin mukaisesta liikenteestä (Signal Detection), paketti lähetetään heti.
- Jokainen paketti joudutaan lähettämään kolme kertaa uudestaan.
- Maksimi hyötydatan määrä on 100 tavua.
- Käytetään 16-bittisiä laiteosoitteita.

- Liikennettä ei salata AES-algoritmilla.

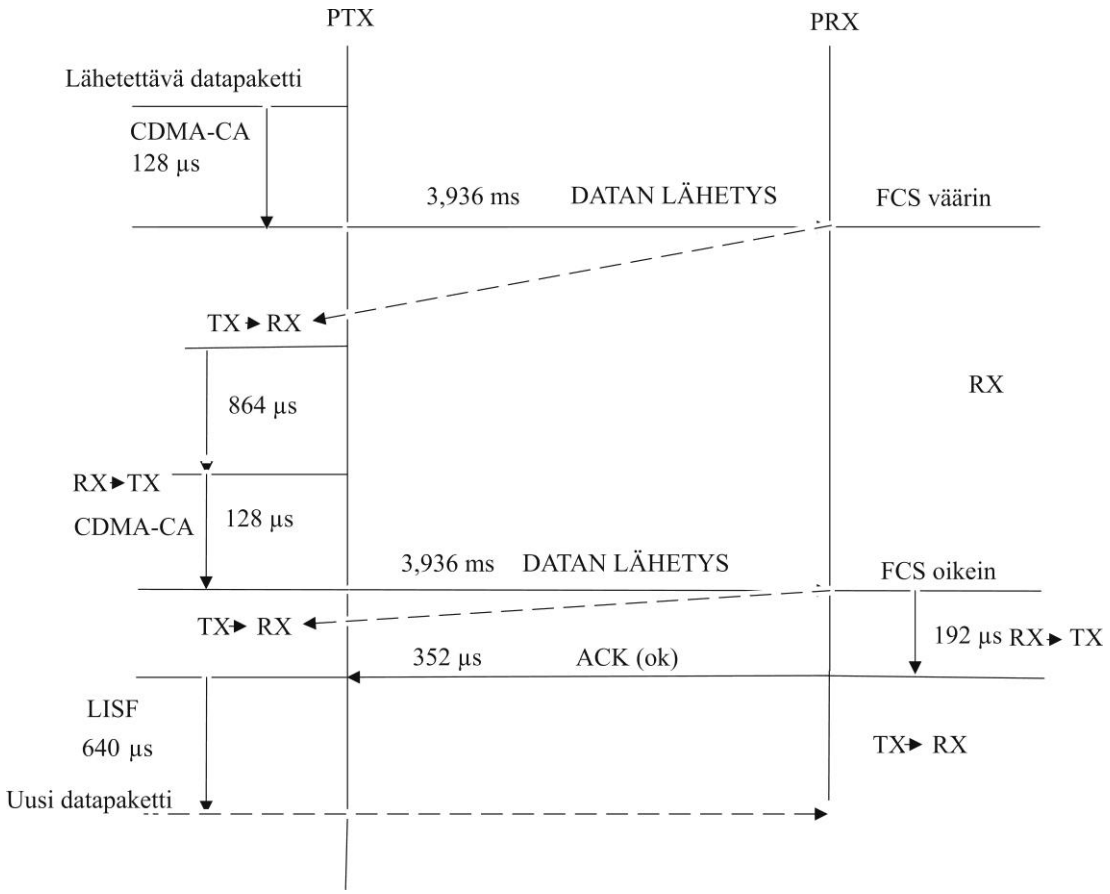
Hyötydatan kaistanleveys saadaan jakamalla siirrettävän hyötydatan määrä edellä määritettyyn lähetyssekvenssiin kuluvalla ajalla. Lähetettäessä paketti kolme kertaa uudelleen kokonaisliikenne aika on:
CSMA-CA 320 µs (*backoff*-eksponentti 1) datapaketin lähetys 3936 µs, koska ensimmäisellä lähetyskerralla datapaketti ei läpäise FCS-tarkastusta, ACK-kuittausta ei lähetetä. PTX (Primary TX) odottaa kuittauspakettia 864 µs, jonka jälkeen datapaketti lähetetään uudestaan. CSMA-CA 320 µs datapaketin lähetys 3936 µs. Tämä toistuu kolme kertaa, jonka jälkeen FCS-tarkastussumma täsmää, joten PRX (Primary RX) odottaa 192 µs, jonka jälkeen lähettää ACK-paketin 352 µs. Koska siirrettyn datapaketin MPDU > 18 tavua, vaatii vastaanotin 640 µs aikaa vastaanotetun datan käsittelyyn. Tällöin kokonaisliikenne jaksonkestoksi saadaan $(320\ \mu s + 3936\ \mu s + 864\ \mu s) \cdot 3 + 3936 \mu s + 192\ \mu s + 352\ \mu s + 640\ \mu s =$ $20{,}480\ \mathrm{ms}$. Pakettin lähetyssekvenssi kolmella uudelleen lähetyksellä kestää 20,480 ms. On huomioitavaa että mikäli laskettaisiin toistuvaa lähetyssekvenssiä, seuraavan lähetettävän datapaketin CSMA-CA-jakso peittyy edellisen datapaketin käsittelyn vaatimaan LIFS-periodin alle. Oletetaan kuitenkin että lähetettävien datapakettien välillä esiintyy pieni tauko, jolloin CSMA-CA ja LIFS- jaksot eivät ole päällekkäisiä. Tällöin efektiivinen tiedonsiirtonopeus lasketaan yhtälöllä 38

$$C_{\mathrm{PL}} = \frac{b_{\mathrm{payload}}}{T_{\mathrm{transmit}}} \tag{38}$$

Hyötydatan siirtonopeudeksi saadaan

$$C_{\mathrm{PL}} = \frac{98 \cdot 8\ b}{20{,}480\ \cdot 10^{-3}\ s} \approx 38{,}3\ \mathrm{kb/s}$$

Datapaketin lähetyssekvenssi on esitetty kuvassa 13. On huomioitavaa, että kuvassa esitetyssä radioliikennesekvenssissä paketti lähetetään vain kerran uudelleen.



Kuva 13. Datapaketin lähetyssekvenssi, jossa suoritetaan paketin uudelleenlähetys. Datan pituus pakettikehyksessä on 100 tavua [Jennic, 2006].

Voidaan todeta että 38,3 kb/s >> 16 kb/s, jolloin tiedonsiirtolinkiltä edellytetty kaistanleveysvaatimus täyttyy, vaikka jokainen paketti jouduttaisiin lähettämää kolme kertaa uudelleen. Täyden pakettikehyksen lähetyssekvenssiin kuluva aika on n. 20,480 ms. Paketti tulee lähettää kerran 49 ms:ssa. Arvioidaan kuinka suuren osan kokonaisajasta radiopiirissä on toimintaa

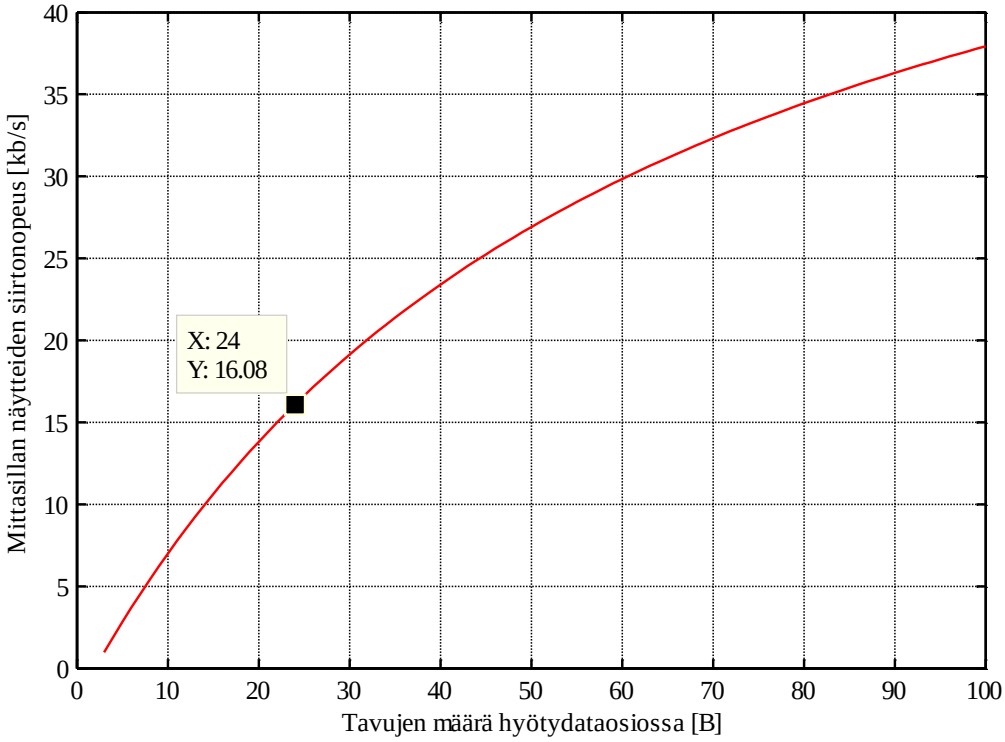
$$\frac{20{,}896\ \text{ms}}{49\ \text{ms}} \cdot 100\ \% \ = \ 42{,}6\ \%$$

Tällöin radio on toimettomana keskimäärin $100\ \% - 42{,}6\ \% \ = \ 57{,}4\ \%$ ajasta. ZigBee-protokolla mahdollistaa pakettien vastaanoton kuittauksen sekä uudelleenlähetyksen. Kuittaus- ja uudelleenlähetystoimintoja kannattaa hyödyntää, mikäli se vain suinkin vapaan kanava-ajan puitteissa on mahdollista. ZigBee-protokollassa paketin uudelleenlähetys suoritetaan, mikäli ACK-pakettia ei

vastaanoteta määrätyn ajan kuluessa. On huomioitavaa että uudelleenlähetysten määrää voidaan kasvattaa sekä hyötydatan osionpituutta voidaan pienentää. Näillä muutoksilla tiedonsiirron toimivuutta on mahdollista parantaa ilman että kaistanleveys laskee vaadittua kaistanleveyttä pienemmäksi. On huomioitavaa että arviossa siirtotein oletettiin olevan välittömästi vapaa, jolloin kanavan vapautumista ei tarvitse odottaa, mikäli kanavalla esiintyy muuta liikennettä, datapaketin lähetystä joudutaan lykkäämään. Mikäli siirtotien tila on oletetunlainen, voidaan siirtotien kaistanleveyden puitteissa näytteistystaajuutta tarvittaessa nostaa.[Jennic, 2006]

”Lähetettävän datamäärän kasvattaminen oletettavasti kasvattaa pakettivirhesuhdetta, koska yhden paketin lähettämiseen kuluva aika kasvaa. Luonnollisesti myös tiedonsiirtonopeus kasvaa, koska hyötydatan osuus kokonaistiedonsiirrosta on suurempi”.[Särkimäki V, 2006]

Koska kanava-aikaa ei täysin varata, voidaan hyötydata tavujen määrää pakettikehystä kohden vähentää. Arvioidaan teoreettinen minimi hyötydatamäärälle, joka on vähintään sisällytettävä pakettikehykseen, että haluttu kaistanleveysvaatimus vielä täyttyisi. Oletetaan siirtotien tilan olevan samanlainen kuin aiemmin määritettiin. Siirrettävien datapakettien halutaan olevan keskenään samanlaisia, eli riippumatta venymäliuska-anturilta puskuroitujen näytteiden määrästä, jokainen paketti sisältää lämpötilamittauksen. Teoriassa tämä asettaa alarajan paketin koolle, joka voi olla pienimmillään neljä tavua. Lasketaan millä hyötydatan määrällä kanava-aika saadaan teoriassa riittämään, kun varaudutaan suorittamaan kolme paketin uudelleenlähetystä. Teoriassa kaistanleveyden voidaan todeta olevan riittävä, mikäli siirtotien efektiivinen kaistanleveys on > 16 kb/s. On huomioitavaa että hyötydataosiossa siirretään myös kaksitavuinen lämpötila-arvo. 16 kb/s siirtonopeuden tulee täyttyä ilman että lämpötila näytettä luetaan hyötydataksi. Lämpötilamittaustavut täytyy kuitenkin sisällyttää pakettikehyksen lähetyssekvenssin keston laskentaan. Kuvassa 14 on esitetty eri hyötydatamäärillä saavutettava efektiivinen kaistanleveys.



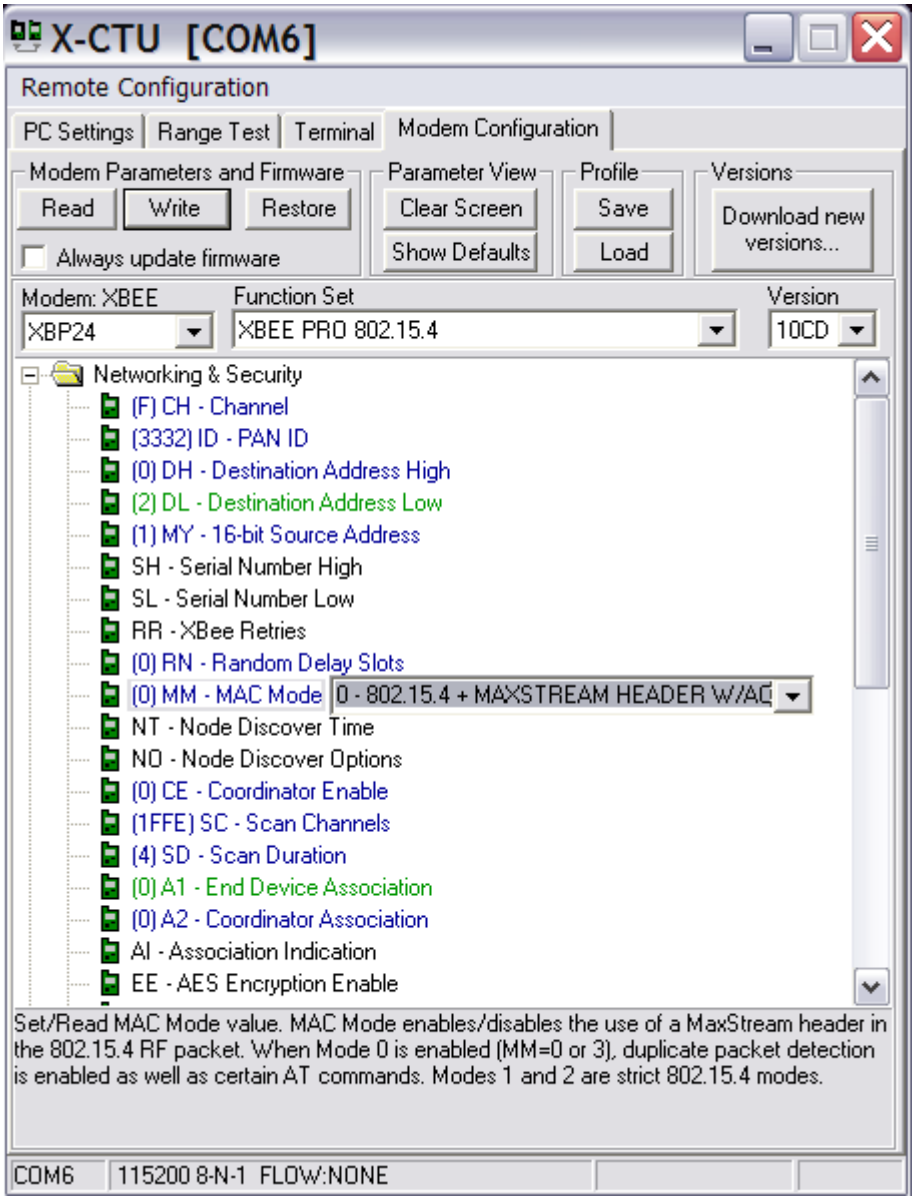
Kuva 14. XBee-moduulien välisen RF-yhteyden efektiivinen kaistaleveys hyötydataosion pituuden funktiona. Hyötydataosio käsittää venymäliuskamittasillalta otetut näytteet sekä lämpötilamittaus arvon. Siirtonopeus on laskettu venymäliuskamittasillan pakettikehyskohtaisen näytemäärän mukaan.

Kuvasta 14 nähdään että siirtonopeusehto > 16 kb/s täyttyy kun pakettikehykseen sisällytetään n. 22 venymäliuskamittasillalta saatua tavua, eli 11 näytettä. Tällöin yhdessä pakettikehyksessä siirretään 11 ms pituinen mittausjakso. [Jennic, 2006]

3.5.8 XBee-moduulin ohjelmointi

XBee-moduuleiden toiminnallisuuden määrittely fyysisen tason parametreja myöten tapahtuu ohjelmallisesti. XBee-moduulien ohjelmointiin on olemassa graafisella käyttöliittymällä varustettu ohjelma. Digi International:n tarjoama ohjelma on nimeltään X-CTU. Käyttämällä kyseistä ohjelmaa vältytään XBee-moduulien ohjelmointiohjelman kirjoittamiselta. [X-CTU, 2008], [XBee Pro, 2008]. XBee-moduulit sisältävät FLASH-muistin, jolloin parametriasetukset säilyvät laitteen muistissa vaikka käyttöjännite katkaistaan. Näin ollen moduulin ohjelmointi suoritetaan vain käyttöönottovaiheessa. Kuvassa on esitetty X-CTU-ohjelman ohjelmointi-ikkuna, jossa jokaisen parametrin kohtaan voidaan asettaa haluttu arvo. Parametrien ohjelmointi XBee-moduulille tapahtuu painamalla *Write*-nappulaa.

Lisäksi nykyiset XBee-muduulin sen hetkiset asetukset voidaan lukea moduulin muistista *Read*-nappulaa painamalla. On huomioitavaa että XBee-moduulien ohjelmointi voidaan suorittaa millä tahansa XBee-laudalla. Kuvassa 15 on esitetty XBee-moduulien ohjelmointiin ja testaukseen tarkoitetun X-CTU-ohjelman graafinen ohjelmointiliittymä [X-CTU, 2008].



Kuva 15. XBee-moduulin ohjelmointivälilehti X-CTU-ohjelmassa.

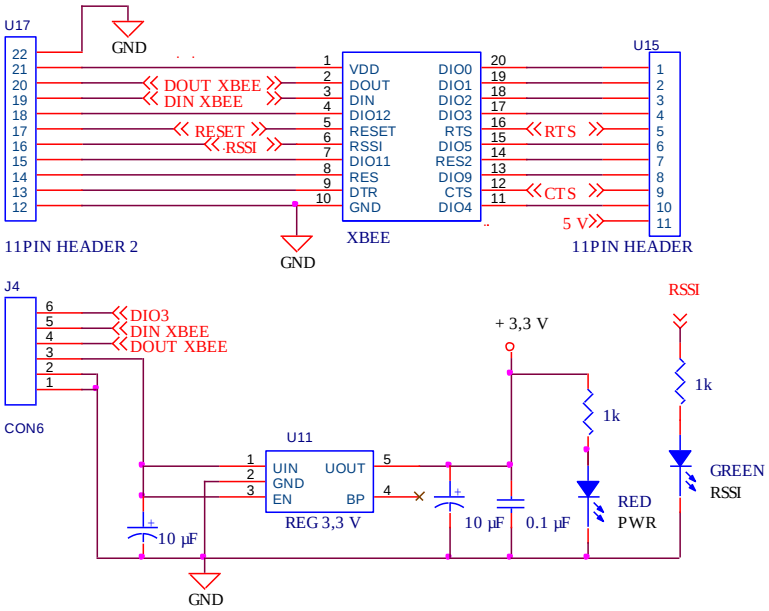
Modem Configuration-välilehdellä valitaan halutut parametriarvot alasvetovalikoista. Parametrit ovat riippuvaisia siitä, että onko ohjelmoitava XBee-moduuli lähetin vai vastaanotin. Moduulikohtaiset parametrit on listattu taulukkoon 7 [X-CTU, 2008].

Taulukko 7. Prototyyppijärjestelmässä käytettävät moduuleihin ohjelmoitavat parametrit.

	Lähetin	Vastaanotin	Funktio
Channel	F	F	Liikenne kanava
Destination address low	1	2	Vastaanottajan osoite
MY address	2	1	Moduulin oma osoite
XBee Retries	0	0	Lisä uudelleenlähetysten määrä
Random Delay Slot	1	1	Kanavan varaus *Backoff*-eksponentti
Mac Mode	0	0	Pakettikuittaus ja duplikaattien havainnointi
Interface Data Rate	7	6	(7) 115,2 kb/s, (6) 57,6 kb/s
PWM0 Configuration	1	1	RSSI-indikaattori LED käyttöön
PWM Output Timeout	1	1	
RSSI PWM Timer	1	1	

3.5.9 Lähetin ja vastaanotin

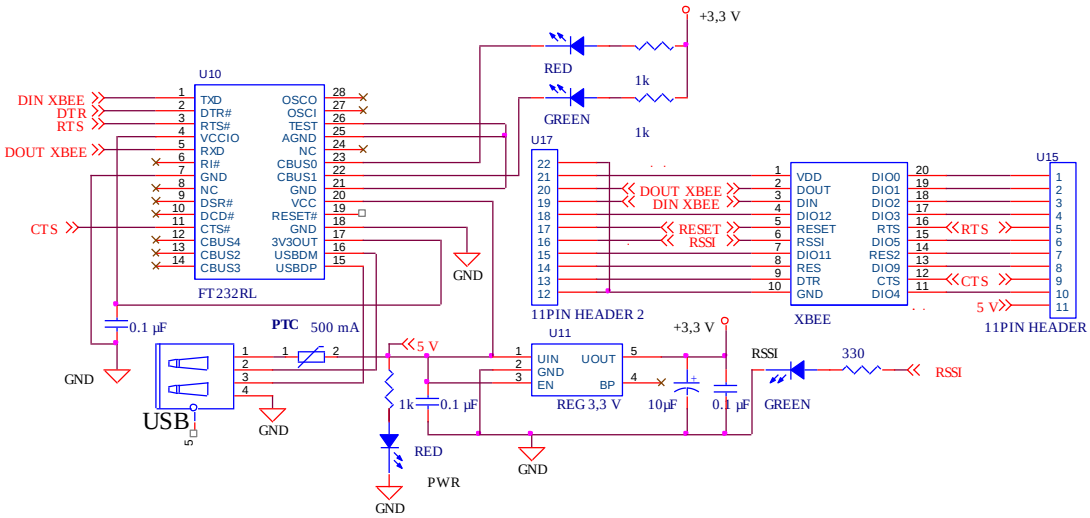
XBee-moduuleille on saatavana valmiita kytkentäalustoja. Kytkentälautoihin on tyypistä riippuen asennettu jänniteregulaattoripiiri sekä toiminnallisuudesta ilmoittavat merkki LED:ja (Light Emitting Diode). Kytkentälaudoissa on myös liityntärajapinta. Liityntärajapinta vaihtoehtoja ovat USB (Universal Syncronous Bus), RS-232 sekä USART. Lähetin moduulissa käytetään USART-väyläliityntäistä kytkentälautaa. Lähetin moduulin kytkentäalustan piirikaavio on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Mittausjärjestelmän mittausyksikön XBee-moduulin kytkentälaudan piirikaavio.

On huomioitavaa että XBee-moduulien I/O- jännite on 3,3 V CMOS- standardin mukainen. Vaikka ATmega-128 toimiikin 5 V TTL-jännitetasolla on tiedonsiirtolinkki USART:n välityksellä toimiva molempiin suuntiin. Eli 3,3 V CMOS-jännitetasolla voidaan siirtää tietoa myös µC:n suuntaan. [XBee-regulated, 2009]

Vastaanottimen XBee-kytkentälaudalla 3,3 V USART-liikenne muunnetaan USB-protokollan mukaiseksi liikenteeksi. USB-väylän välityksellä vastaanotinmoduuli kommunikoi PC:n kanssa. On huomioitavaa että vaikka liikenne väylällä on USB-protokollan mukaista, PC:n käyttöliittymän näkökulmasta tiedonsiirto näyttää RS-232-liikenteeltä. Kuvassa 17 on esitetty vastaanottimessa käytetyn XBee-laudan kytkentäkaavio.



Kuva 17. Mittausjärjestelmän vastaanotinyksikön XBee-moduulin kytkentäkaavio.

On huomioitavaa että kytkentäkaavoissa ei esitetä XBee-moduulien sisäisiä kytkentöjä, ainoastaan moduulien liityntärajapinnat. Moduulien sisäiset kytkennät sekä lohkokaaviokuvat löytyvät Digi International kotisivulta [DIGI International, 2006], [XBee-Explorer, 2008], [FTDICHIP].

3.5.10 XBee-moduulin lähetysteho

Käytettäessä radiolähettimiä on varmistuttava siitä, ettei voimassa olevia säännöksiä rikota. Euroopan alueelle yleiset taajuusjako- ja radiomääräykset antaa ETSI (European Telecomminication Standard Institute), ETSI:n antamia säännöksiä voi

halutessaan rajata jokaisen maan telehallinto. Suomessa radiolain alueellisista säädöksistä vastaa Ficora. Ficoran mukaan 2,4 GHz ISM-taajuuskaistalla suurin sallittu lähetysteho on 100 mW EIRP [Ficora, Lindfors, Sähköposti](effective Isotropic Radiation Power, käytetään myös: Equivalent Isotropic Radiotion Power). Toisaalta ETSI-standardin EN 300 326 mukaan DSSS-kanavointia käyttävien laitteiden keskimääräinen lähetysteho on rajattu 10 mW / MHz. Tällöin XBee:n käyttämän kaistanleveyden ollessa 5 MHz, lähetysteho saa olla maksimissaan 50 mW [ETSI]. EIRP ottaa huomioon antennikaapelissa tapahtuvan vaimennuksen sekä antennissa tapahtuvan näennäisen vahvistuksen. Passiivisena järjestelmäosana antenni ei vahvista signaalia, vaan keskittää säteilytehon antennille ominaiseen säteilykuvioon. Näin ollen jossain suunta-antennin säteilykuviosta riippuvassa kaukokentän pisteessä saavutetaan antennijärjestelmästä riippumaton signaalin voimakkuus. Toisin sanoen suunta-antennia ei voida hyödyntää signaalin voimakkuuden kasvattamisessa, koska vastaavasti lähettimen lähtötehoa on pudotettava samassa suhteessa. Sen sijaan suunta-antennin käyttö point-to-point linkissä vaimentaa muita ei toivottuja radiosignaaliin etenemiseen kuuluvia ilmiöitä, kuten monitie-etenemistä sekä mahdollisesti sivussa olevien häiritsevien lähettimien vaikutuksia. Lasketaan vaikuttaako tehosäädös mittausjärjestelmän tapauksessa rajoittavasti järjestelmään. Tiedetään että EIRP lasketaan yhtälöllä 39

$$EIRP = P_{\text{out}} + D_{\text{cable}} + G_{\text{ant}} \tag{39}$$

missä P_{out} on XBee-moduulin pääteasteen RF-teho, D_{cable} kaapelin vaimennus sekä G_{ant} antennin vahvistus pääkeilan suuntaan. Tiedetään että 100 mW vastaa 20 dBm tehosuhdetta. Lisäksi liuska-antennin vahvistus on noin -13 dBd [Antenna, 2005]. Kaapelihäviöitä ei tarkastelukohteessa esiinny.

$$P_{out} = 100\ mW + 0 - (-13\ dBd + 2{,}14\ dBi) = 1{,}53\ W$$

Lähettimen pääteasteen lähetysteho saa liuska-antennilla olla enintään 1,53 W. Logaritmiasteikolla tämä vastaa n. 31,8 dBm tehoa. Liuska-antennia käytettäessä voidaan XBee-PRO:n lähetysteho valita sovelluksen edellytysten mukaan, sillä XBee-PRO:n pääteaste antaa maksimissaan +17 dBm:n lähetystehon. On huomioitavaa että käytettäessä esimerkiksi RPSMA-monopoliantennia (Reverse

Polarity SMA) XBee-moduulin lähetystehoa joudutaan rajoittamaan. Esim. 5 dBi:n vahvistuksen omaavaa monopoliantennia käytettäessä voidaan käyttää enintään

$$P_{\text{out}} = 100\ \text{mW} - (5\ \text{dBi}) = 32\ \text{mW}$$

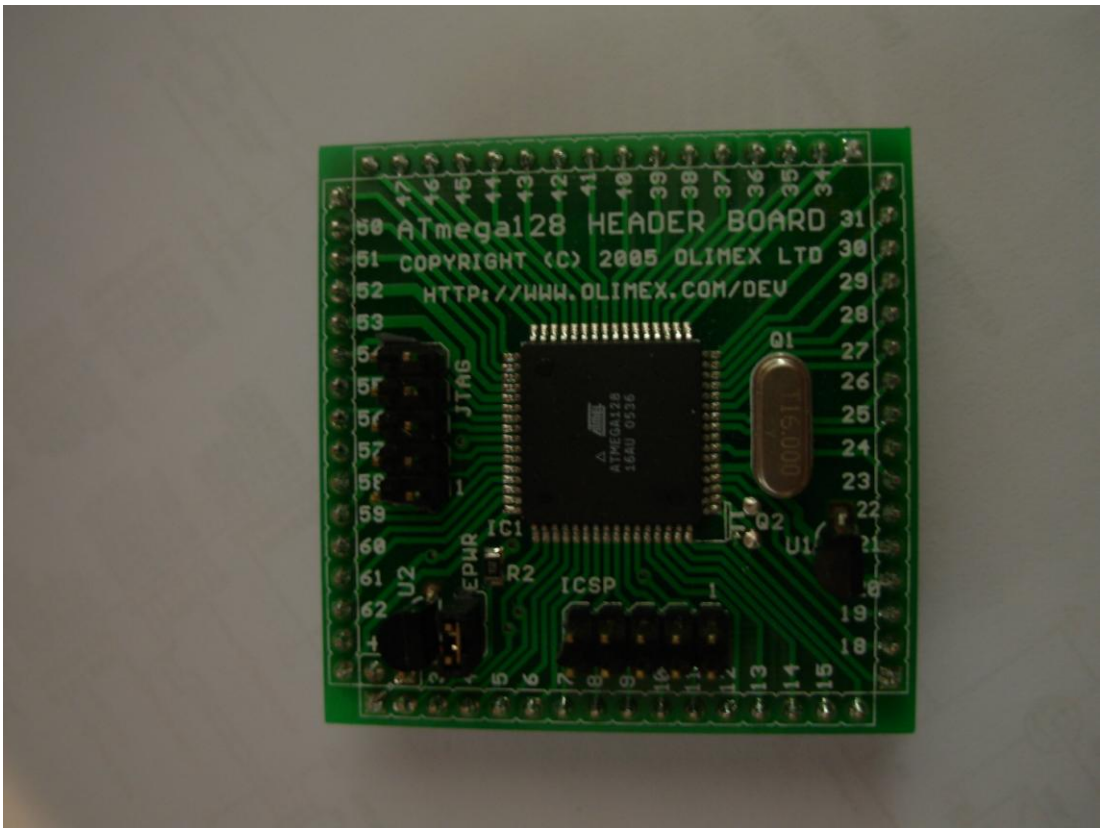
Asia korostuu mikäli järjestelmässä käytetään suunta-antenneja, jotka omaavat suuren vahvistuksen.

3.6 Järjestelmän toiminta

Tässä kappaleessa tarkastellaan mikrokontrollerille implementoitu toiminnallisuus. sekä mittausjärjestelmän digitaaliosan fyysinen rakenne XBee-moduulit pois lukien, XBee-moduulien toiminnallisuus käsiteltiin edellisessä kappaleessa. Lisäksi esitellään järjestelmän moduulien yhdistys ja tukiosana käytetyn oheiskomponenttilevyn rakenne ja sille sijoitettu toiminnallisuus. Lisäksi käydään läpi mikrokontrollerin ohjelmointi.

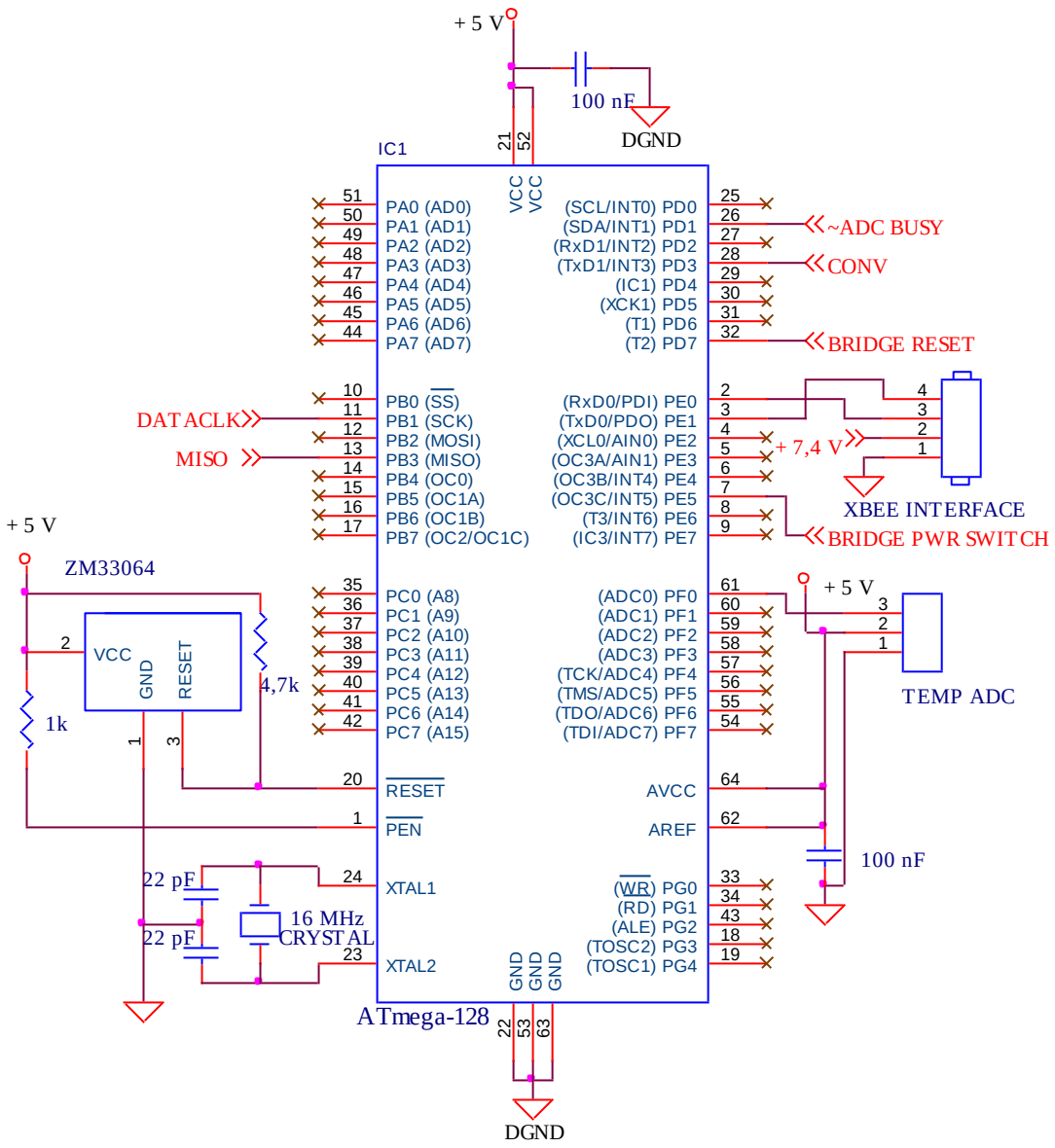
3.6.1 Mikrokontrolleri

Mittauselektroniikan ohjaamiseen käytetään kahdeksanbittistä Atmel AVR ATmega-128-mikrokontrolleria. ATmega-128 sisältää USART-lähetinvastaanottimen lisäksi myös SPI-toimilohkon (Serial Peripheral Interface), joita molempia tarvitaan järjestelmänosien välisissä tiedonsiirroissa. USART-väylää käytetään radiomoduulin ja mikrokontrollerin välisessä tiedonsiirrossa, kun taas SPI-väylää A/D-muuntimen ja mikrokontrollerin välillä. ATmega-128 sisältää myös ohjelmoitavia I/O-portteja, jotka voidaan ohjelmoida tuloiksi tai lähdöiksi. ATmega-128 ohjelmoidaan prototyyppi vaiheessa STK500/501-ohjelmointilautaa käyttäen. ATmega-128 tukee myös JTAG- (Joint Test Action Group) sekä ICSP-ohjelmointia (In Circuit Serial Programming). Mikrokontrollerin ohjelmakehitysvaiheen jälkeen järjestelmäprototyypissä käytetään OLIMEX:n valmistamaa µC-korttia (AVR-H128C), joka liitetään piikkirimoilla oheiskomponenttilevyyn. AVR-H128C on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. AVR-H128C µC-kortti.

Kuvasta 18 mikrokontrollerikortin fyysinen rakenne. On huomioitavaa että piirikortissa ei ole piirikortin kiinnittämiseen tarkoitettuja reikiä. Kontrollerikortin kiinnitys tapahtuu kortin alapuolella sijaitsevilla piikkirimoilla, jotka samalla toimivat I/O-portteina. Kuvassa 19 on esitetty AVR-H128C-kontrollerilevylle sijoitetut oheiskomponentit sekä liityntärajapinnat järjestelmän muihin osiin.



Kuva 19. ATmega-128 mikrokontrollerin liityntärajapinnan kytkentäkaavio.

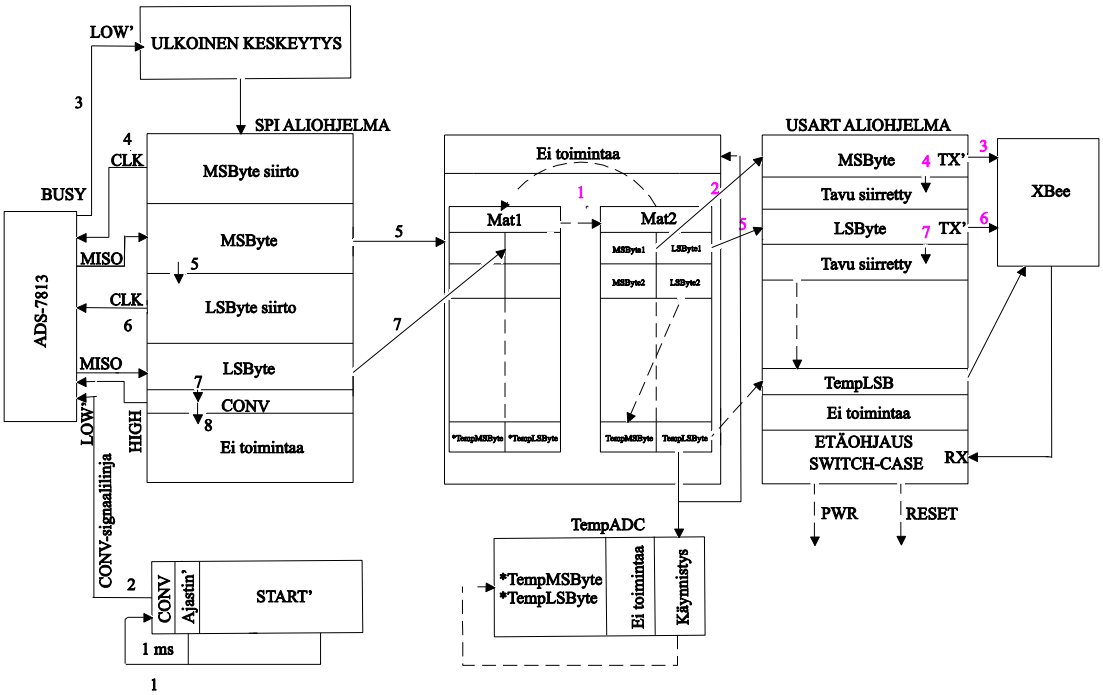
Kuvassa 19 esitetyssä kytkennässä oskillaattori sekä reset-piiri sijaitsevat AVR-H128C-piirikortilla. Samalle kortille on asennettu myös jänniteregulaattori. AVR-H128C-piirikortilla olevaa jänniteregulaattoria ei kuitenkaan käytetä, vaan se ohitetaan hyppylangalla. Kortin oman regulaattorin sijasta käytetään oheiskomponenttilevylle asennettua LT1761 LDO-jänniteregulaattoria (Low Drop Out). Tällöin varmistutaan siitä että, käyttöjännite on sama sekä mikrokontrollerille että A/D-muuntimelle. Lisäksi oheiskomponenttilevylle asennettu LT1761-LDO on virransyöttökyvyltään AVR-H128C-kortilla olevaa jänniteregulaattoria parempi.

3.6.2 Mikrokontrollerin toiminta

Mikrokontrollerin tehtävä on toimia A/D-muuntimen ajastimena, puskurirekisterinä sekä lämpötilan mittaajana. Venymäliuskamittasillalta otetut signaalinäytteet puskuroidaan ZigBee-protokollan pakettikehyksen vaatimusten mukaan siten että jokainen pakettikehys sisältää maksimimäärän hyötytavuja. Tällöin RF-linkin siirtokapasiteettia hyödynnetään parhaalla mahdollisella tavalla. Mikrokontrolleriin on luotu kaksi 100-tavuista 50 X 2 puskurimatriisia, joita täytetään ja puretaan vuoron perään. Venymäliuskamittasiltavahvistimelta tulevaa analogiasignaalia näytteistetään 1 kHz:n vakiotaajuudella. Näytteenotto ajastetaan mikrokontrollerin ajastimella luotavalla keskeytyksellä, joka asetetaan tapahtuvaksi yhden millisekunnin välein. Keskeytysaliohjelmassa käynnistetään A/D-muunnos vetämällä CONV-signaalilinja alas. A/D-muunnin ilmoittaa näytteen valmistumisesta BUSY-signaalilinjan ylösvedolla. BUSY-signaalin nousevalla reunalla käynnistetään ulkoisensignaalin ISR, (Interrupt Service Routine) INT1_vect. Kyseisessä keskeytysaliohjelmassa käynnistetään MSByte:n siirto A/D-muuntimelta µC:lle SPI-väylää pitkin. SPI-liikennejakson päättyessä suoritetaan SPI-väyläliikenteen päättymisen ISR, SPI_DTC_vect. Tässä keskeytysaliohjelmassa käynnistetään LSByte:n siirto. Lisäksi puskurimatriisin soluosoittimen arvoa kasvatetaan yhdellä. Matriisiin puskuroidaan yhteensä 100 tavua, joista kaksi viimeistä sisältää lämpötilamittauksen arvon. Näin olleen pakettiin sisällytetään 49 kappaletta kaksitavuisia venymäliuskamittasillalta otettuja signaalinäytteitä. Puskurimatriisin täyttyessä käynnistetään matriisin sisällön siirto USART-väylää pitkin XBee-moduulille. Lisäksi puskurimatriisia vaihdetaan, jolloin varmistutaan siitä että aikaisemmin otettujen näytteiden päälle ei kirjoiteta ennen niiden eteenpäin lähettämistä. USART-toimintasekvenssi on hyvin samankaltainen SPI väylän toimintasekvenssin kanssa. Käynnistyshetken jälkeen sekvenssi toimii automaattisesti. Jokaisen lähetetyn tavun jälkeen suoritetaan USART_TX_vect, jossa USART:n lähetysrekisteriin sijoitetaan uusi tavu. Kun koko puskurimatriisi on lähetetty, siirrytään tyhjäkäyntitilaan, josta herätteenä toimii puskurimatriisien vaihdon yhteydessä asetettava muuttuja. µC:n ohjelmakoodi on esitetty liitteessä 1. µC:n tilakone on esitetty kuvassa 20.

Koska järjestelmän tahdistus tapahtuu näytteidenotolla, eikä toimintasekvenssejä ole käynnistyshetkiä lukuun ottamatta synkronoitu toisiinsa, taataan järjestelmän

toimivuus varmistamalla että tiedonsiirtosekvenssit ovat näytteenottosekvenssiä nopeampia. Käytännössä tiedonsiirtosekvensseissä tulee esiintyä tyhjäkäyntijakso.



Kuva 20. Mikrokontrollerin periaatteellinen tilakonekaavio.

3.6.3 16-bittinen ajastin

Koska ajastimella luotavan 1 ms pituisen jakson halutaan olevan mahdollisimman tarkasti määrätyn mittainen, käytetään ajastimena ATmega-128:n sisään rakennettua 16-bittistä ajastinta. Ajastimella jaksotetaan näytteenoton alkuhetki. Normaalitilassa jokaisella järjestelmäkellonjaksolla Timer/Counter1 kasvattaa ajastimen laskurirekisterin arvoa yhdellä. Saavutettaessa suurin mahdollinen 16 bitillä esitettävissä oleva kokonaisluku, tapahtuu ajastimessa ylivuoto, jolloin ajastin nollataan. Tällöin suoritetaan ajastimen ylivuotokeskeytysohjelma, OVF_vect. Koska ajastin kasvattaa laskurirekisterin arvoa, täytyy laskurirekisteri alustaa siten että 1 ms mittaamiseen tarvittava järjestelmäkellojaksojen määrä on kokonaisluku. [AVR-128, 2009]

Järjestelmäkellon taajuus on 16 MHz ja halutaan luoda 1 ms mittainen laskentasekvenssi. Määrätään järjestelmäkellon esijakajaksi kahdeksan, jolloin tarvittavien laskurijaksojen määrä on

$$8 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 10^{6}} = 2000$$

Esijaettuja kellojaksoja tarvitaan 2000. Nyt laskurirekisteri on alustettava niin että lisättäessä alustusarvoon 2000 tapahtuu ylivuoto. Tiedetään että suurin 16 bitillä esitettävissä oleva kokonaisluku on

$$2^{16} = 65536$$

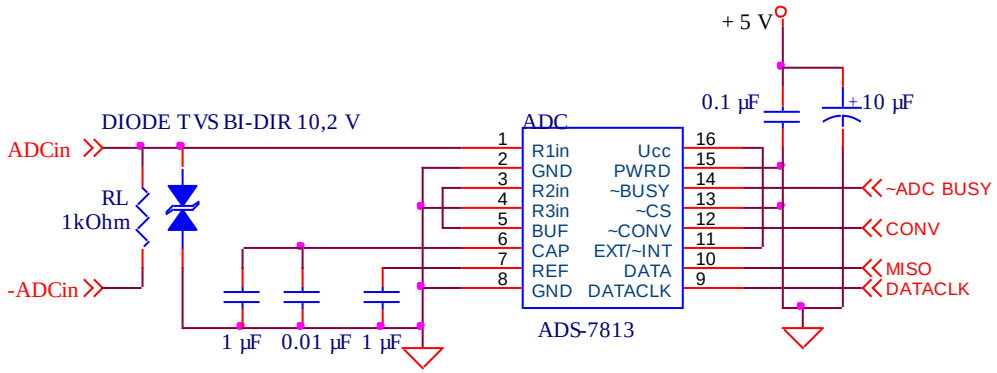
Ylivuoto tapahtuu laskurin arvon ollessa 65536, joten laskuri on alustettava

$$65536 - 2000 = 63536$$

Laskurirekisterin alustusarvo käytettäessä kahdeksankertaista esijakoa on 63536.

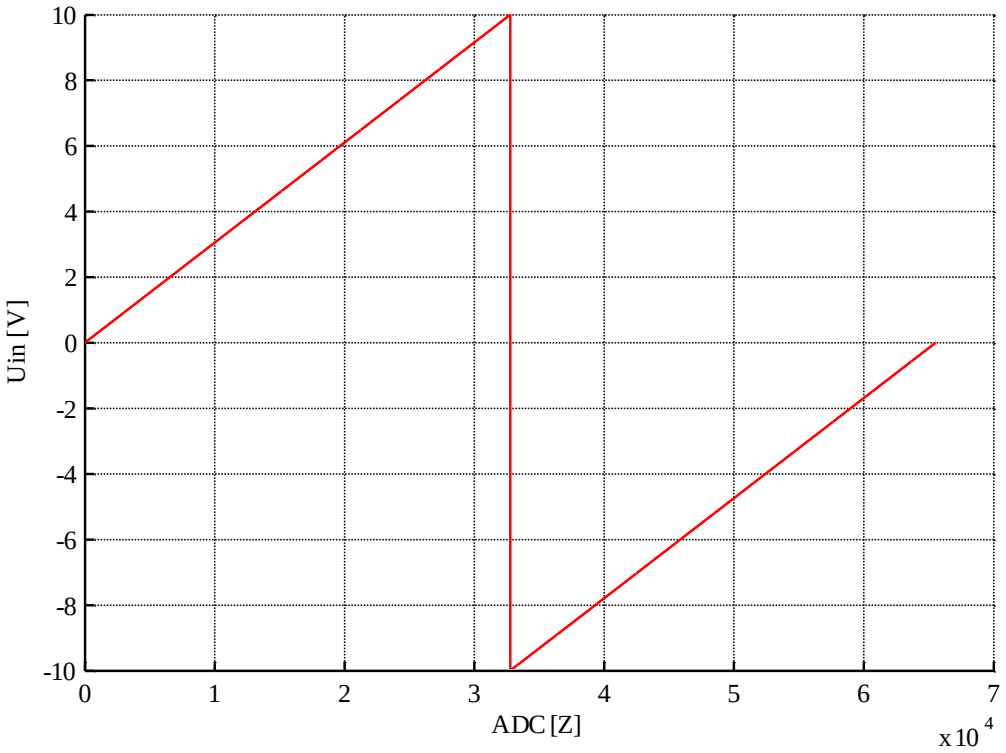
3.6.4 A/D-muunnin ADS-7813

ADS-7813 on 16-bittinen, SAR-tyyppinen A/D-muunnin. Kyseinen A/D-muunnin mahdollistaa suoraan $\pm 10\,V$ tulojännitealueen mittauksen. Mitatun jännitetason etumerkki suhteessa referenssitasoon ilmaistaan A/D-muunnoksen MSB:llä. Kaikissa negatiivisissa signaalin arvoissa MSB on ’1’. Vastaavasti kaikkien positiivisten arvojen LSB:t ovat ’0’. Kuvassa on esitetty A/D-muuntimen tulojännite A/D-muunnoksen arvon funktiona. A/D-muuntimen kytkentärajapinnat muihin järjestelmänosiin on esitetty kuvassa 21



Kuva 21. Venymäliuskamittasiltasignaalin A/D-muuntimen kytkentäkaavio.

Kuvassa 22 on esitetty A/D-muuntimen tulosta mitattavan jännitteen arvo A/D-muunnoksen funktiona.



Kuva 22. A/D-muuntimen tulojännite A/D-muunnoksen arvon 2:n komplementtiesitys.

3.6.5 SPI-väylä

SPI-väylää käytetään liityntärajapintana µC:n ja ulkoisen A/D-muuntimen ADS-7813 välillä, jolla näytteistetään vääntömomenttimittasillalta tulevaa signaalia. SPI-väylästä käytetään vain CLK- ja MISO-linjoja. Sillä µC:lta päin ei siirretä tietoa A/D-muuntimelle. SPI-väylän kellotaajuuden tulee olla riittävä että 16-bittiinen näyte ehditään siirtää A/D-muuntimelta ennen seuraavan näytteen liipaisua. Näytteen siirron lisäksi yhden millisekunnin aikaikkunaan täytyy sisällyttää A/D-muunnokseen kuluva aika, sekä suoritettaviin keskeytysaliohjelmiin kuluva aika. Muunnokseen kuluu aikaa 25 µs. Tiedetään että SPI-väylällä yhden bitin siirtoon kuluu yksi SPI-väylän kellojakso. Määrätään että näytteensiirtoon saa kulua maksimissaan 0,1 ms, jolloin yhden bitin siirtoon kuluva aika on

$$\frac{0{,}1\ \mathrm{ms}}{16\ \mathrm{b}} = 6{,}25\ \mu\mathrm{s/b}$$

SPI-väylän kellotaajuus on

$$\frac{1\ /b}{6{,}25\ \cdot 10^{-6}\ \mathrm{s/b}} = 160\ \mathrm{kHz}$$

160 kHz kellotaajuuden saavuttamiseksi täytyy järjestelmäkellon taajuus esijakaa 100. Koska kyseistä jakajaa ei ole käytettävissä, valitaan kellotaajuuden esijakajaksi lähin mahdollinen käytettävissä oleva luku, joka on 128. Tällöin SPI-väylän kellotaajuus on

$$\frac{16 \cdot 10^{6}\ \mathrm{Hz}}{128} = 125\ \mathrm{kHz}$$

16-bittisen näytteen siirtoon kuluva aika on

$$\frac{16}{125 \cdot 10^{3}\ \mathrm{Hz}} = 128 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{s}$$

Näytteen siirtoon SPI-väylällä kuluu aikaa 128 µS.

3.6.6 USART-väylä

puskurirekisterit sisältävät 49 näytettä, eli 49 ms mittaisen mittaisjakson. Lisäksi paketissa siirretään kaksitavuinen lämpötila-arvo. USART-liikenne käynnistetään siis 49 ms välein, koska lämpötilan mittaus on rinnakkainen prosessi vääntömomentin mittauksen kanssa. Yhdessä puskurirekisterissä on kaiken kaikkiaan 100 tavua, jolloin USART:n siirtonopeuden ollessa 57,6 kb/s paketin siirtämiseen µC:ltä XBee:lle kuluu

$$\frac{100 \cdot 8\ \mathrm{b}}{75600\ \mathrm{b/s}} \approx 13{,}2\ \mathrm{ms}$$

On huomioitavaa että kyseinen aika kuluu bittien siirtoon. Jokaisen tavun siirron jälkeen suoritetaan lähetyksen päättyessä keskeytysaliohjelma, USART0_TX_vect.

Keskeytyksiin kuluva aika on otettava erikseen huomioon puskurirekisterin siirron kestoa arvioitaessa.

3.6.7 Lämpötilamittaus

Koska venymäliuskamittasilta on lämpötilariippuvainen, halutaan lämpötila muutosten kompensoimiseksi mitata. AVR-128:n sisäisen A/D-muuntimen paras tarkkuus saavutetaan silloin kun A/D-muuntimen kellotaajuus on välillä 50 - 200 kHz. Kellosignaalin jako on valittava siten että ihanne kellotaajuus saavutetaan. On huomioitavaa että kyseessä ei ole näytteidenottotaajuus vaan A/D-muuntimen toimintakellon taajuus. A/D-muuntimen alustuksen jälkeistä näytteenottoa lukuun ottamatta näytteen ottamiseen kuluu aikaa 13 A/D-muunninkellojaksoa. Kun järjestelmäkello on 16 MHz, 50 kHz:n taajuus vaatii 320 esijakajan ja 200 kHz taajuuteen päästään 80 esijakajan arvolla. Ainoa mahdollinen käytettävissä oleva esijakajan arvo on 128. Tällöin A/D-muuntimen kellotaajuus on

$$\frac{16000\ \mathrm{kHz}}{128} = 125\ \mathrm{kHz}$$

Lämpötilareferenssin mittaus liipaistaan käyntiin aina, kun puskurirekisteri on siirretty USART: n välityksellä eteenpäin. Tällöin näytteenottamiseen kuluva aika on

$$\frac{13}{125 \cdot 10^3\ \mathrm{Hz}} = 104\ \mu\mathrm{s}$$

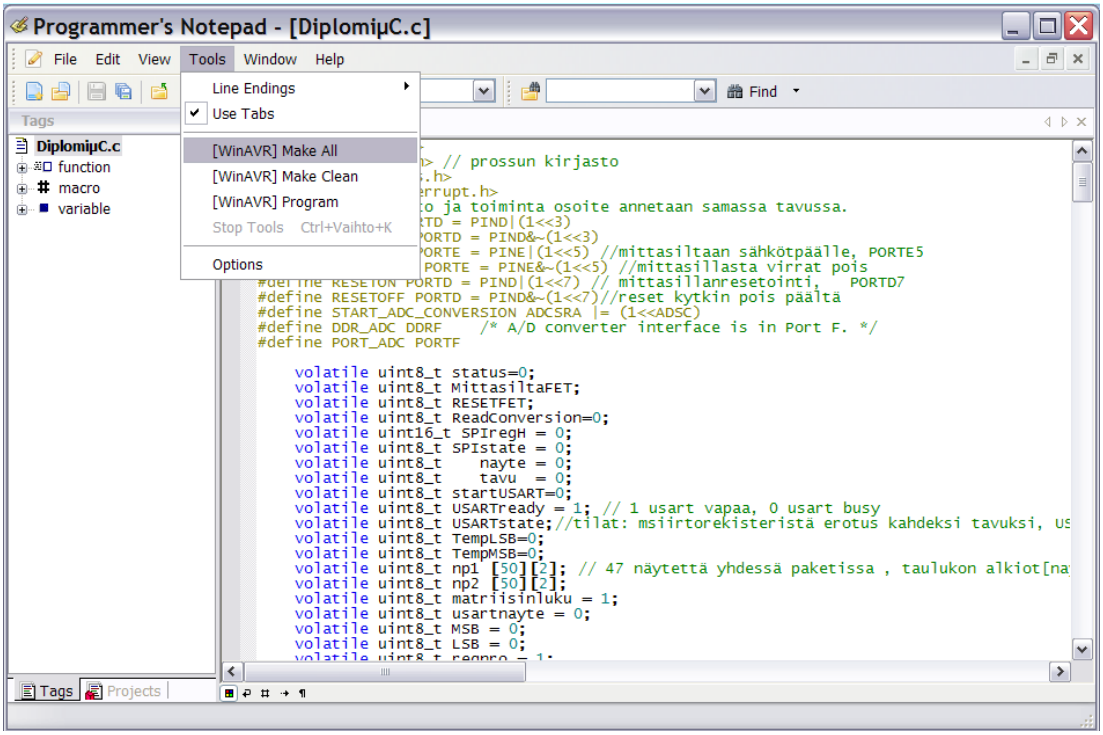
Kun tiedetään että A/D-muunnos käynnistetään USART-liikennejakson päättyessä, voidaan arvioida lämpötila-arvon valmistumisajankohta suhteessa venymäliuskamittasillalta otettaviin näytteisiin.

$$5{,}9\ \mathrm{ms} + 0{,}1\ \mathrm{ms} = 6\ \mathrm{ms}$$

Voidaan arvioida että puskurirekisteriin liitettävä lämpötila-arvo otetaan suurin piirtein samanaikaisesti kuudennen venymäliuskamittasillalta otettavan näytteen kanssa [AVR-128, 2009].

3.6.8 Mikrokontrollerin ohjelmointi

WinAVR-ohjelmaa käytetään ohjelmakoodin kirjoittamiseen ja muokkaamiseen. Ohjelmakoodin tallentamisen jälkeen ohjelmakoodi käännetään HEX-tiedostoksi. On huomioitavaa että kääntämistä varten tarvitaan myös C-tiedostoon linkitetty *make file*-tiedosto WinAVR:n uusimman version voi ladata ilmaiseksi netistä osoitteesta http://sourceforge.net/projects/winavr/files/.

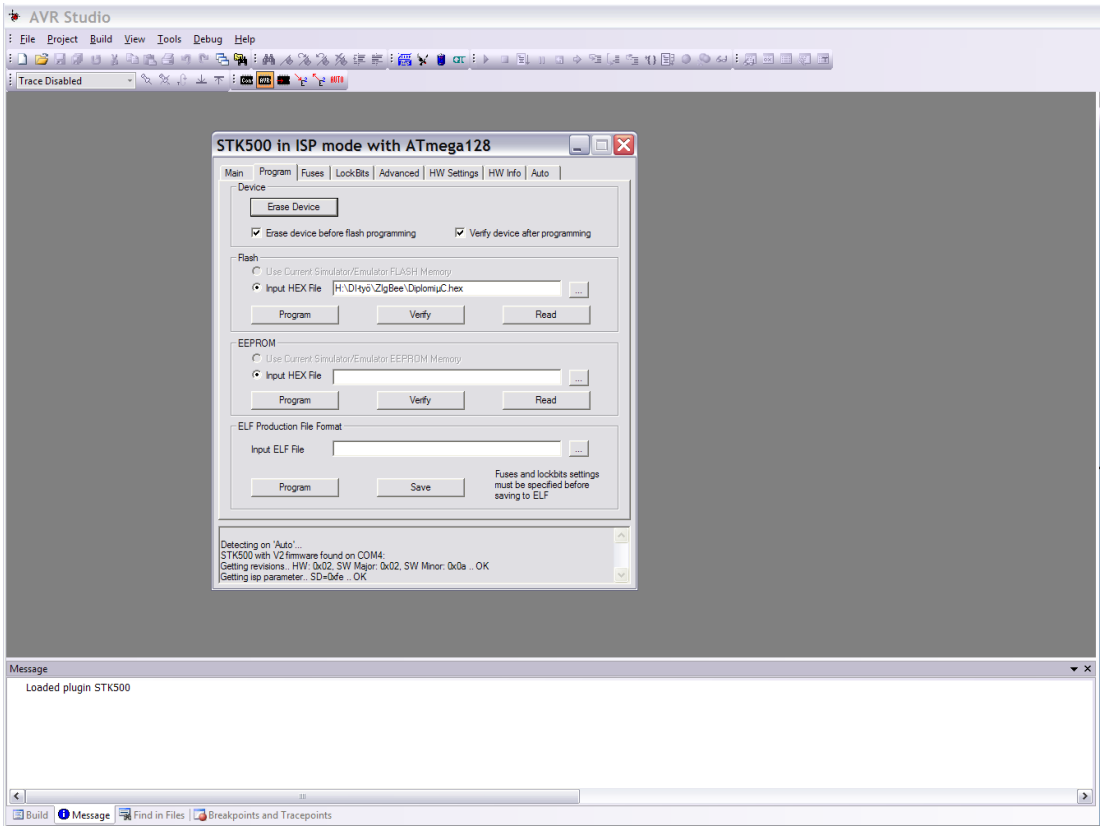


Kuva 23. WinAVR C-koodin kääntäminen HEX-tiedostoksi tapahtuu *Make All* kohdasta *Tools*-Valikosta.

AVR-H128C ohjelmoidaan ICSP-ohjelmointilaitteella. OLIMEX:n valmistama ICSP-ohjelmointilaite on esitetty kuvassa 24.

Kuva 24. ICSP-500-ohjelmointilaite.

HEX-tiedosto ohjelmoidaan AVR-H128C mikrokontrollerilevylle OLIMEX:n ICSP-500-ohjelmointilaitteella, käyttäen AVR Studio-ohjelmaa.



Kuva 25. AVR-H128C µC-moduulin ohjelmointi AVR Studiolla ja ICSP-500 ohjelmointilaitteella.

Uusimman version AVR Studiosta voi ladata Internetistä osoitteesta http://www.atmel.com/dyn/Products/tools_card.asp?tool_id=2725, lataaminen edellyttää rekisteröitymistä. (AVR Studion asennustiedosto sähköisessä muodossa.) On huomioitavaa että ohjelmointilaite ei syötä käyttöjännitettä AVR-H128C-moduuliin, joten µC-moduuli täytyy kytkeä ulkoiseen jännitelähteeseen ohjelmoinnin ajaksi. Sen sijaan SPI-väylän suositellaan olevan kuormittamaton, muutoin väylällä näkyvät kuormat voivat haitata ohjelmointia.

3.6.9 Oheiskomponenttilevy

Järjestelmä rakentamisessa hyödynnetään mahdollisimman paljon moduuleja. Joitakin järjestelmän osia ei kuitenkaan ole saatavilla moduuleina. Lisäksi esimerkiksi AVR-H128C-moduulia ei voida suoraan kiinnittää koteloon, vaan sen tuentaan täytyy suunnitella ja teettää piirilevy. Samalle piirilevylle sijoitetaan kaikki ne komponentit, joita ei ole saatavana moduuleina. Oheiskomponenttilevylle sijoitetaan A/D-muunnin, tehonsyöttö- ja suojauselektroniikka, sekä liityntärimat järjestelmän muihin osiin. Suuresta suunnitteluun kuluvasta työajasta johtuen

piirilevyt ovat yleisesti ottaen kalleimpia yksittäisiä elektroniikassa käytettyjä komponentteja. Kaksipuolisessa piirilevyssä piirilevyvetojen väliset alueet jätetään kuparoiduiksi. Niin kutsutuilla kuparikaadoilla parannetaan piirilevyn häiriönsietokykyä sekä ehkäistään vierekkäisten piirilevyvetojen ylikuulumista. Järjestelmän oheiskomponenttilevyä suunniteltaessa arvioitiin piirilevyllä tapahtuvan tiedonsiirron olevan sen verran hidasta, että piirilevyn suunnittelua nopeutetaan jättämällä siirtolinjateoria huomioimatta. Impedanssiepäjatkuvuuskohdissa tapahtuva signaalin heijastuminen arvioidaan merkityksettömäksi järjestelmän toiminnan kannalta.

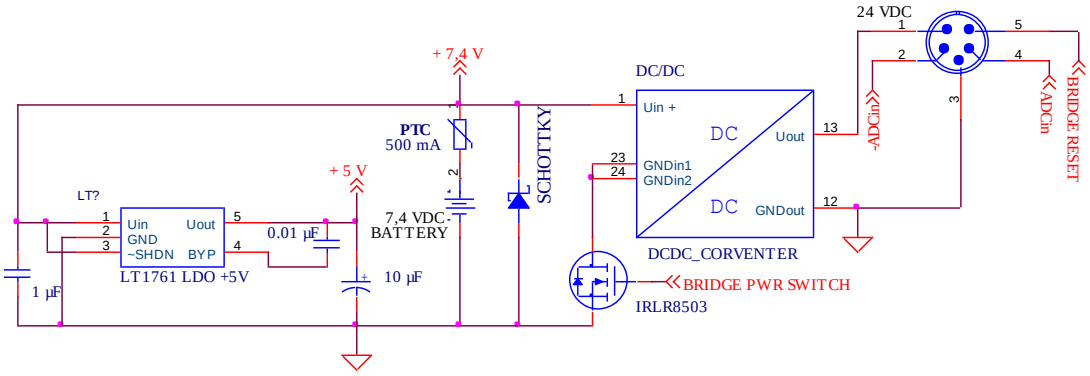
3.7 Elektroniikan suojaus

Järjestelmän tehonsyöttöön kytketään akun väärinpäin kytkennän varalta PTC-vastuksen ja diodin muodostama suojapiiri. PTC-vastuksen vastusarvo kasvaa nopeasti, mikäli virta kasvaa liian suureksi. Akun väärin päin kytkennän yhteydessä normaalisti estosuuntainen schottky-diodi muuttuu myötäsuuntaiseksi. Tällöin diodin ja PTC-sulakkeen läpi kulkee oikosulkuvirta, johon PTC reagoi nostamalla omaa resistanssiaan. Nyt väärin kytkennästä aiheutuva jännite vaikuttaa pääasiallisesti PTC-sulakkeen yli. PTC-sulake on uudelleen käytettävää mallia, eli väärin kytkentä ei polta sulaketta. Oikosulun poistumisen jälkeen PTC:n vastusarvo laskee lähelle nollaa. Piirillä pyritään estämään akun väärinpäin kytkemisestä aiheutuvaa väärää jännitepolariteettia. Lisäksi A/D-muuntimen tuloon kytkettiin kaksisuuntainen transil-diodi, joka estää A/D-muuntimen tulojännitteen nousun yli ± 10,2 V. Transil-diodi suojaa A/D-muuntimen sisääntuloa ylijännite piikeiltä.

3.8 Järjestelmän tehonsyöttö

Mittausjärjestelmän teholähteenä käytetään valmista 7,4 V LiPo-akkupakettia (Lithiumpolymeeri). Mittausjärjestelmän analogiaosan 24 V käyttöjännite saadaan DC-DC-jännitekorventterilla. µC ja A/D-muuntimen 5 V käyttöjännite saadaan LDO-jänniteregulaattorilla (Low Drop Out). LDO:n käyttö µC:n oman jänniteregulaattorin sijaan on välttämätöntä, sillä pieni muutos akkujännitteessä aiheuttaa lähtöjännitteen putoamisen, jolloin enää tarvittavaa 5 V käyttöjännitettä ei pystytä pitämään vakaana. A/D-muuntimen tarkkuuden kannalta käyttöjännitteen stabiilius on erittäin tärkeää. Arvioidaan järjestelmän virrankulutus. Järjestelmän teholähteen kapasiteetin halutaan kestävän vähintään kahdeksan tunnin pituinen

mittausperiodi. Oheiskomponenttilevylle sijoitettujen tehonsyöttökomponenttien kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Tehonsyöttöelektroniikan kytkentäkaavio.

3.8.1 Mittasillan ja mittasiltavahvistimen virran- ja tehonkulutus

Tracopower DC-DC-jännitekorventterillä 5 - 9 V jännite muunnetaan analogiaelektroniikkaosan tarvitsemaan 24 V jännitepotentiaaliin. THB 3-0515 korventterimoduulin hyötysuhde on 76 %. Tällöin yhtälön 40 mukaan saadaan korventterin ottovirta.

$$I_{in} = \frac{P_{out}}{\eta_{DC-DC} \cdot V_{in}} \tag{40}$$

missä η_{DC-DC} on hakkurin hyötysuhde. Tiedetään että P_{out} on 0,96 W, jolloin teholähteestä otettava virta on [DABU AD2T-2Q Datasheet], [DSRC-AX Datasheet]

$$I_{24\,\mathrm{V}} = \frac{0{,}96\ \mathrm{W}}{0{,}76 \cdot 7{,}4\ \mathrm{V}} \approx 0{,}171\ \mathrm{A}$$

Analogiaosan virrankulutus on 171 mA. Samoin teholähteestä otettava teho on

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta_{DC-DC}} \tag{41}$$

jolloin jännitekorventterin ottoteho on

$$P_{in} = \frac{0{,}96\ \mathrm{W}}{0{,}76} = 1{,}26\ \mathrm{W}.$$

Jännitekorventterin ottotehoksi saadaan 1,26 W

3.8.2 A/D-muuntimen virran- ja tehonkulutus

Tiedetään että muuntimen tehonkulutus on suurimmillaan 35 mW [ADS-7813], jolloin 5 V jännitteellä virrankulutus on

$$\frac{0{,}035\ \mathrm{W}}{5\ \mathrm{V}} = 7\ \mathrm{mA}.$$

Nyt akusta otettu teho on

$$7{,}4\ \mathrm{V} \cdot 7 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{A} = 51{,}8\ \mathrm{mW}.$$

3.8.3 Mikrokontrollerin virran- ja tehonkulutus

Mikrokontrolleri tarvitsee 5 V:n käyttöjännitteen. Virran kulutusta ei ole ilmoitettu, joten arvioidaan virran kulutuksen olevan 10 mA. Tällöin lähteestä otettu teho on

$$7{,}4\ \mathrm{V} \cdot 0{,}01\ \mathrm{A} = 74\ \mathrm{mW}.$$

3.8.4 RF-moduulin virran- ja tehonkulutus

RF-moduulin käyttöjännite on 3,3 V. Täydellä lähetysteholla (+17 dBm, 50 mW) XBee-PRO-moduuli ottaa 295 mA virran. Radiopiirin virrankulutus on kuuntelutilassa 45 mA. Radiopiirin voidaan arvioida olevan lähetystilassa 32,1 % sekä kuuntelutilassa 67,9 % ajasta. Tällöin keskiarvollinen virrankulutus on

$$0{,}321 \cdot 295\ \mathrm{mA} + 0{,}679 \cdot 45\ \mathrm{mA} \approx 125{,}25\ \mathrm{mA}.$$

Mikrokontrollerin ja RF-moduulin tehonkulutus saadaan laskettua yhtälöllä 42

$$P = UI \tag{42}$$

Akun napajännitteen ollessa 7,4 V akusta otettu teho on

$$P = 7{,}4\ \mathrm{V} \cdot 0{,}12525\ \mathrm{A} \approx 0{,}93\ \mathrm{W}.$$

On huomioitavaa että XBee-moduuli toimii 3,3 V jännitteellä, jolloin akun napajännite 7,4 V alennetaan XBee-moduulin kytkentälevyyn integroidulla jänniteregulaattorilla. Jänniteregulaattorissa syntyy tehohäviö, joka on myös huomioitu ottotehoa laskettaessa. [XBee-regulated, 2009]. Mittausjärjestelmän kokonaisvirrankulutus on eri järjestelmäosien virrankulutusten summa yhtälön 43 mukaisesti.

$$I_{\mathrm{TOTAL}} = I_{24\ \mathrm{V}} + I_{\mathrm{XBee}} + I_{\mathrm{ADC+\ \mu C}} \qquad (43)$$

missä $I_{\mathrm{ADC+\ \mu C}}$ on A/D-muuntimen sekä µC:n virrankulutus, joka on 17 mA. Järjestelmän kokonaisvirrankulutukseksi saadaan yhtälön 43 mukaan

$$I_{\mathrm{TOTAL}} = 0{,}171\ \mathrm{A} + 0{,}12525\ \mathrm{A} + 0{,}017\ \mathrm{A} = 0{,}313\ \mathrm{A}.$$

Järjestelmän teholähteestä ottama virta on keskimäärin n. 313 mA. Virrankulutus pienenee, mikäli datapaketit saadaan siirrettyä ilman että kaikkia uudelleenlähetyskertoja tarvitsee käyttää. Virrankulutuksen voidaan arvioida olevan ≤ 313 mA.

3.8.5 Järjestelmän tehonkulutus ja teholähteen varauskapasiteettitarve

Tiedetään järjestelmän eri osien tehonkulutukset, jolloin kokonaisottoteho akusta on osaottotehojen summa

$$1{,}26\ \mathrm{W} + 0{,}0517\ \mathrm{W} + 0{,}074\ \mathrm{W} + 0{,}93\ \mathrm{W} \approx\ 2{,}32\ \mathrm{W}.$$

Lasketaan kuinka paljon akun kapasiteetin täytyy olla, että teholähde kykenee syöttämään järjestelmän vaatiman virran vähintään kahdeksan tunnin ajan. Akulta edellytettävä varaus lasketaan yhtälön 44 mukaisesti

$$C = T_{\mathrm{h}} \cdot I_{\mathrm{TOTAL}} \tag{44}$$

missä T_{h} on mittausjakson kesto tunteina. Sijoittamalla arvot yhtälöön 12, jolloin akun kapasiteetti tarpeeksi saadaan

$$C = 8\ \mathrm{h} \cdot 313\ \mathrm{mA} = 2504\ \mathrm{mAh}.$$

Virrankulutusta voidaan pienentää liittämällä analogiaosan virransyöttöön MOSFET-kytkin, jolla analogiaosa saadaan mittausjaksojen välillä jännitteettömäksi. Kytkintä ohjataan mikrokontrollerilla. Vastaanottimen XBee-moduuli saa käyttösähkönsä USB-väylän välityksellä, jolloin kyseisen järjestelmäosan tehonsyöttöön ei ole tarvetta sen kummemmin paneutua, todettakoon että USB-väylä pystyy syöttämään korkeintaan 500 mA virtaa, mikäli väylällä ei ole aktiivisia toistimia. 500 mA virta riittää syöttämään XBee-moduulia vaikka käytettään täyttä lähetystehoa.

3.9 Järjestelmän kotelointi ja EMC-suojaus

Mittalaitteiston digitaaliosa suojataan koteloinnilla. Ulkoisilta sähkömagneettisilta häiriöltä suojautuminen edellyttää elektroniikkaosan koteloimista sähköisesti johtavaan koteloon. Suljettu metallikotelo muodostaa Faradayn häkin, joka vaimentaa ulkoisia sähkö- ja magneettikenttiä sekä radiosignaaleja kotelon sisällä. Koteloinnin suojaavuus riippuu häiriön taajuudesta, kotelossa olevien reikien koosta, kotelon seinämien paksuudesta sekä materiaalista. Karkeasti arvioiden voidaan sanoa, että kotelossa olevien reikien suurin lineaarimitta ei saa ylittää 1/20 λ. Muutoin koteloinnilla ei saada aikaan merkittävää vaimennusta häiriösignaaliin tai -kenttään. Mikäli kotelossa olevat reiät ovat < 1/100 λ, eivät ne huononna kotelon suojausvaikutusta merkittävästi umpinaiseen koteloon verraten. On huomioitavaa että teollisuusympäristössä esiintyvien sähkö- ja magneettikenttien sekä radioaaltojen taajuudet rajoittuvat alle 30 MHz:n taajuuksille. Suurin osa teollisuuden sähkömagneettisistahäiriöistä aiheutuu tehoelektroniikassa tapahtuvien virran ja jännitteen kytkentäilmiöiden seurauksena [Kuisma M, 2003], [Silventoinen P]. Signaalin aallonpituus tyhjiössä lasketaan yhtälön 45 mukaan

$$\lambda = \frac{\mathrm{c}}{f} \tag{45}$$

missä c on valonnopeus tyhjiössä ja f signaalin taajuus. Mittausjärjestelmän digitaalielektroniikkaosa asennetaan puristamalla valettuun alumiinikoteloon. Kotelo asennetaan akselille siten että XBee-moduulin radioaaltojen esteetön säteily tapahtuu akselin pituus suunnassa. Tällöin akseli ja muut metallirakenteet estävät vähiten LOS-yhteyden (Line Of Sight) säilymistä lähettien ja vastaanottimen välillä. On huomioitavaa että aikaisemmin laskettu Dopplerin-ilmiön vaikutus pienenee edelleen lasketusta arvosta.

On huomioitavaa että vaikka koteloinnin reikien koon puolesta kotelo täyttää suojaukselle asetetun 1/20 λ ehdon. Kotelon seinämän vahvuudesta riippuen osa sähkömagneettisesta säteilystä tunkeutuu kotelon sisään seinämien läpi, joskin kotelo aiheuttaa signaaliin tietyn suuruisen vaimennuksen. Sähkömagneettisten kenttien tapauksessa puhutaan tunkeutumissyvyydestä, joka on riippuvainen signaalin taajuudesta sekä kotelomateriaalin ominaisuuksista. Käytettävän kotelon seinämän paksuus on ohuimmillaan 1,5 mm. Lasketaan kuinka paljon kotelo vaimentaa eri taajuuksisia signaaleja. $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$, $\mu_{r,Al} \approx 1$ [Honkanen H] Tunkeutumissyvyys lasketaan yhtälön 46 mukaan

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot f}} \qquad (46)$$

missä on taajuus sekä σ resistiivisyys. Tunkeutumissyvyyden määritelmä: tunkeutumissyvyydellä johtavassa aineessa kentänvoimakkuus on vaimentunut 1/e (e ≈ 2,71828, neper) osaan pinnalla vaikuttavasta kentästä. Toisin sanoen kentänvoimakkuus on tunkeutumissyvyydellä n. 37 % alkuperäisen signaalin voimakkuudesta [Honkanen H], [Häkkinen E, 1999].

3.9.1 Sähkö- ja magneettikentät

Lähikentässä sähkö- tai magneettikentän voimakkuus voidaan mitata erikseen. Yleisesti lähikenttä on $\lambda/2 \cdot \pi$ etäisyydellä ja sitä lähempänä säteilevää antennia. EMC-tarkastelussa koteloinnin vaikutusta tarkastellaan useasti reaktiivista lähikenttäkytkeytymistä vastaan [Kuisma M, 2003]. Koteloinnin aiheuttama vaimennus lähikenttiä vastaan koostuu useasta osatekijästä, joista matalilla taajuuksilla merkittävin on heijastusvaimennus R. Heijastusvaimennus riippuu

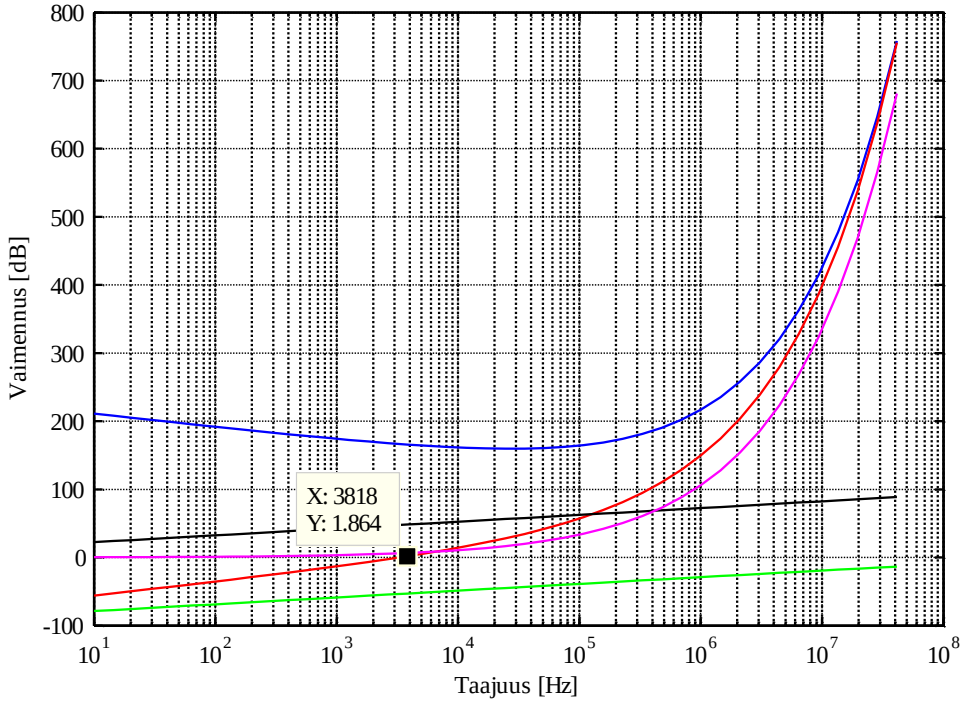
väliaineen ja kotelorajapinnan aaltoimpedanssierosta. Korkeilla taajuuksilla merkittävin tekijä on materiaalin absorptiovaimennustekijä A [Honkanen H] [Häkkinen E, 1999]. Lähikentän absorptiovaimennus lasketaan yhtälöllä 47

$$A = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{E_0}{E_0 \cdot \mathrm{e}^{\frac{-t}{\delta}}}\right) \text{ dB} \qquad (47)$$

Missä E_0 on sähkökentän voimakkuus kotelon ulkopinnalla. Sama absorptiovaimennus pätee myös magneettikentälle, tällöin E_0 korvataan H_0, joka on magneettikentän voimakkuus kotelon ulkopinnalla. Sähkökentän tapauksessa heijastuminen tapahtuu pääasiallisesti kotelomateriaalin ulkopinnasta. Koteloinnilla aikaan saatu kokonaisvaimennus koostuu absorptiovaimennuksesta sekä heijastusvaimennuksesta. Sähkökentän heijastusvaimennus lasketaan yhtälöllä 48

$$R_\mathrm{e} = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{4{,}5 \cdot 10^9}{f \cdot r \cdot Z_s}\right) \qquad (48)$$

Tämän lisäksi magneettikenttien tapauksessa lähikenttä tarkastelussa käytetään myös korjauskerrointa B, joka aiheutuu magneettikentän heijastumisista kotelo seinämateriaalissa. Kuvassa 27 on esitetty 1,5 mm paksulla alumiinisella seinämän vahvuudella aikaan saatu vaimennus sähkö- ja magneettikenttiä vastaan. Laskennassa lähettimen ja vastaanottimen etäisyydeksi asetetaan 1 m, jolloin vielä 30 MHz:n taajuudella lähikentän etäisyysehto $r < \lambda/2 \cdot \pi$ täyttyy. Kuvassa 27 on kuvattu sähkökenttä (sininen), magneettikenttä (punainen) sekä magneettikentän vaimenemiseen vaikuttavat osatekijät: heijastusvaimennus (musta), Absorptiovaimennus (violetti) sekä korjauskerroin (vihreä).



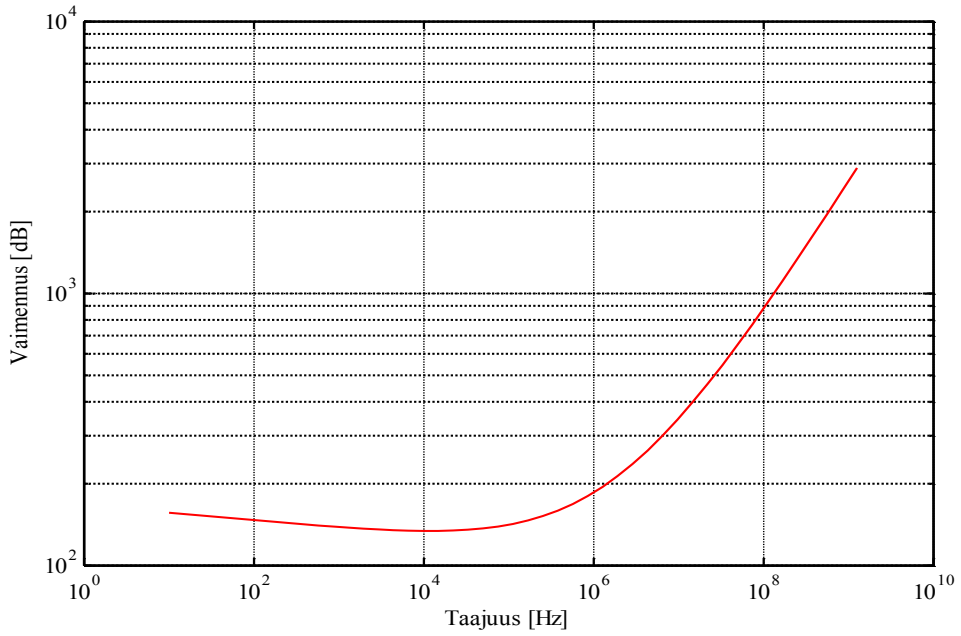
Kuva 27. Sähkö- ja magneettikentän vaimeneminen 1,5 mm paksuisessa alumiiniseinämässä. taajuuden funktiona.

Kuvasta 27 nähdään että kotelo, jonka seinämän paksuus on 1,5 mm, vaimentaa kotelon ulkopuolisia sähkökenttiä vähintään 150 dB. Sen sijaan korjauskertoimen takia kotelointi vaimentaa magneettikenttiä vasta 4 kHz ja sitä suuremmilla taajuuksilla. Kuvan 27 perusteella voidaan todeta koteloinnin aiheuttavan suuren vaimennuksen 2,4 GHz:n taajuisille lähikentille, joka tarkoittaa sitä että radiopiirin toiminnan kannalta on erittäin tärkeää tehdä kotelointiin vapaan säteilyn mahdollistava reikä. Sama pätee vastaanottotilanteessa kaukokenttä tarkastelussa. On huomioitavaa että 2,4 GHz:n taajuudella lähikenttä on n. 2 cm ja sitä lähempänä säteilevää antennia.

3.9.2 Kaukokenttä

Kaukokenttä määritellään lähettimen ja vastaanottimen välisen matkan suhteesta signaalin aallonpituuteen. Mikäli välimatka häiriölähteen ja tarkastelupisteen välillä on yli $\frac{\lambda}{2 \cdot \pi}$, tarkastellaan tilannetta kaukokenttätarkasteluna. Kaukokentässä sähkömagneettinen aalto on polarisoitunut eli sähkö- ja magneettikentillä on tietty taso. Sähkö- ja magneettikentät ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan sekä lisäksi samanvaiheisia. Tyhjiössä tai ilmassa etenevän sähkömagneettisen aallon

aaltoimpedanssi Z_W on 377 Ω. [Kuisma M, 2003]. Kaukokentässä ei sähkö- ja magneettikenttää enää voida erottaa toisistaan, joten puhutaan signaalin vaimennuksesta kentän vaimennuksen sijaan. Kuvassa 28 on esitetty alumiinikotelolla aikaan saatu radiosignaaliin vaimennus kaukokentässä, kun seinämänvahvuus on 1,5 mm.



Kuva 28. 1,5 mm alumiinikotelon aikaansaama vaimennus radiosignaaleja vastaan.

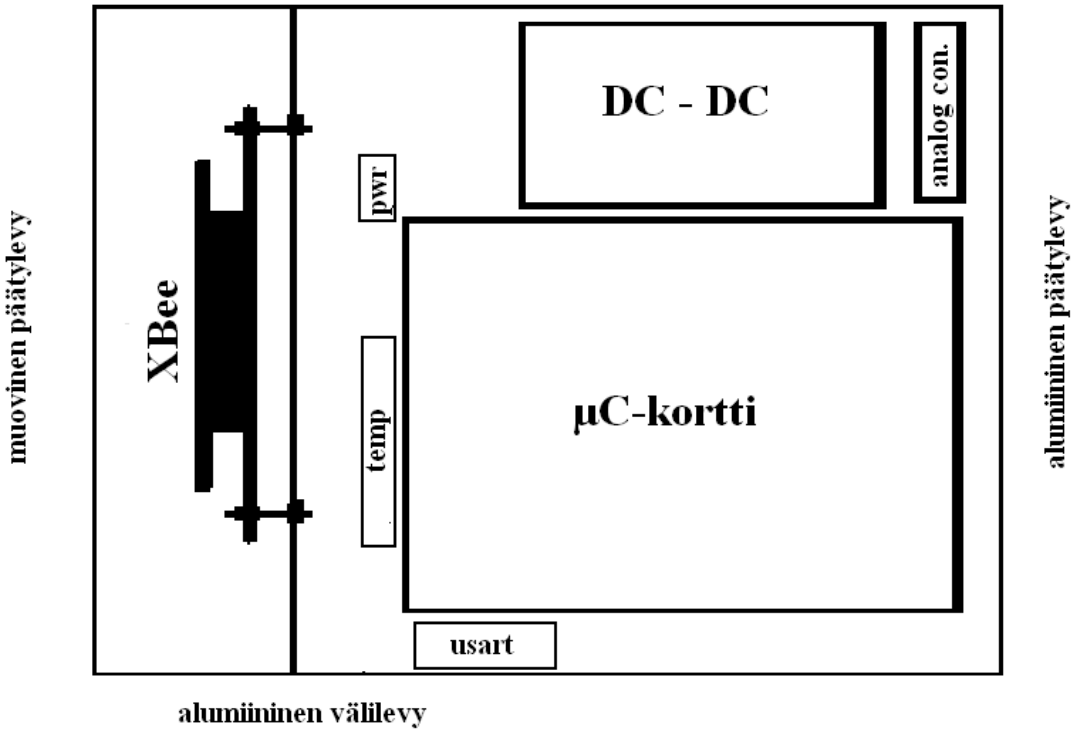
Kuvasta 28 nähdään että 1 kHz:n taajuudella 1,5 mm seinämän vahvuudella saavutetaan yli 100 dB:n signaalin vaimennus taajuudesta riippumatta. 2,4 GHz:n taajuudella kotelon vaimennus on yli 1000 dB. Mittausjärjestelmän tapauksessa ongelmaksi muodostuu radiolähettimen kotelointi. Ulkoisen antennin käyttö on yksi mahdollisuus saada lähetin toimivaksi. ulkoisen esim. RPSMA-antennin mekaanisen kestävyyden oletetaan muodostuvan ongelmaksi akselille kiinnitettävässä lähettimessä. Vastaanottimessa RPSMA-antenniliitäntäisen XBee-moduulin käyttö on sen sijaan mahdollista ja suositeltavaa. Koska lähettimessä ulkoisen antennin käyttö ei ole mahdollista, täytyy metallikoteloon tehdä ikkuna, joka mahdollistaa radioaaltojen säteilyn lähettimen antennista. 2,4 GHz:n taajuisen signaalin aallonpituus on

$$\lambda_{2,4\,\mathrm{GHz}} = \frac{3 \cdot 10^8\ \mathrm{m/s}}{2{,}4 \cdot 10^9\ /\mathrm{s}} = 0{,}125\ \mathrm{m}$$

Tällöin koteloinnissa olevan aukon minimi lineaarimitta radioaaltojen esteettömän säteilyn mahdollistamiseksi on

$$\frac{0{,}125\ \mathrm{m}}{20} = 6{,}25\ \mathrm{mm}$$

Lähettimen antennille on tehtävä lineaarimitaltaan vähintään 6,25 mm aukko kotelointiin. Koska XBee-moduuli on sijoitettu erilliselle piirilevylle, voidaan muu elektroniikka suojata piirilevyjen väliin asennettavalla alumiinilevyllä. Tällöin vain radiopiiri on Faradayn-häkin ulkopuolella. Lähettimen digitaalielektroniikkaosa koteloidaan puristamalla valmistettuun alumiiniprofiilikoteloon. Kuvassa 29 on esitetty digitaalielektroniikan osasijoittelu ja kotelointi periaatteet.



Kuva 29. Hajautetussa osasijoittelussa digitaali- ja tehonsyöttöelektroniikkakotelon osasijoittelu ylhäältäpäin kuvattuna.

Voidaan todeta ettei kotelointiin tehtävien reikien koko ole kovinkaan kriittinen, muistettaessa että kotelon haluttiin pääasiallisesti suojaavan häiriöltä, joiden taajuus on alle 30 MHz. Jos kotelossa olevien rekien halutaan olevan häiriösignaalin

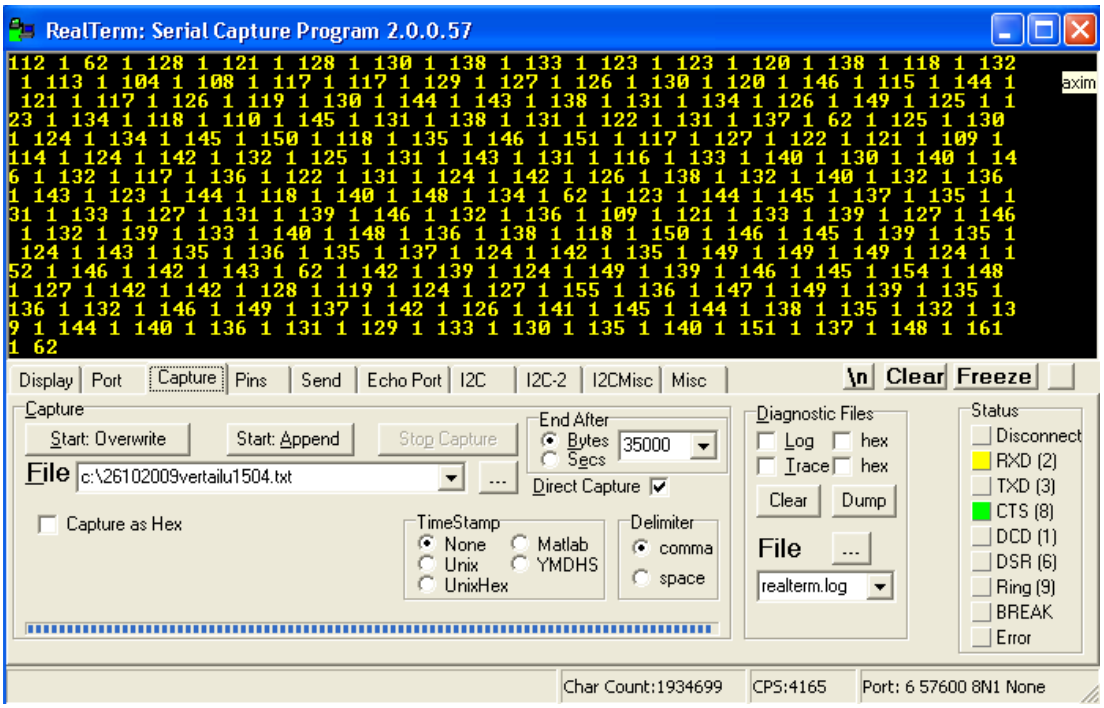
kannalta ”näkymättömiä”, reikien suurin lineaarimitta saa olla 10 cm. Alumiinikotelolla saavutetaan hyvä suojaus kaukokenttiä sekä sähkökenttiä vastaan. Matalataajuisten magneettikenttien tapauksessa alumiinikotelosta ei ole hyötyä. Kotelo ei siis vaimenna matalataajuisia magneettikenttiä merkittävästi. Matalataajuisia magneettikenttiä vaimennettaessa on syytä käyttää rautaa sisältäviä kotelomateriaaleja.

3.10 Mittaustiedon käsittely

Suurin osa mittausjärjestelmän signaalinkäsittelystä suoritetaan PC:llä. Tämä helpottaa muun muassa järjestelmän mukautettavuutta sekä esimerkiksi signaalin suodatukseen tehtäviä muutoksia. Mittausdata tallennetaan, suodatetaan ja kuvataan PC:llä. Mittaustiedon tallennukseen sekä mittalaitteiston etäohjaukseen käytetään Realterm-ohjelmaa, joka on netistä ladattavissa oleva ilmaisohjelma. [http://realterm.sourceforge.net/index.html#downloads_Download]. Mittaustiedon digitaalinen signaalinkäsittely tehdään Matlab-ohjelmalla. Seuraavaksi tarkastellaan ohjelmien käyttö sekä kunkin ohjelman toiminnallisuus.

3.10.1 Mittaustiedon tallennus Realterm-ohjelmalla

Radiovastaanottimelta mittaustieto siirretään sarjaliikenneyhteyttä emuloivalla USB-yhteydellä tietokoneelle, jossa se tallennetaan tiedostoon Realterm-ohjelmalla. Realterm:llä ohjataan myös mittayksikön reset-toimintoa sekä analogiaosan virransyöttöä etänä. Kuvassa 30 on esitetty Realterm-ohjelmalla vastaanotettavan datan tiedostoon tallennusvälilehti.



Kuva 30 Realterm-ohjelmalla vastaanotetun datan tallennus tiedostoon suoritetaan *capture*-välilehdellä.

Realterm-ohjelmassa valitaan *Port*-välilehti, jossa asetetaan haluttu *Baud*-nopeus. Testivaiheessa ilmeni että mittausdatan tallennusta ei tulisi suorittaa yli 57600 Baud/s sarjaliikennenopeudella. Suuremman siirtonopeuden käyttö täyttää vastaanottopuskurirekisterin, jolloin rekisterissä tapahtuu ylivuoto, jonka seurauksena osa mittausdatasta häviää. 57,6 kBaud/s nopeus riittää hyvin täyttämään tiedonsiirrolle asetetun kaistanleveysvaatimuksen. Samalta välilehdeltä valitaan sarjaliikenneportti. COM-portin asetukset on esitetty taulukossa 8. On huomioitavaa että samat asetukset asetetaan myös radiovastaanottimeen.

Taulukko 8. COM-portin asetukset

Baud	57600
Data bits	8
Parity	None
Stop bit	1
Hardware flow control	None

3.10.2 Mittaustiedon analysointi Matlab-ohjelmalla

Mittaustiedon analysointia varten tehdään ohjelma, joka tarkistaa tallennetun mittaustiedon oikeellisuuden sekä piirtää anturilta mitatun vääntömomentin ajan

funktiona. Ohjelmassa suoritetaan myös mittaussignaalin suodatusta. Suodattimena käytetään mediaani-suodatinta. Matlab-koodi on esitetty liitteessä 4.

3.11 Järjestelmäprototyypin kustannusarvio

Arvioidaan järjestelmäprototyyppiin kuuluvien komponenttien hankintakustannuksia. Laskelma käsittää myös mikrokontrollerin sekä XBee-moduulien ohjelmointityökalujen hankintakustannukset. Ohjelmointityökalujen hankinta on kustannuksiltaan kertaluonteista. On huomioitavaa että prosentuaalisesti ohjelmointityökalut eivät suuresti vaikuta järjestelmän rakennuskustannuksiin. Laskelmassa esitetyt hinnat ovat 0 % ALV-hintoja. Kustannusarvio on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Vääntömomentin mittausjärjestelmän prototyypin kustannusarvio.

	À [€]	kpl	yht. [€]
Momenttiavain	295	1	295
Venymäliuskamittasilta	2800	1	2800
Mittasiltavahvistin	780	1	780
A/D-muunnin ADS-7813	13	1	13
DC-DC hakkuri 5 V - 24 V	36	1	36
DC-DC hakkuri 5 V - 3,3 V	12	1	12
Atmel AVR ATmega-128, µC	10	1	10
XBee-moduulien ohjelmointi/kehitysalusta	150	1	150
XBee PRO-moduuli	34	2	68
Oheiskomponenttipiirilevy	50	1	50
3000 mAh 7,4 V Li-POAkku	38	1	38
Vastaanottimen piirilevy / USB-muunnin	30	1	30
2,4 GHz antenni	14	2	28
Lähettimen laitekotelo, alumiini	30	1	30
Vastaanottimen laitekotelo, alumiini	30	1	30
Yhteensä	4182		**4250 €**

[Farnell], [Digi], [Sparkfun] [Baumerelectric]

Järjestelmän osien hankinnassa pyritään valitsemaan käytettävät osat siten, että mahdollisimman suuri määrä osista voidaan tilata samalta toimittajalta. Työssä komponenttihankinnat pyritään keskittämään Farnell:in. Joitakin osia tilataan muualta nopeamman saatavuuden takia. XBee-moduulien tapauksessa tavarat tilattiin paremman valikoiman takia muualta. Komponenttien hankintapaikat on listattu taulukkoon 10.

Taulukoon 10. Prototyypissä käytetyt komponentit, sekä niiden ostopaikat.

Komponentti	Tuotekoodi	Toimittaja
KIINNITYSRIMA 2,54 mm	M20-990246	Farnell
Sulake, 0,5 A	MF-NSMF050,	Farnell
SCHOTTKY DIODI, 0,5 A	PMEG2005EH	Farnell
MOSFET N-CH, DPAK	IRL8743TR-ND	Farnell
5/24V DC/DC HAKKURI	3-0515, DIL	Farnell
LDO REG. 5V, 100 mA	LT1761ES5-5#TRMPBF	Farnell
16-BIT ADC, 40 kS/s	ADS-7813U-ND	DIGIKEY(1)
Transil-diodi 12V, bidir.	SM6T12CA	Farnell
Kotelo, vastaanottimelle, 14551PSLA, diecast	301-504	Farnell
Kotelo, lähetin, 1455k1602BK, päätylevyt muovi.	928-7957	Farnell
elektrolyytti kond,SMD, 1µF,B45196E3105K109	975-3869	Farnell
elektrolyytti kond,SMD, 10µF,B45196H2106K109	975-1041	Farnell
3000 mAh, 7,4 V LiPo-akku	FM3000SRX	RC-SABE
LiPo-akkulaturi	FMFBC-3025	RC-SABE
AVR-ISP500-Tiny, ohjelmointilaite, USB	170-1517	Farnell
Analogiavahvistimelta digitaalimuuntimelle 2 m	ES-34CP2B	Metric
MITTASILTAVAHVISTIN		Metric
Vääntömomenttimittasilta	DSRC AX080M/CM	Metric
5-pin MIC-liitin, naaras		Partco (1)
5-pin MIC-liitinrunko, uros		Partco (1)
USB-minikaapeli, 2 m		Sparkfun
Header board H128-C, Atmel AVR 128 µC-kortti		Sparkfun(2)
XBee Explorer USB, XBee-kortti/USB-sovitin		Sparkfun
XBee Pro 60 mW, XBee-moduuli, chip-antenni		Sparkfun
XBee Explorer regulated, XBee-kortti/USART-sovitin		Sparkfun
Piirilevyt, ADCPWR1	rev 1	PCBcart (CHI)

4 MITTAUSJÄRJESTELMÄN TOIMINNALLISUUDEN TESTAUS

Mittaukset suoritetaan kaksinapaparisella 110 kW:n taajuusmuuntajaohjatulla induktiomoottorilla, johon liitetään kytkinlevyjen välityksellä 480 kW DC-kuormakone. Vertailumittauksissa langattoman mittausjärjestelmän tuloksia verrataan langallisen vääntömomenttianturin tuloksiin. Langallisena vääntömomenttimitta-anturina käytetään Torquemaster TM 214:a. Mitattustuloksia verrataan myös taajuusmuuttajan sähköisen vääntömomentin estimaattiin. Tällöin voidaan verrata sähköisessä vääntömomentissa tapahtuvia muutoksia mekaanisen vääntömomentin muutoksiin. Ensiksi määritetään mittausjärjestelmän kohinataso. Prototyypillä suoritetaan erinäisiä kokeita, joissa testataan järjestelmän toimintaa. Saatuja tuloksia verrataan teoreettisiin arvioihin sekä tutkitaan aiemmin järjestelmälle asetettujen reunaehtojen toteutumista. Lopuksi tutkitaan tiedonsiirron toimivuutta mittaamalla vastaanotettavan signaalin kentänvoimakkuutta.

4.1 Järjestelmän kohina

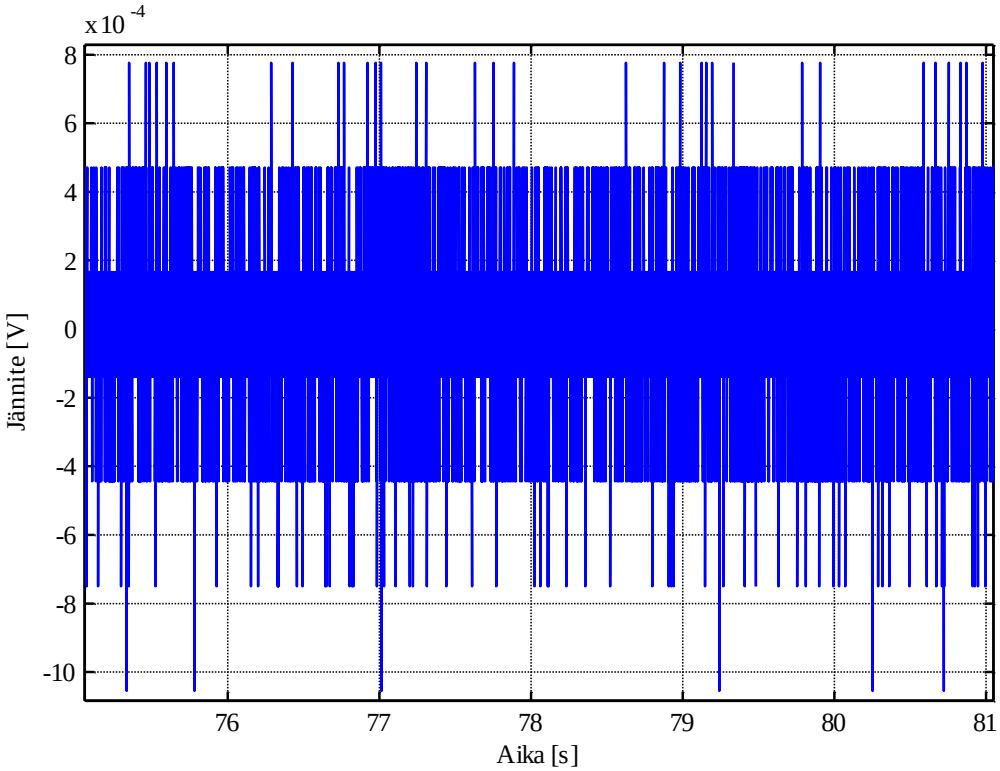
Signaalit voidaan jakaa kahteen ryhmään, energiasignaaleiksi ja tehosignaaleiksi. Yleisesti ottaen jaksolliset signaalit ovat tehosignaaleita, sillä niiden siirtämä energia on ääretön, silloin kun tarkasteluväli on $[-\infty, \infty]$. Kohina on signaalityyppinä energiasignaali. Keskimääräisen kohinatehon estimoinissa kohinana oletetaan koostuvan peräkkäisistä samanlaisista jaksoista. Mitta-anturin olleessa rasittamattomassa tilassa, mitataan järjestelmän kohinatasoa. Keskimääräinen kohinateho estimoidaan yhtälöllä 49

$$P = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}|u(x)|^2 \tag{49}$$

Kohinatehoa estimoidaan näytesarjalla $0 \leq n \leq N$. Lisäksi tiedetään että jännitearvot on mitattu 47 kΩ vastuksen yli, jolloin yhtälö on

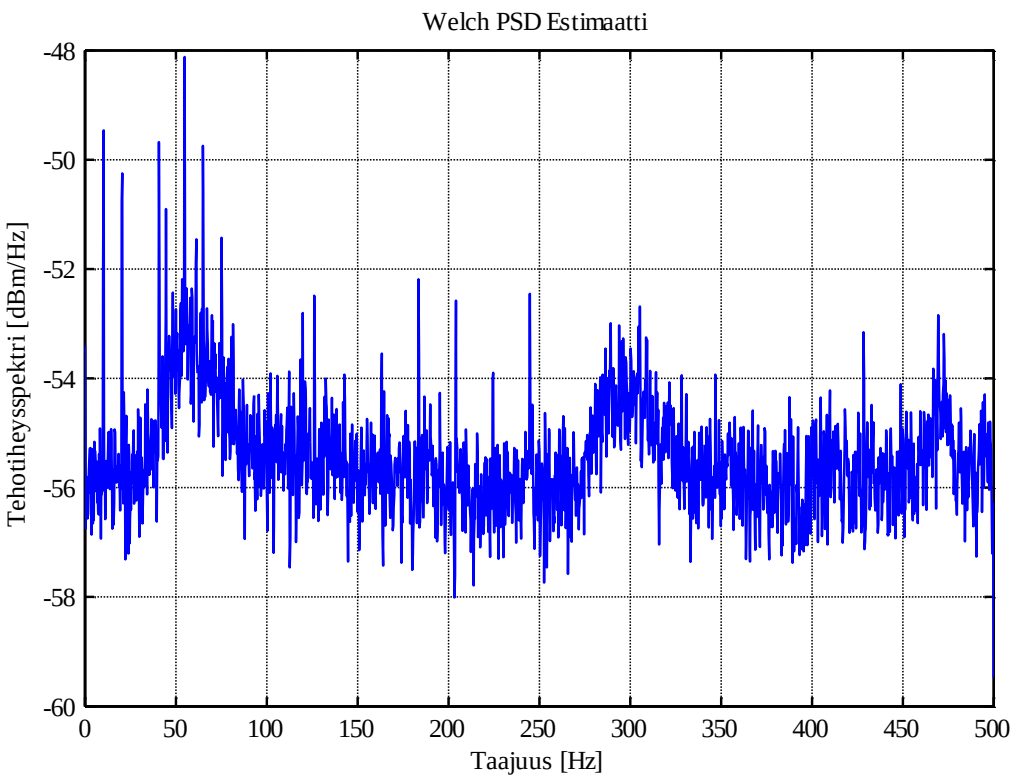
$$P = \frac{\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}|u(n)|^2}{47 \cdot 10^3} \tag{50}$$

Kohinan keskimääräiseksi tehoksi saadaan Matlab-ohjelmalla laskemalla n. $1{,}5 \cdot 10^{-12}$ W [Proakis J, 1996]. Kohinateho estimoidaan kuvassa 31 esitetystä kohinanäytteestä.



Kuva 31. Järjestelmän taustakohina suodattamattomasta mittaussignaalista.

Kuvasta 31 nähdään kohinassa esiintyvät vaihtelut. Kohinasignaalista arvioidaan kohinatehon jakautuminen eri taajuuksille. Arviointi toteutetaan Welch:n spektri-estimaatin avulla. Tällöin saadaan selville mitä taajuuksia tulee suodattaa, että kohinaa saadaan vaimennettua. Vaimentaminen onnistuu, mikäli kyseessä ei ole valkoinen kohina, joka on taajuudesta riippumaton vakio.



Kuva 32. Mittausjärjestelmän kohina taajuustasossa.

Kuvasta 32 nähdään, ettei kohina jakaudu tasaisesti koko taajuusalueelle. Kohinassa esiintyy tehotiheyspiikkejä eri kohdissa taajuuskaistaa. Järjestelmän kohinaa voidaan pienentää lisäämällä suodatusta resonanssitaajuuksille.

4.3 Dynaaminen vääntömomentti

Testissä ajetaan vääntömomenttiramppi. Mittauksessa tutkitaan mittausjärjestelmän vastetta nopeisiin vääntömomenttiarvon muutoksiin sekä mittaussignaalin ryömimistä. Vääntömomentin arvoa vaihdetaan askelmaisesti 8 - 100 % moottorin nimellisestä vääntömomentista. Induktiomoottorin nimellinen vääntömomentti on yhtälön 51 mukaan

$$T = \frac{P}{\omega} \tag{51}$$

missä P on moottorin teho sekä ω moottorin kulmanopeus nimellispyörimis nopeudella. Lisäksi tiedetään että kulmanopeuden ja pyörimisnopeuden välillä pätee yhtälö

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot RPM}{60\ \mathrm{s}} \tag{52}$$

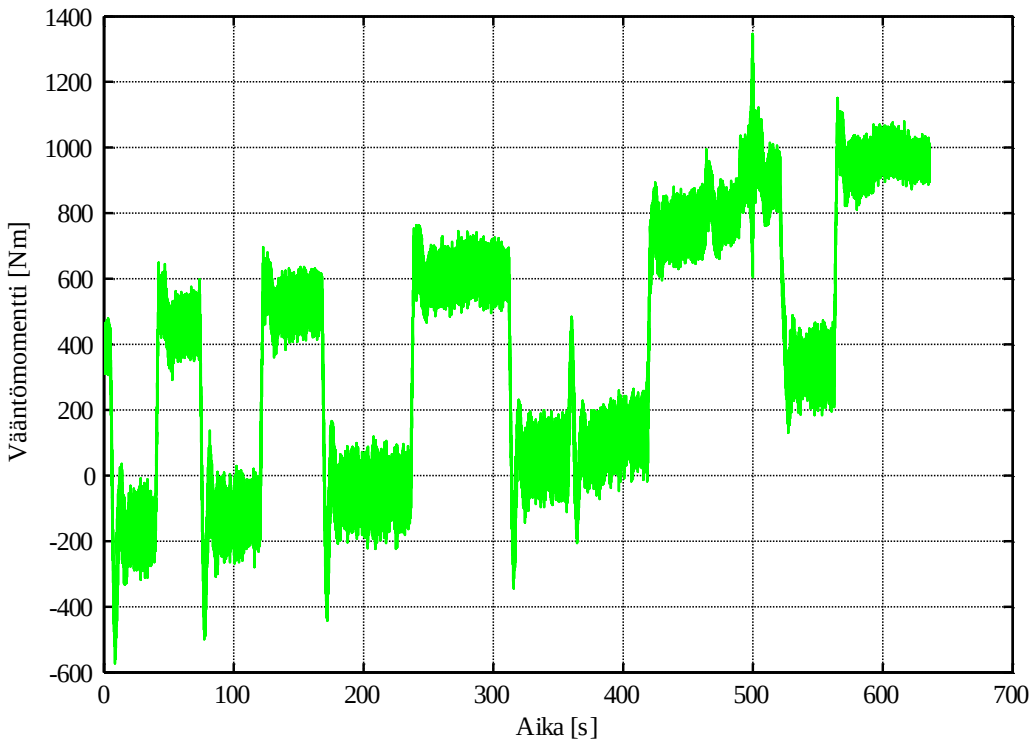
missä RPM on moottorin pyörimisnopeus minuutissa. Tiedetään että nimellispyörimisnopeus on 1500 RPM, jolloin kulmanopeudeksi saadaan

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot\ 1500}{60\ s} = 157{,}1\ \ \mathrm{rad/s}$$

Sijoittamalla kulmanopeus sekä induktiomoottorin nimellisteho, 110 kW, yhtälöön 53

$$T = \frac{110 \cdot 10^3\ \mathrm{W}}{157{,}1\ \mathrm{rad/s}} \approx 700\ \mathrm{Nm}$$

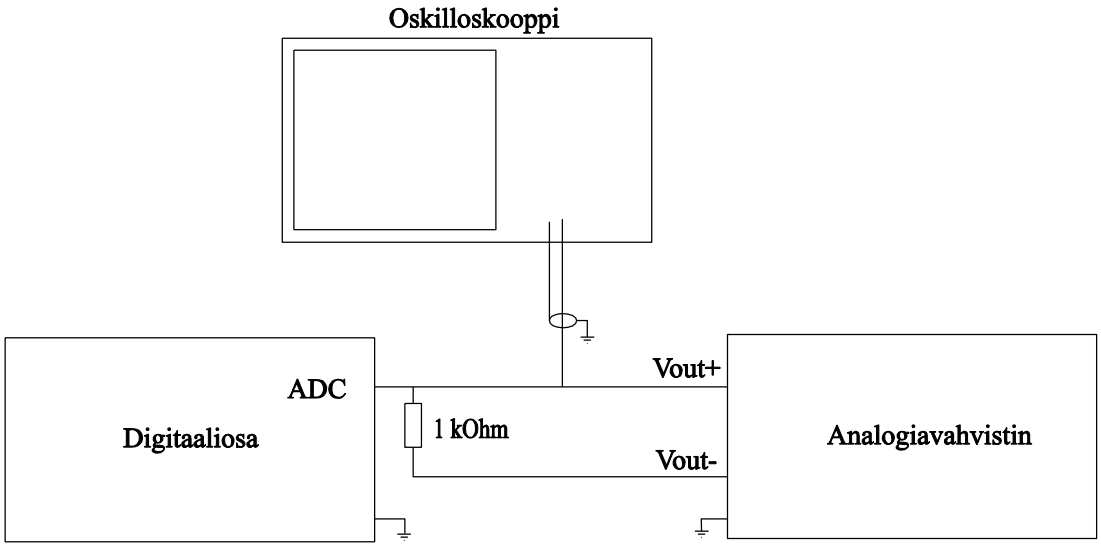
Mittaustuloksista huomataan että langattomalla vääntömomenttianturilla mitatut vääntömomenttiarvot ovat kymmenesosa teoreettisista vääntömomenttiarvoista. Kuvassa 33 on esitetty langattomalla mittausjärjestelmällä mitattu vääntömomenttiaskellus. On huomioitavaa että kuvaajan vääntömomenttiarvot on kerrottu kymmenellä.



Kuva 33. Useita peräkkäisiä vääntömomenttiaskeleita. Kuvassa näkyy myös vääntömomenttitason ryömiminen.

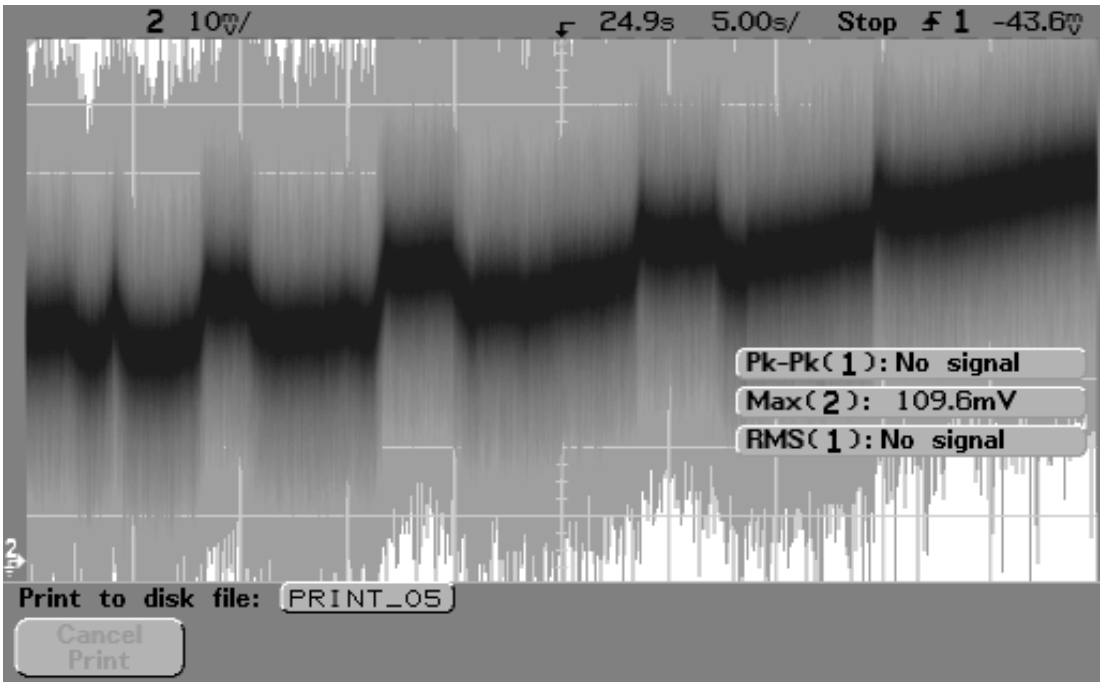
Kuvasta 33 nähdään moottorin lämpenemisestä aiheutuva vääntömomentin *offset*-tason ryömiminen.

Edellä mainitun skaalausvirheen aiheuttaja halutaan selvittää. Seuraavaksi tutkitaan mittausjärjestelmän digitaaliosan toimintaa suorittamalla koe, jossa vääntömomenttianturi on kiinnitetty irtonaiseen akselin pätkään. Akselin pätkän molempiin päihin hitsataan M10-kokoiset mutterit. Nyt akselin pätkään luodaan vääntömomentti vääntömomenttiavaimella. Mittasiltavahvistimen lähtöjännitettä mitataan sekä oskilloskoopilla että itse mittausjärjestelmällä. Lopuksi verrataan saatuja kuvaajia toisiinsa. Mittasiltavahvitimen lähtöjännitteen mittausjärjestelmy on esitetty kuvassa 34.



Kuva 34. Mittausjärjestelmän digitaaliosan toiminnan tutkiminen. Mittasiltavahvistimen lähtöjännitettä mitataaan oskilloskoopilla sekä työssä rakennetulla mittalaitteella.

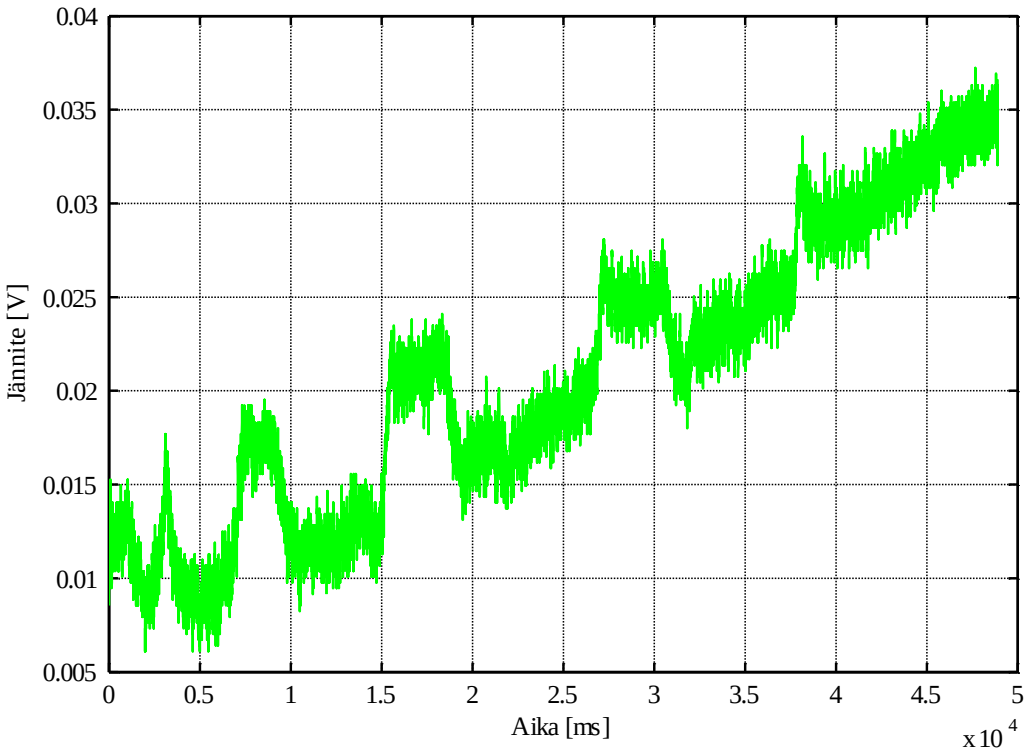
Kuvassa 34 esitetyllä mittausjärjestelyllä suoritetaan analogiavahvistimen lähdön vertailumittaus. Kuvassa 35 on esitetty oskilloskoopilla mitattu lähtöjännitteen kuvaaja. Oskilloskooppina käytetään Agilent 54622D.



Kuva 35. Analogiavahvistimen lähdöstä oskilloskoopilla mitattu jännitesignaali.

Kuvasta 35 nähdään että 60 Nm:n suuruinen vääntömomentin muutos aiheuttaa mittasiltavahvistimen lähtöjännitteeseen n 10 mV:n muutoksen. Sama mittaus

tallennetaan myös varsinaisella mittalaitteistolla. Mittalaitteistolla tallennettu ja suodatettu mittaus on esitetty kuvassa 36.



Kuva 36. varsinaisen mittausjärjestelmän kautta siirretty ja Matlabilla käsitelty mittausdata.

Kuvasta 36 erottuu selvästi akseliin kohdistetut vääntömomenttipulssit. Vääntömomentin voidaan todeta aiheuttavan vajaan 10 mV:n jännitetason muutoksen. Varsinaisella mittausjärjestelmällä otettu kuva on signaalille tehdyn suodatuksen ansiosta oskilloskooppikuvaa selkeämpi. Mittasiltavahvistimen lähtöjännitteen ja akseliin kohdistuvan vääntömomentin välinen yhteys on yhtölän 53 mukaisesti

$$\frac{350\ \mu\varepsilon}{10\ V} = \frac{\varepsilon_{@\ 60\ Nm}}{U_{@\ 60\ Nm}} \tag{53}$$

missä $U_{@\ 60\ Nm}$ on 60 Nm vääntömomentilla aikaan saatu jännite mittasiltavahvistimen lähdössä sekä $\varepsilon_{@\ 60\ Nm}$ venymäliuskaan kohdistuva suhteellinen venymä 60 Nm vääntömomentilla. $\varepsilon_{@\ 60\ Nm}$ ratkaistaan yhtälön 4 mukaisesti.

$$\mu\varepsilon = \frac{60\ \mathrm{Nm} \cdot 16}{\pi \cdot 0{,}08^3\ \mathrm{m}^3 \cdot 210 \cdot 10^9\ \mathrm{N/m}^2} \cdot 10^6 \approx 2{,}84$$

jolloin mittasiltavahvistimen lähtöjännitteen muutokseksi yhtälön 53 mukaisesti saadaan

$$U_{@\ 60\ \mathrm{Nm}} = \frac{10\ \mathrm{V} \cdot 2{,}84}{350} = 81\ \mathrm{mV}$$

60 Nm vääntömomentilla pitäisi mittasiltavahvistimen lähtöjännitteen muuttua 81 mV väännöttömän tilan jännitetasoon nähden.

Seuraavaksi lasketaan millä jännitevälillä mittasiltavahvistimen lähtöjännite on teoreettisesti lasketun mittausepävarmuuden rajoissa. Tiedetään että mittausjärjestelmän mittausepävarmuus voi aiheuttaa $\pm 74\ \mathrm{Nm}$ epävarmuuden mittaustulokseen, jolloin sijoittamalla epävarmuus yhtälöön 4, saadaan suhteellinen venymä epävarmuuksineen

$$\mu\varepsilon = \frac{(60\ \mathrm{Nm} \pm 74\ \mathrm{Nm}) \cdot 16}{\pi \cdot 0{,}08^3\ \mathrm{m}^3 \cdot 210 \cdot 10^9\ \mathrm{N/m}^2} \cdot 10^6 \approx 2{,}84\ \pm 3{,}51$$

jolloin Yhtälön 54 mukaan

$$U_{@\ 60\ \mathrm{Nm}} = \frac{10\ \mathrm{V} \cdot (2{,}84 \pm 3{,}51)}{350} = 81\ \mathrm{mV}\ \pm 100\ \mathrm{mV}$$

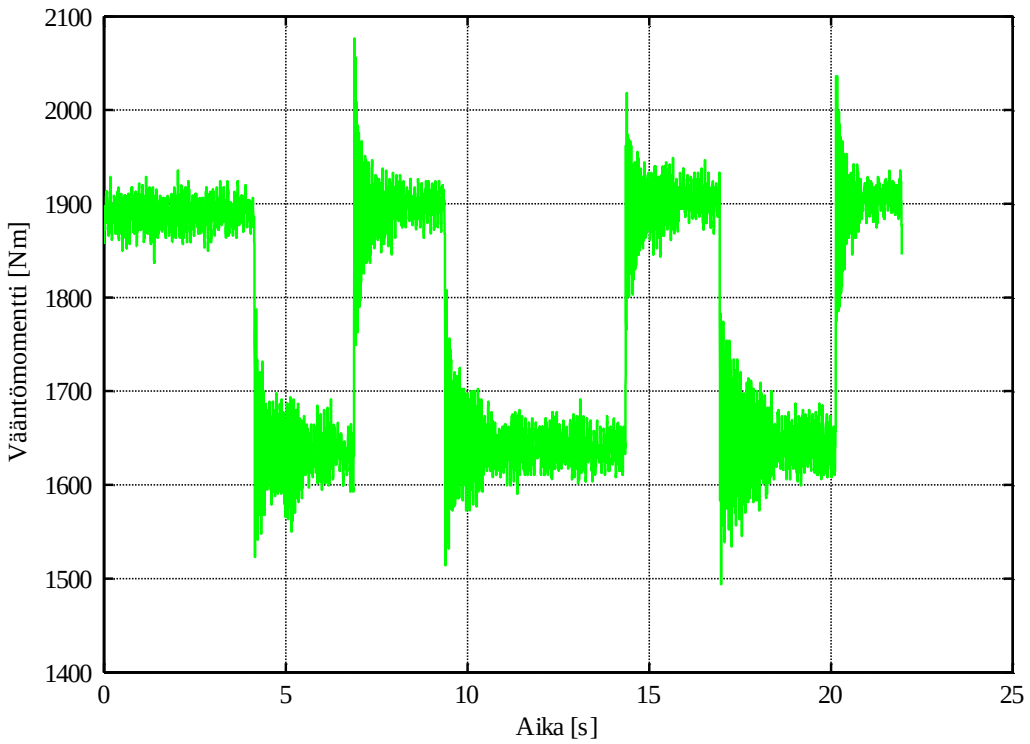
60 Nm vääntömomentilla mittasiltavahvistimen jännite voi vaihdella välillä -19 mV - 181 mV. Voidaan todeta että pienillä vääntömomenttiarvoilla mittausjärjestelmä mittaustulos on mittausepävarmuusrajojen sisällä. Kuten kappaleessa kaksi laskettiin, mittalaitteen mittausepävarmuuden mukaan 700 Nm mittaustuloksen tulee olla välillä 620 -770 Nm. Näin ollen voidaan todeta, että mittasiltavahvistimen lähtöjännite ei käyttäydy teorian mukaisesti suurilla vääntömomentin arvoilla.

Baumerelectric:n mukaan 40 Nm vääntömomentti aiheuttaa 4,97 $\mu\varepsilon$ suhteellisen venymän. Työssä esitettävän teorian mukaan vastaavan tilanteen venymä on 1,89 $\mu\varepsilon$. Baumerelectric on käyttänyt laskelmissaan kimmomoduulin siajsta Liukumoduulia G, joka on suoraan verrannollinen Kimmomoduuliin E. Mittasiltakytkentöjen tapauksessa käytetään tyypillisesti liukumoduulia kimmomoduulin sijaan.

On huomioitavaa että käytettäessä liukumoduulia kiimmomoduulin sijaan, mittasiltavahvistimen lähtöjännitteen tulisi teoriassa olla suurempi. Voidaan todeta että liukumodulilla laskettu arvo heittää kimmomoduulilla laskettua arvoa enemmän. Baumerelectric:n laskelma on esitetty liitteessä 4. On mahdollista että skaalaus virhe johtuu myös A/D-muuntimen ja mittasiltavahvistimen kytkennästä. Järjestelmässä olevan kytkennän oikeellisuuteen ei saatu täyttä varmistusta Baumerelectric:ltä tätä työtä tehtäessä.

4.2 Lämpötilan vaikutus mittausjärjestelmään

Tässä mittauksessa testijärjestelmään kohdistetaan useita vääntömomenttiaskeleita. Kokeessa tutkitaan mittasiltavahvistimen lähtöjännitteessä tapahtuvaa ryömimistä. Moottoria pyöritetään vakionopeudella noin 30 minuuttia ennen mittauksen suorittamista. Kuvassa 37 on esitetty langattomalla mittausjärjestelmällä tilanteesta mitattu kuvaaja.

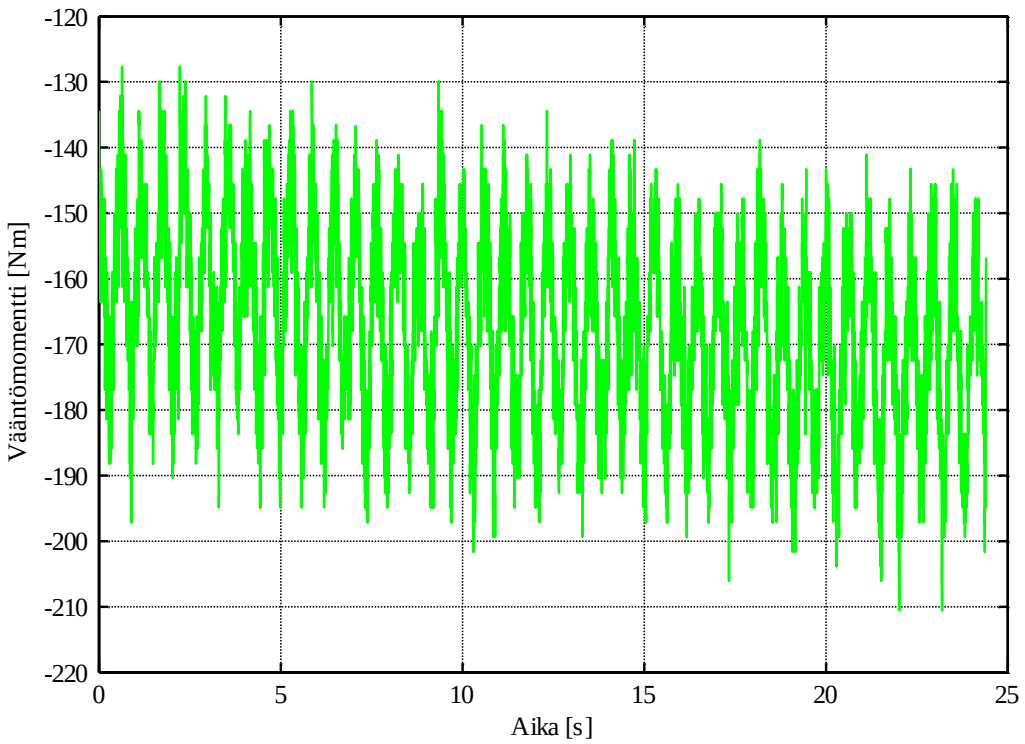


Kuva 37. Moniaskelmittaus noin puolituntia moottorin käynnistämisen jälkeen.

Kuvasta 37 nähdään että moottorin akselin lämmettyä vakiolämpötilaan vääntömomenttitasoissa ei tapahdu ryömimistä.

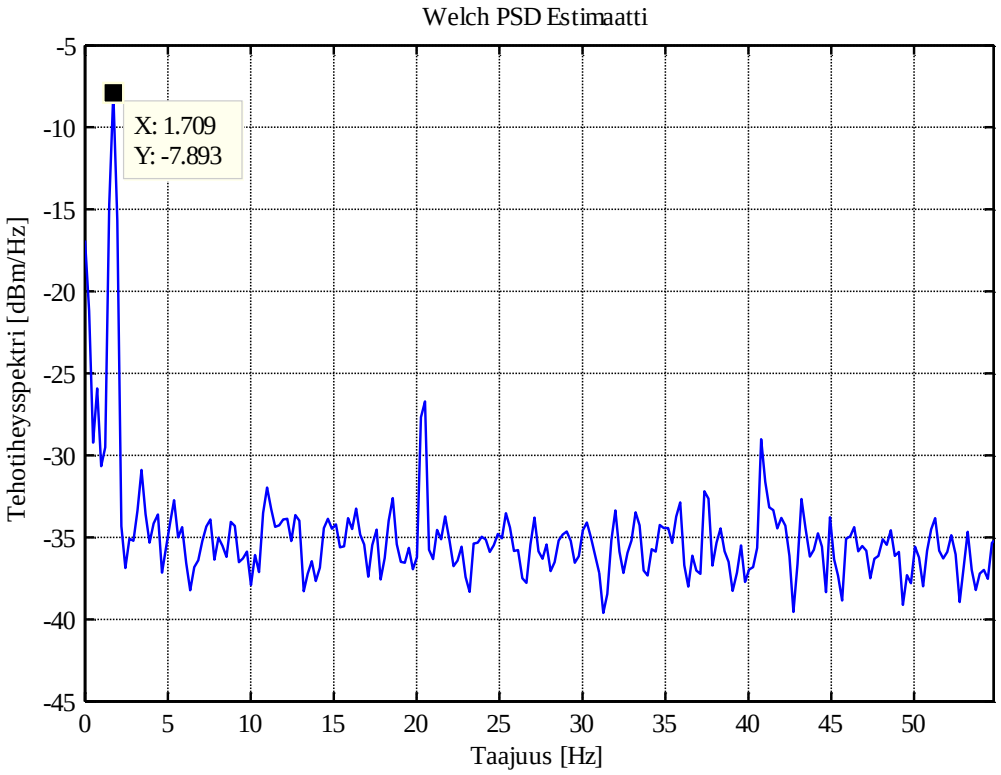
4.2 Värähtelymittaus

Akseli pyörii vakionopeudella, joka on 100 RPM. Tällöin mitataan kuvassa 38 esitetty harmoninen signaali.



Kuva 38. 110 kW:n induktiomoottorin ja kuormakoneen akselien kohdistusvirheestä aiheutuvan resonoinnin kuvastuminen vääntömomentinmittaukseen.

Kuvasta 38 nähdään vääntömomentin arvon värähtelevän tietyllä taajuudella. Värähtelytaajuuden selvittämiseksi. Mittaussignaalista otetaan Welch:n spektriestimaatti. Signaalista tehty taajuusanalyysi on esitetty kuvassa 39.

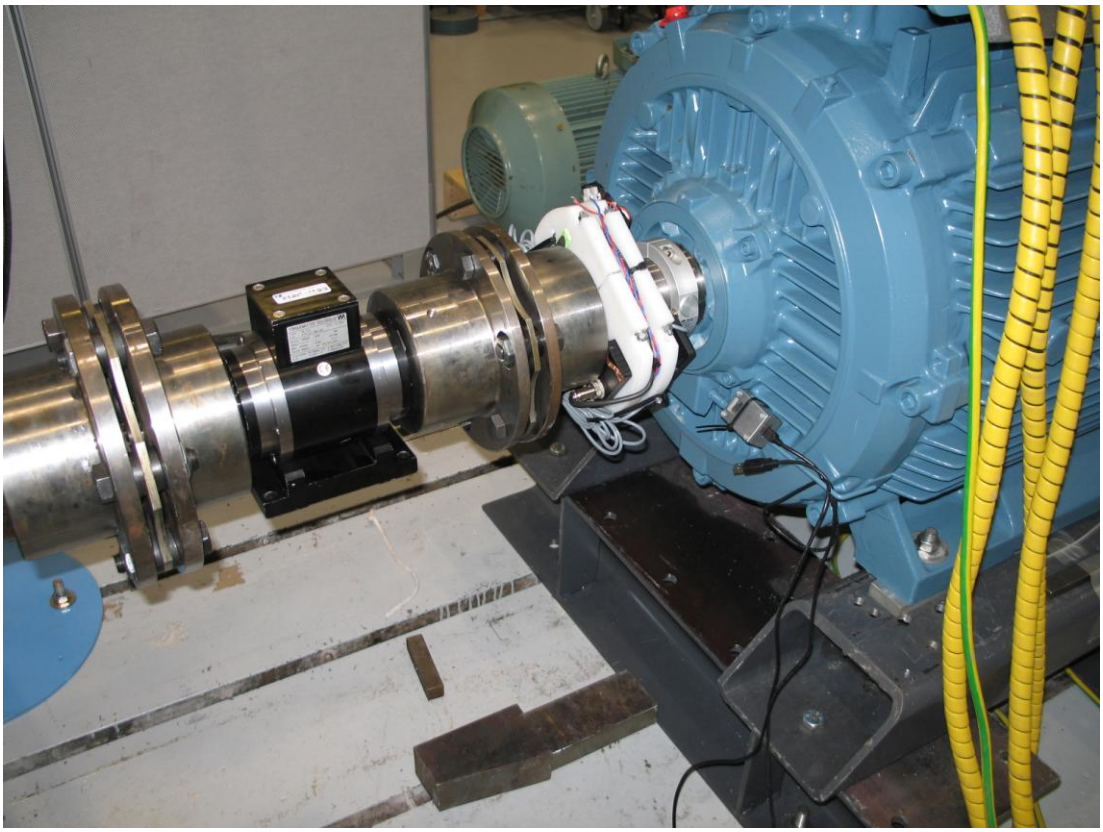


Kuva 39. 110 kW:n induktiomoottorin ja kuormakoneen akselien kohdistusvirheestä aiheutuvan värähtelyn taajuussisällön analysointi Welch:n taajuustasoanalyysi.

Kuvasta 39 nähdään että vahvin värähtely esiintyy taajuudella 1,7 Hz. Minuutissa värähtelyjä esiintyy n. 100. Tämä vastaa akselin pyörimisnopeutta mittaushetkellä. Induktiomoottorin sekä DC-kuormakoneen linjausvirheestä aiheutuva pyörimisnopeudesta riippuva mekaaninen värähtely kuvastuu mittasignaalissa saman taajuisena värähtelynä.

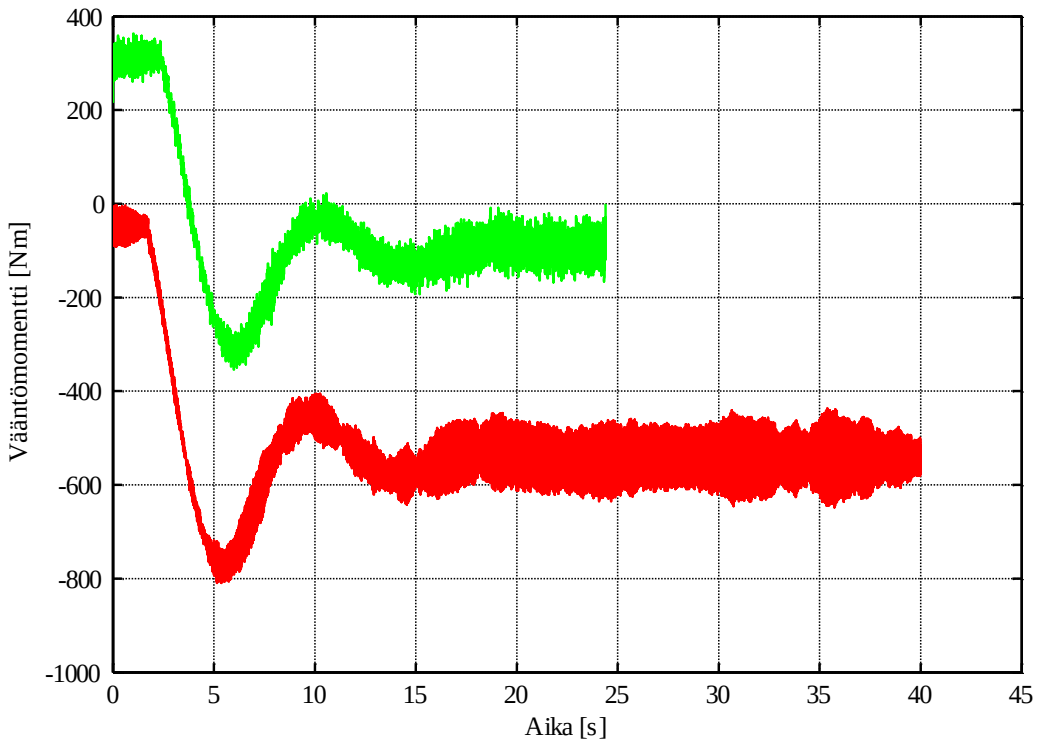
4.4 Vertailukoe

Langattoman mittauslaitteiston rinnalle asennetaan induktiomoottorin ja kuormakoneen väliin langallinen vääntömomentin mittausjärjestelmä Torquemaster TM 214.



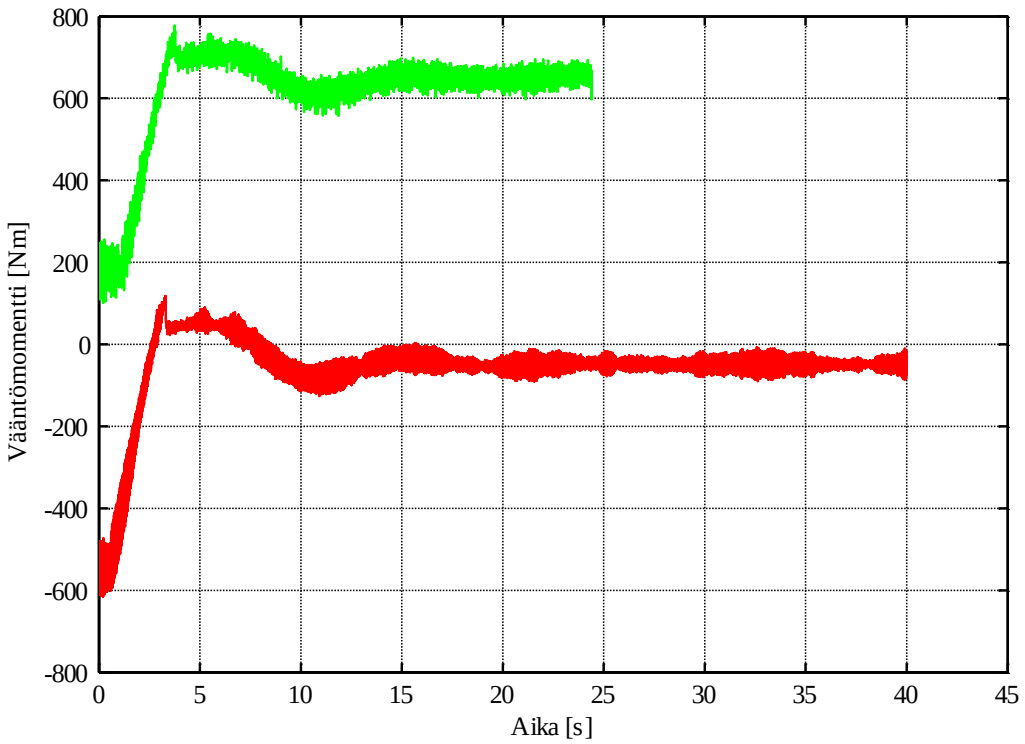
Kuva 40. Keskellä kuvaa näkyy TM 214 langallinen vääntömomenttimittalaite, sekä moottorin lähellä langaton mittausjärjestelmä.

Kuvassa 40 on esitetty vääntömomenttiantureilla suoritettu vertailumittaus, jossa 110 kW:n induktiomoottoria ajetaan alussa tyhjäkäynnillä, jonka jälkeen järjestelmään kohdistetaan vääntömomentti, joka on 75 % nimellisestä vääntömomentista. Kuvassa 41 langattomalla mittausjärjestelmän mittaus on esitetty vihreällä sekä langallisen anturin mittaus punaisella.



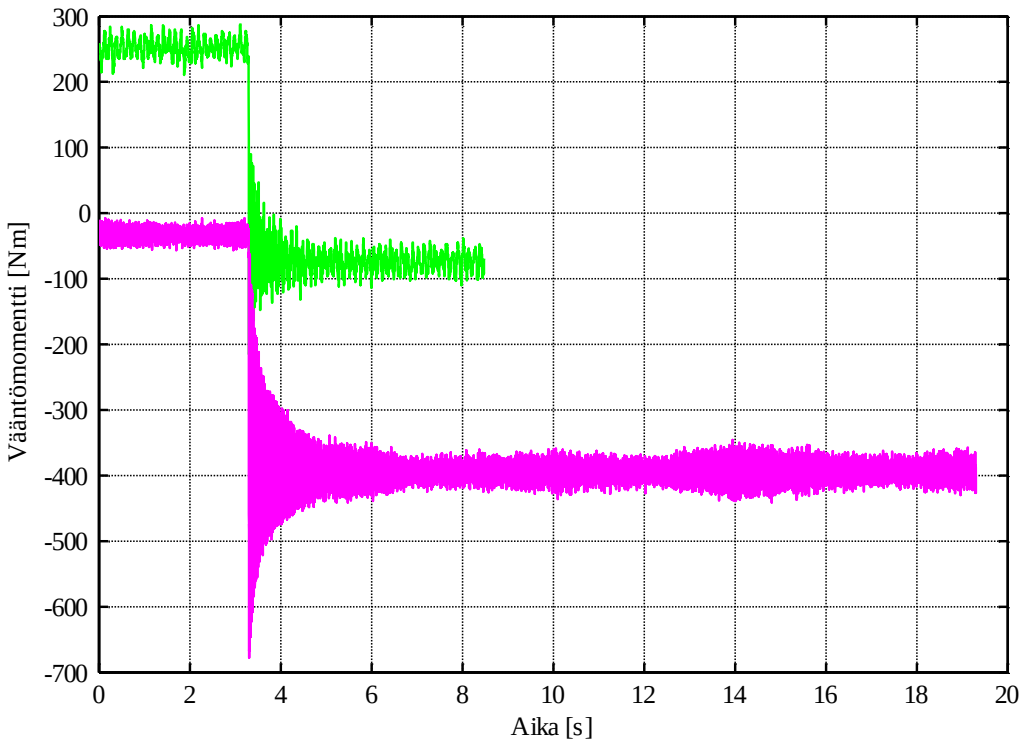
Kuva 41. Vääntömomenttiaskelvertailu, kun kuorma kytketään päälle.

Kuvasta 41 nähdään molemmilla mittauslaitteistoilla mitattujen signaalien useat yhtäläisyydet. Vastaavasti suoritetaan vertailumittaus tilanteesta, jossa kuorma on alkuhetkellä 75 % nimellisestä ja muutetaan tyhjäkäyntikuormaan. Kuvassa 42 on esitetty vertailumittaus kyseisestä tilanteesta. Langattoman mittausjärjestelmän mittaus on esitetty vihreällä sekä langallisen järjestelmän mittaus punaisella.



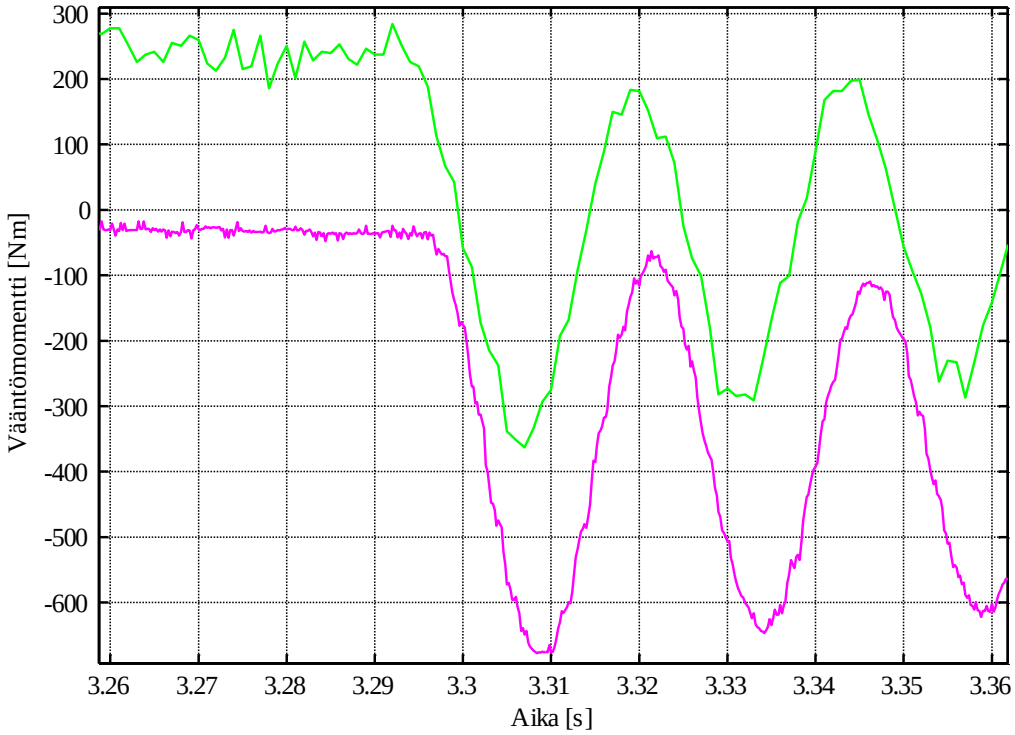
Kuva 42. Vääntömomenttiaskelvertilu, kun kuorma kytketään pois päältä.

Kuvasta 42 nähdään molemmissa vääntömomenttikuvaajissa epäjatkuvuuskohdat vääntömomentti askeleen yläpäässä. On huomioitavaa, että langattoman vääntömomenttianturin mittaskaala on noin kymmenesosa langallisen mittalaitteen näyttämästä. Kuvaajien vertailun helpottamiseksi langattomalla mittausjärjestelmällä saadut mittausarvot on kerrottu kymmenellä.



Kuva 43. Vääntömomenttitransientin vertailumittaus.

Kuvan 43 tilanteesta taajuusmuuntajan mittausarvojen mukaan piirretty kuvaaja on esitetty liitteessä 5. Liitteen 5 kuvassa esiintyvä vääntömomenttiaskel on suuruudeltaa 5 - 55 % moottorin nimellisestä vääntömomentista. Tiedetään että 55 %:a 700 Nm:stä vastaa noin 385 Nm vääntömomenttia. Kuvasta 43 nähdään langallisen mittauksen (violetti kuvaaja) antavan suurin piirtein vastaavan tuloksen. Lisäksi kerrottaessa langattomalla mittausjärjestelmällä mitatut arvot kymmenellä (Vihreä kuvaaja), saadaan likimain taajuusmuuttajan sekä langallisen mittausjärjestelmän tuloksia vastaavat vääntömomenttiaskeleen arvot. Langattoman ja langallisen vääntömomenttianturin mittauksista tarkennettu kuvaaja on esitetty kuvassa 47, missä vihreä on langattomalla ja violetti langallisen mitta-anturilla mitattu signaali.

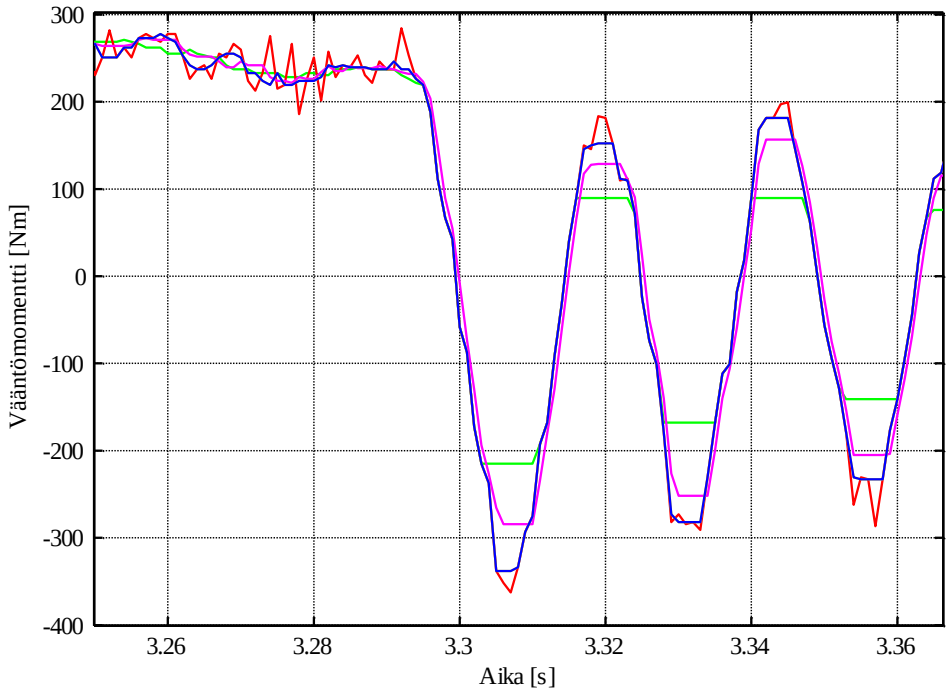


Kuva 44 Tarkennettu kuva vääntömomenttitransientin vertailumittauksesta.

Kuvasta 44 nähdään molemmilla mittausjärjestelmillä saatujen tulosten samankaltaisuus. On huomioitavaa että langattoman mittausanturin signaalia ei tässä kohtaa ole suodatettu.

4.7 Mediaanisuodatin

Mediaanisuodattimen vaikutus on esitetty kuvassa 45, missä punainen on suodattamaton mittausdata. Sininen kuvaaja on suodatettu mediaanisuodattimen arvolla viisi, violetti arvolla 10 sekä vihreä arvolla 15.

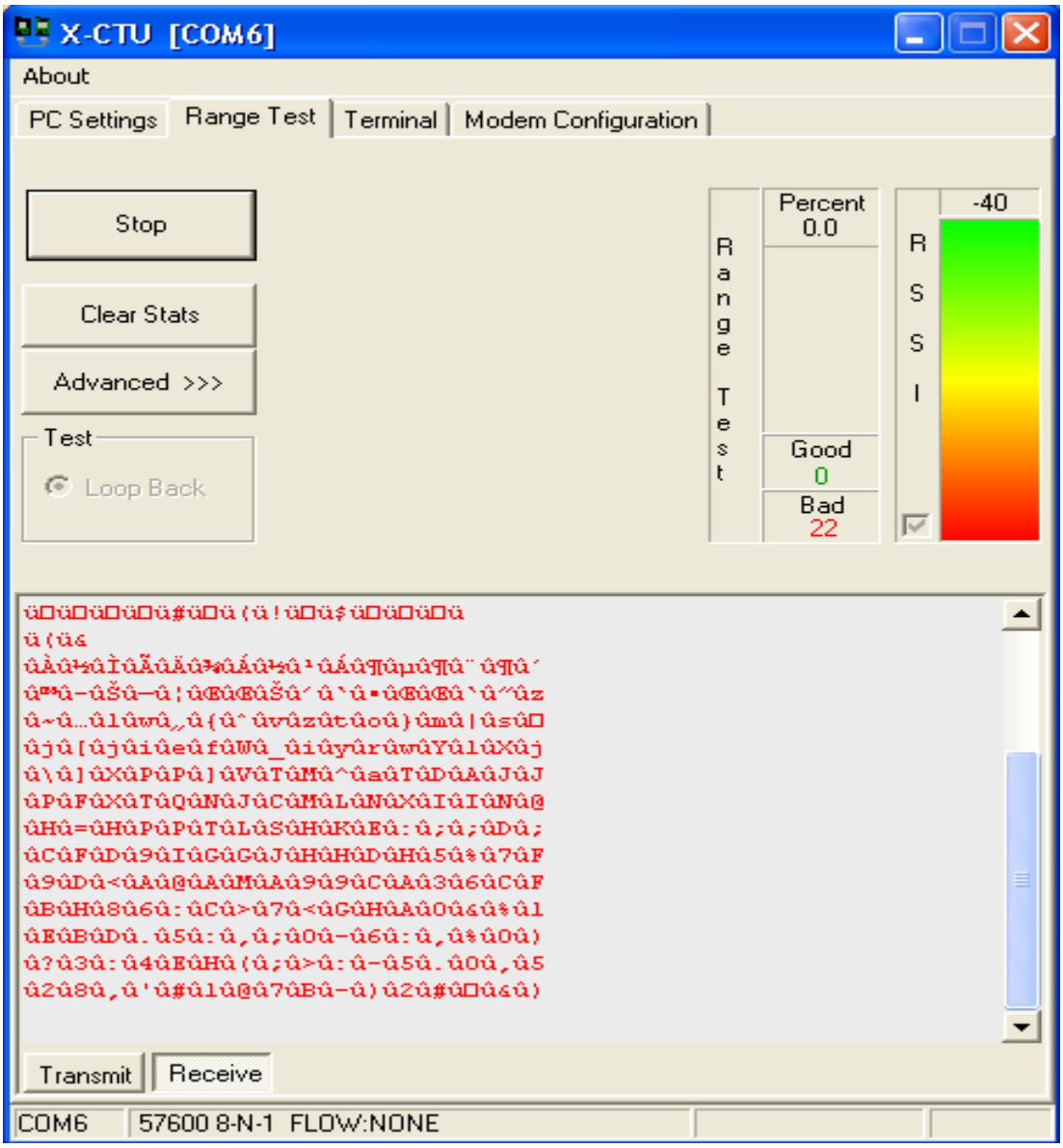


Kuva 45. Mittaussignaalin mediaanisuodatus. Kuvasta nähdään suodatuksen aiheuttama signaalin leikkaantuminen.

Kuvasta 45 nähdään kuinka mediaanisuodatuksen kasvattaminen vaikuttaa signaalin käyränmuotoon. On huomioitavaa että lyhyissä näyte pätkissä voidaan käyttää pienempää suodatusta. pitkissä mittauksissa suodatuksen lisäämisellä parannetaan kuvaajan tulkittavuutta. Tässäkin tapauksessa voidaan todeta signaalinkäsittelyn suorittamisen tietokoneessa Matlab-ohjelmalla olevan hyvä ratkaisu.

4.7 Kentänvoimakkuusmittaus

Langattoman tiedonsiirron toimivuutta tutkitaan mittaamalla vastaanotetun signaalin voimakkuutta. X-CTU-ohjelmassa on valmiina kentänvoimakkuus mittaukseen soveltuva työkalu. X-CTU-ohjelma mahdollistaa RSSI-mittauksen (Received Signal Strenght Indicator). RSSI-mittari ilmoittaa graafisesti viimeksi vastaanotetun paketin signaalin voimakkuuden. RSSI-mittaus on tarkka silloin kun signaalin voimakkuus on välillä - 40 dBm - - 100 dBm [XBee Pro, 2008], [X-CTU, 2008]. X-CTU-ohjelman RF-linkin testausvälilehti on esitetty kuvassa 46.



Kuva 46. RSSI-mittaus X-CTU-ohjelmalla. Viimeksi vastaanotetun paketin signaalin voimakkuus on - 40 dBm.

Arvioitaessa vastaanotettavan signaalin voimakkuuksia käytetään vapaantilan vaimennuksen yhtälöä

$$D_{\mathrm{LOS}} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda}\right) \tag{54}$$

missä d on lähettimen ja vastaanottimen etäisyys sekä λ tarkasteltavan signaalin aallonpituus. Vastaanotettavan signaalin teho watteina lasketaan yhtälöllä 55

$$RSS_W = 10^{\frac{(G_{\mathrm{TX}} + G_{\mathrm{RX}} + D_{\mathrm{LOS}})}{10}} \cdot P_{\mathrm{TX}} \qquad (55)$$

missä G_{TX} on lähettimen ja G_{RX} vastaanottimen antennin vahvistus suhteessa isotrooppiseen säteilijään sekä P_{TX} lähetysteho. Tyypillisesti signaalin tehot ilmoitetaan dBm:nä. Lineaari asteikon teho arvot muutetaan logaritmiselle asteikolle yhtälöllä 56

$$RSS_{dBm} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{RSS_W}{1 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{W}}\right) \qquad (56)$$

Vapaantilan vaimennukset ja vastaanotettavan signaalin teoreettiset arvot eri etäisyyksille on listattu taulukkoo 11 Lähetystehon ollessa 50 mW ja käytettäessä liuska-antenneja.

Taulukko 11 Vapaantilan vaimennukset ja vastaanotettavan signaalin teoreettiset voimakkuudet.

Etäisyys [m]	Vapaantilan vaimennus [dB]	Signaalin voimakkuus [W]	Signaalin voimakkuus [dBm]
0,2	26,1	5,2E-07	-32,8
0,5	34,0	8,5E-08	-40,7
1,0	40,0	2,1E-08	-46,7
1,5	43,6	9,3E-09	-50,3
2,0	46,1	5,2E-09	-52,8
4,0	52,1	1,3E-09	-58,8
5,0	54,0	8,5E-10	-60,7
6,0	55,6	5,8E-10	-62,3
10,0	60,0	2,1E-10	-66,7

On huomioitavaa että arvio pätee vain tilanteisiin, jolloin lähettimen ja vastaanottimen välillä on näköyhteys. Arvio ei ota huomioon signaalin heijastumisien, taittumisen sekä sironnan vaikutuksia signaalin voimakkuuteen. Signaalin monitie-etenemisestä aihetuva signaalin vahvistuminen tai vaimeneminen niin ikään jää huomiotta. Mittauksella ei myöskään pystytä määrittämään montako pakettia jää kokonaan siirtämättä [X-CTU, 2008]. Koska paketin lähettämiseen kuluva aika on paljon akselin pyörähdysaikaa pienempi, voidaan koko paketin lähettämisen arvioida tapahtuvan samasta akselin asennosta. Tällöin mittaus suoritetaan siten että akseli ja lähetin asetetaan tiettyyn asentoon, jonka jälkeen

signaalin voimakkuus mitataan eri etäisyyksiltä sekä kahdesta eri suunnasta lähettimeen nähden.

Taulukoon 12 on listattu kentänvoimakkuusmittaukset, joissa vastaanotin sijoitetaan kohtisuoraan moottorin akseliin nähden.

Taulukko 12. Kentänvoimakkuusmittaus kohtisuoraan sivulta akseliin nähden.

	Lähettimen asento mittaussuunnasta katsoen akselin suhteen				
etäisyys [m]	päällä	takana	alhaalla	edessä	[- dBm]
0,2	49	57 - 60	59 - 63	57	
2	65 - 67	67 - 69	57 - 60	62 - 64	
5	80	81 - 88	72 - 75	79 - 82	
10	101 - 95	95 - 104	77 - 78	79 - 80	

Taulukosta 12 nähdään, että 10 m etäisyydellä tietyissä akselin asennoissa kentänvoimakkuus laskee vastaanottimen herkkyysrajalle. On huomioitavaa että kahden sekä viiden metrin etäisyydellä kentänvoimakkuus vaihtelee vähiten eri akseliasentojen välillä. Verrataessa mitattuja signaalinvoimakkuuksia teoreettisiin arvioihin, voidaan todeta että mitatut signaalitasot ovat aina huomattavasti teoreettisia arvoja pienempiä. Taulukkoon 13 on listattu tulokset mittauksesta, jossa vastaanotin sijoitetaan akselin pituussuuntaan moottorin taakse.

Taulukko 13. Kentänvoimakkuusmittaus akselin pituussuunnasta moottorin takaa.

	Lähettimen asento mittaussuunnasta katsoen akselin suhteen				
etäisyys [m]	päällä	oikealla	alhaalla	vasemmalla	[- dBm]
1,5	69 - 70	64 - 67	73 - 74	61 - 64	
4	66 - 68	71 - 74	69 - 68	72 - 74	
6	87	79 - 80	73 - 74	82 - 84	

Taulukon 13 perusteella voidaan todeta että aivan koneen rungon takana kentänvoimakkuus on heikompi kuin 4 m etäisyydellä. Mikäli signaalinvoimakkuus halutaan madollisimman vakaaksi, vastaanotin tulee sijoittaa kahden metrin etäisyydelle kohtisuoraan lähettimeen nähden moottorin sivulle. Suurimmat kentänvoimakkuudet saavutetaan lyhyellä siirtoetäisyydellä. Lisäksi on huomioitavaa että kentänvoimakkuudet ovat voimakkaasti riippuvaisia ympäristöstä.

5 YHTEENVETO

Tässä kappaleessa kerrataan työn lähtökohdat sekä tarkoitus, kootaan yhteen työssä saavutetut tutkimustulokset, Lisäksi listataan mahdolliset jatkotoimenpiteet.

Työn lähtökohtana on ilmennyt tarve nopeasti asennettavalle väliaikaisiin mittauksiin soveltuvalle vääntömomentin mittausjärjestelmälle. Työssä toteutetaan: Langattoman vääntömomenttimittausjärjestelmän suunnittelu, mittausepävarmuusrajojen määrittäminen, prototyypin valmistaminen sekä lisäksi teoreettisten laskelmien paikkansapitävyyden määrittäminen tarvittavilla mittauksilla. Mittausjärjestelmän toteutetaan moduulirakenteisena, jolloin kehitystyöhön kuluvaa aikaa saadaan lyhennettyä. Järjestelmän suunnittelun ja toteutuksen suuria osakokonaisuuksia ovat: Liimattavien venymäliuskojen korvaaminen venymäliuskamittasiltapannalla, sekä valmis venymäliuskamittasiltaan sopiva analogiavahvistin. Venymäliuskamittasillan A/D-muuntimen ohjaus toteutetaan µC:llä, jonka toiminnallisuus määritetään ohjelmallisesti. Mikrokontrollerille kirjoitetaan tarkoitukseen soveltuva ohjelmakoodi. Mittaustiedot analysoidaan Matlab-ohjelmalla, johon niin ikään kirjoitetaan tarkoitukseen soveltuva ohjelma. Mittausjärjestelmän kiinnittämiseksi akselille suunnitellaan kiinnityslaippaparit AutoCAD-ohjelmalla. Mittausjärjestelmä voidaan mukauttaa eri akselihalkaisijoille vaihtamalla venymäliuskamittasilta sekä mittauslaitteiston kiinnityslaippaparit. Joissain tapauksissa kannattaa vaihtaa myös mittasiltavahvistin. Tällöin vahvistimen lähtöjänniteskaala saadaan mitoitettua mahdollisimman tarkasti tarvittavan mittausalueen mukaan. Ohjelmallisella puolella vaihdetaan järjestelmä parametrit Matlab-ohjelmaan.

Aikaisempiin testeihin pohjautuen langaton tiedonsiirto toteutetaan Zigbee-radiotekniikalla. Tiedonsiirrossa sovelletaan valmiita radiomoduuleja, jotka kytketään järjestelmän muihin osiin tarkoitukseen soveltuvilla tiedonsiirtoprotokollilla. Langattoman tiedonsiirron toimivuutta testattiin kentänvoimakkuusmittauksilla. Paras keskimääräinen kentänvoimakkuus mitattiin vastaanottimen ollessa mahdollisimman lähellä lähetintä. Akselin asennon vaikutus kentänvoimakkuuteen on vähäisintä, sijoitettaessa vastaanotin noin viiden metrin päähän lähettimestä.

Langattomalla anturilla tehtyjä mittauksia verrattiin langallisella vääntömomenttianturilla mitattuihin tuloksiin. Langattoman vääntömomenttianturin mittaustuloksissa ilmenee skaalausvirhe, jonka aiheuttajaksi määritettiin mittausjärjestelmän analogiaosa.

Vääntömomenttimittasillan toiminta on vahvasti lämpötilasta riippuvainen. Mittauksissa huomattiin anturin lämpenemisen vakiolämpötilaan vievän noin 30 minuuttia. Lämpenemiseen kuluva aika on kullekin mittausympäristölle yksilöllinen piirre. Mittalaitteella voidaan mitata vääntömomenttitasoja, sekä vääntömomenttivärähtelyjä sekä muutosilmiöitä. On huomioitavaa ettei mittausjärjestelmä sovellu hyötysuhteiden mittaamiseen.

Seuraavaan on listattu joitakin järjestelmän jatkokehittämisen kannalta oleellisia asioita:

-Analogiamittasilta ei soveltunut täysin käyttökohteeseen, näin ollen mittausjärjestelmän analogiaosan kehitystyötä on jatkettava. Paremmin lämpötilakompensoituja malleja on markkinoilla.[http://www.baumerelectric.com]

-Sähkömagneettisten häiriöiden vaikutuksia voi edelleen pienentää koteloinnin ja kaapeloinnin parantamisella.

-LabView-ohjelma on liian hidas datan tallentamiseen ja käsittelyyn reaaliajassa. Reaaliaikseen mittaustulosten näyttöön soveltuvaa käyttöliittymää voi jatkokehittää.

-Mittaustiedon synkronointi muiden mitattavien suureiden kanssa. Jos samasta mittauskohteesta kerätään tietoa muilla mittareilla, synkronointi vääntömomenttimittauksen kanssa on hankalaa. Datan tallennus liipaistaan käyntiin satunnaisella hetkellä, tällöin on mahdollista että tallennus aloitetaan satunnaisesta kohdasta vastaanotettavaa datapakettia. Mittaustiedon siirtoviive on epädeterministinen, eli siirtoviive vaihtelee, siirtoviiveessä esiintyvä jitteri on > 40 ms.

-RF-linkin suorituskykyä voi tutkia lisää. Kokonaan siirtämättä jäävien pakettien määrän laskemiseksi, lähetin täytyy ohjelmoida lähettämään tietty määrä paketteja. Pakettien lähetys voidaan liipaista käyntiin etäkomennolla. Tällöin voidaan mitata esimerkiksi akselin pyörimisnopeuden vaikutusta tiedonsiirron luotettavuuteen sekä verrata tuloksia keskimääräisiin kentänvoimakkuusmittauksiin.

LIITTEET

1 [µC:n ohjelmakoodi]

```
#include <stdio.h>
#include <avr/io.h> // prossun kirjasto
#include <inttypes.h>
#include <avr/interrupt.h>
//kirjoitus komento ja toiminta osoite annetaan samassa tavussa.
#define ConvUP PORTD = PIND|(1<<3)
#define ConvDOWN PORTD = PIND&~(1<<3)
#define BridgeON PORTE = PINE|(1<<5) //mittasiltaan sähkötpäälle, PORTE5
#define BridgeOFF PORTE = PINE&~(1<<5) //mittasillasta virrat pois
#define RESETON PORTD = PIND|(1<<7) // mittasillanresetointi,                    PORTD7
#define RESETOFF PORTD = PIND&~(1<<7)//reset kytkin pois päältä
#define START_ADC_CONVERSION ADCSRA |= (1<<ADSC)
#define DDR_ADC DDRF    /* A/D converter interface is in Port F. */
#define PORT_ADC PORTF

                        volatile uint8_t status=0;
                        volatile uint8_t MittasiltaFET;
                        volatile uint8_t RESETFET;
                        volatile uint8_t ReadConversion=0;
                        volatile uint16_t SPIregH = 0;
                        volatile uint8_t SPIstate = 0;
                        volatile uint8_t        nayte = 0;
                        volatile uint8_t        tavu  = 0;
                        volatile uint8_t startUSART=0;
                        volatile uint8_t USARTready = 1; // 1 usart vapaa, 0 usart busy
                        volatile uint8_t USARTstate;//tilat: msiirtorekisteristä erotus kahdeksi tavuksi, USARTMSB kirjotus,
USARTLSB kirjoitus 1
                        volatile uint8_t TempLSB=0;
                        volatile uint8_t TempMSB=0;
                        volatile uint8_t np1 [50][2]; // 47 näytettä yhdessä paketissa , taulukon alkiot[nayte][tavu]
                        volatile uint8_t np2 [50][2];
                        volatile uint8_t matriisinluku = 1;
                        volatile uint8_t usartnayte = 0;
                        volatile uint8_t MSB = 0;
                        volatile uint8_t LSB = 0;
                        volatile uint8_t regnro = 1;
                        volatile char state = 3;

void spi_init(void)
                        {
                        SPCR=0b11010111;//SPI_INT_EN SPI_EN, MAster_MODE, bit set on RISING_edge(LEADING
EDGE),
                        //bit read FALLING_edge. MSB first. SPI_CLK LOW WHEN IDLE bit1:0==11 prescale 128,=> @16
MHz 125 kHz SPIclk
                        }

void init_uart(void)
                        {
                        //ATmega128
                        UCSR0A =0x00;
                        UBRR0H =0x00;
                        //UBRR0L =0b00000001;  //lähetystaajuus 9600 bps (Dec 23 @ 3,6864 Xtal) 0d1 = 115.2kbps,
                        UBRR0L =0b00001000;                    //@16MHz UBRR=8, 115.2 kb/s. UBRR = 16, 57.5kb/s
                        UCSR0C =0b00000110;  // Asycronous no parity  8-bit data ...jne
                        UCSR0B =0b11011000; // RXEN0 TXCIE0 UDRIE RXEN TXEN ....
                        }

//Oscillator frequency need to be adjusted from 3,686.400 MHz to 16 MHz
//Headerboards crystal is 16 MHz


void ADC_IRQspi_init(void)//tällä tarkkaillaan millon A/D-muunnos valmistuu
{
```

```
EICRA=0x0C;//0b00001100
EICRB=0x00;//INT1 rising edge interrupt@ EINT1 PD1
EIMSK=0x02;//0b00000010;/INT1 interrupt enabled
}


ISR(USART0_RX_vect)
{
state = UDR0;
PORTC=0xBA;
switch (state)
		{

				case 'a':
				BridgeON;
				break;

				case 'b':
				BridgeOFF;
				break;

				case 'c':
				RESETON;
				break;

				case 'd':
				RESETOFF;
				break;

		}
}


void init_ADC(void)
		{
		DDR_ADC=0x00;  /* Set ADC port as inputs. */
		PORT_ADC=0x00; /* DO NOT USE internal pull-up resistors. They would mess up the measurement. */

		/* Bits in the ADMUX register:
								REFS1 (7) ja REFS0 (6):
								00		AREF, internal Vref
turned off,  level fixed in avr studio		<=
								01		AVCC with external
capacitor at AREF pin
								10 reserved
								11		internal 2.56V voltage
reference
								ADLAR (5): ADC Left Adjust Result
								0		right adjust (XXXX
XXbb bbbb bbbb)		<=
								1		left adjust (bbbb bbbb
bbXX XXXX)
								MUX[4..0]
								... 00111 Single Ended Input, channel ADC0,
PinF0. */
		ADMUX = 0b11000000;

		/* ADCSRA - AD Control and Status Register A
								ADEN (7): ADC Enable
								1: Enabled, 0: Disabled
								ADSC (6): ADC Start Conversion (cf. the
ADC_START_CONVERSION macro defined at the top, NO NEER FOR THIS THUS WE ARE IN FREE RUNNING
MODE, ONCE SET RUNNING OVER AGAIN.)
								ADFR (5): ADC Free Running Select
								1: Free Running Mode, 0: Single
Measurement Mode
								ADIF (4): ADC Interrupt Flag
								ADIE (3): ADC Interrupt Enable
								1: Enabled, 0: Disabled
								ADPS[2..0]: ADC Prescaler Select Bits
								Division factor between XTAL freq. and ADC
input clock.
								000: 1, 001: 2, 010: 4, 011: 8, 100: 16, 101:
32,
								110: 64, 111: 128 */
		ADCSRA = 0b10001111;		/* Enable the ADC & ISR and set prescaler to 128. */
```

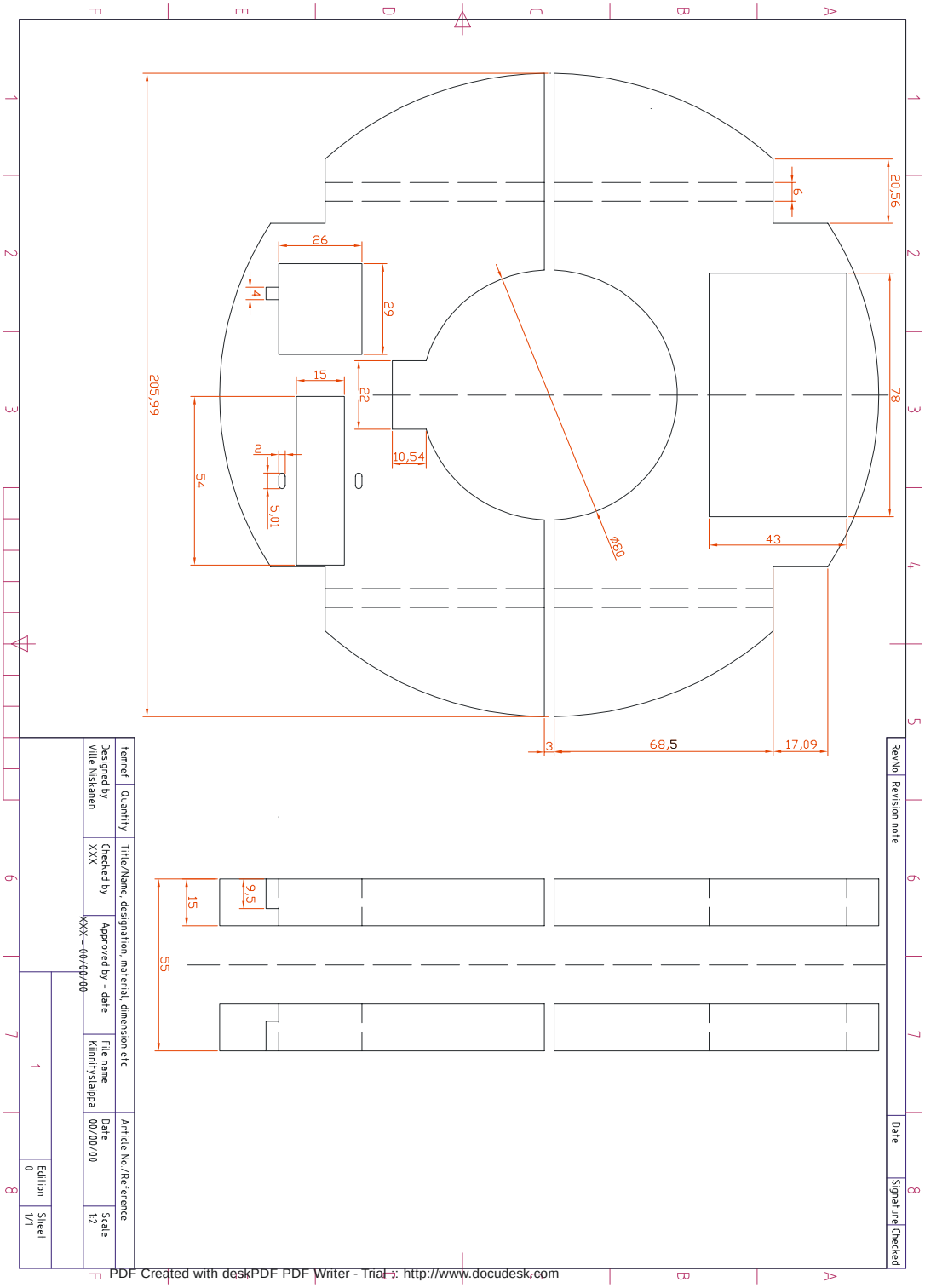
```
                    }
                    //for optimum accuracy on ADC I/O clk frequency should be placed between 50kHz -200kHz
                    //let's assume that we have 8MHz CPU clk, by prescaling CPU clk with 40 we achieve 200kHz pole.
                    //64 prescale is used to provide 125khz to ADC.


void Timer1_init(void)
{

TIMSK=0x04;//TOIE1 0b00000100
TCCR1A=0x00;//no output pins, normal mode
TCCR1B=0x02;//prescaler 8 0b00000010
TCCR1C=0x00;
TCNT1H=0xF8;
TCNT1L=0X30;
//TCNT1H=0b11111000;//F8 65536 on maksimiarvo TOP  65538-2000=63536
//TCNT1L=0b00110000;//63536 30 vähennetään TOP arvosta 1 ms sekvessiin kuluva aika eli 2000 kellojaksoa.

}


ISR(USART0_TX_vect)//tarkistettava missä järjestyksessä USART-rekisteriä luetaan ja kirjoitetaan
//kun paketti on saatu siirrettyä loppuun tulee IDLE-tila. Kuitenkin viimeisen LSB:n lähettämisen jälkeen tullaan vielä kerran
keskeytys ohjelmaan
//silloin pitää varmistua ettei lähetetä mitään.
                    {
                    if (startUSART == 2)
                              {
                              if (regnro == 2)
                                        {
                                        if (matriisinluku == 1)
                                                  {
                                                  //if(usartnayte <= 48)nyt ei pitäisi tulla
ylimääräistä tavua pakettiin.
                                                            //{
                                                            UDR0 =
np1[usartnayte][0];//MSByte USART:iin
                                                            matriisinluku = 2;
                                                            //}
                                                  //else if(usartnayte == 49)
                                                            //{
                                                  //        matriisinluku = 2;
                                                            //UDR0=np1[49][0];
                                                  //        }
                                                  //else{}
                                                  }
                                        else if (matriisinluku == 2)
                                                  {
                                                  if (usartnayte <= 48)
                                                            {
                                                            UDR0 =
np1[usartnayte][1];//LSByte USART:iin
                                                            matriisinluku = 1;
                                                            usartnayte = usartnayte +
1;
                                                            }
                                                  else if (usartnayte == 49)
                                                            {
                                                            startUSART = 0;
                                                            UDR0 =
np1[49][1];//LSByte USART:iin
                                                            usartnayte = 0;
                                                            matriisinluku = 2;

                    START_ADC_CONVERSION;
                                                            }
                                                  else{}
                                                  }
                                        }

                              else if (regnro == 1)
                                        {
                                        if (matriisinluku == 1)
                                                  {
                                                  UDR0 = np2[usartnayte][0];//MSByte
USART:iin
```

```
                                                                    matriisinluku = 2;
                                                                    }

                                                        else if (matriisinluku == 2)
                                                                    {
                                                                    if (usartnayte <= 48)
                                                                                {
                                                                                UDR0 =
np2[usartnayte][1];//LSByte USART:iin
                                                                                matriisinluku = 1;
                                                                                usartnayte = usartnayte
+1;
                                                                                PORTC=usartnayte;
                                                                                }
                                                        else if (usartnayte == 49)
                                                                                {
                                                                                startUSART = 0;
                                                                                UDR0 =
np2[49][1];//TempLSByte USART:iin
                                                                                usartnayte = 0;
                                                                                matriisinluku = 2;

                    START_ADC_CONVERSION;// lämpötila mitataan kerran jokaiseen puskuri pakettiin.
                                                                                }
                                                                    else{}
                                                                    }
                                                        }
                                        else{}
                    }
                    else{PORTC=0xF0;} //[49] [1] lähetyksen päätteeksi suoritetaan tämä.
                    }


//AD_muunnoksen ISR
ISR(ADC_vect)//aref pinni irti!!!
                    {
                                        TempLSB=ADCL;           /* Low byte of the result... */
                                        TempMSB=ADCH;                                                       /*
...and the high byte. The read order matters! (See datasheet.) */
                    if (regnro == 2)
                                        {
                                        np1[49][1]=TempLSB;
                                        np1[49][0]=TempMSB;
                                        }
                    else if (regnro == 1)
                                        {
                                        np2[49][1]=TempLSB;
                                        np2[49][0]=TempMSB;
                                        }
                    else{}
                    }


ISR(TIMER1_OVF_vect)//suoritetaan abt millisekunnin välein jolloin näytteistys taajuus on 1 kHz.
                    {
                    //asetetaan laskurirekisterin arvo.
                    TCNT1H=0xF8;//F1 65536 on maksimiarvo TOP  65538-2000=63536
                    TCNT1L=0x30;//63536 99 vähennetään TOP arvosta 1 ms sekvessiin kuluva aika eli 2000 kellojaksoa.
@16MHz
                    ConvDOWN;//liipaistaan muunnos käyntiin. 1ms:n välein
                    SPIstate = 0;
                    }


ISR(INT1_vect)//AD-muunnoksen valmistuessa tullaan tänne hortoilemaan.PORTD1 laskevalla reunalla.
                    {

                    if (SPIstate == 0)
                    {
                    //ConvDOWN;
                    //START_ADC_CONVERSION;
                    //PORTC=0x00;//toimii
                    SPIstate=1;//nyt spi-tavun vastaanoton jälkeen päästään sijoittamaan vastaanotettu tavu SPIreg:iin
                    SPDR=0x00; //lähetetään 0, tarkoitus on vain generoida spi-väylän synkronointikello
                    //UDR0=naytepuskuri2[45][1];//testi pätkä
                    }
```

```
                    else{}

                    }


ISR(SPI_STC_vect)// tarkoittaa myös että data on otettu vastaan
{

                    if(nayte <= 48)
                    {
                                        if (SPIstate == 1)
                                                            {
                                                            MSB=SPDR;//8 MSB:tä
                                                            SPIstate=2;
                                                            if (regnro == 1)
                                                                                {
                                                                                np1[nayte][0] = MSB;
                                                                                }
                                                            else if (regnro == 2)
                                                                                {
                                                                                np2[nayte][0] = MSB;
                                                                                }
                                                            else{}
                                                            SPDR=0x00;//LSbittien siirtämistä varten
                                                            }

                                        else if (SPIstate == 2)
                                                            {
                                                            ConvUP;
                                                            LSB=SPDR; //8 LSB
                                                            SPIstate=3;
                                                            if(regnro == 1)
                                                                                {
                                                                                np1[nayte][1] = LSB;
                                                                                //nayte = nayte +1;
                                                                                PORTC=nayte;
                                                                                }
                                                            else if (regnro == 2)
                                                                                {
                                                                                np2[nayte][1] = LSB;
                                                                                //nayte = nayte +1;
                                                                                }
                                                            else{}
                                                            nayte = nayte +1;
                                                            }
                    }

                    else if(nayte == 49)
                                        {
                                        PORTC=0x0F;
                                        startUSART = 1;
                                        nayte = 0;
                                                            if(regnro == 1)
                                                                                {
                                                                                regnro = 2;
                                                                                }
                                                            else if(regnro == 2)
                                                                                {
                                                                                regnro = 1;
                                                                                }
                                                            else{}
                                        }
                    else{}
}


int main(void)
{
cli();
spi_init();
init_uart();
init_ADC();
Timer1_init();
DDRE = 0xFF;//vaikka täällä kaikki alustetaankin lähdöiksi, uart:ni käyttöönoton yhteydessä uartportit alustuu tarkoituksen
mukaisesti.
PORTE = 0x00;
```

```
ADC_IRQspi_init();
DDRD=0xFD;
PORTD=0x00;
DDRC = 0xFF; //määritellään outputeiksi
PORTC = 0xFF; // ulosmenot ykkösiksi, tällöin looginen tila 0  YLÖS VETOVASTUKSET, ledit poissa päältä
//PORTC status rekisteri inputeiksi

//START_ADC_CONVERSION;//LÄMPÖTILANMITTAUS KÄYNTIIN. EI PITÄS TARVITA TÄTÄ.
DDRB = 0b11110111; //lähdöiksi kaikki paitsi MISO PB3-pinni.
//tällöin ei tule ongelmaa SS-pinnin kanssa.

sei();


        while(1)
        {
        ConvUP;
        //PORTC = 0xFF;
                //ConvUP;
                // puskurirekisterin vaihto ja taulukkoindeksin nollaus


                //täällä trigataan USART käyntiin

                if ((startUSART == 1)&(regnro == 2))
                {
                startUSART = 2;

                UDR0 = np1[0][0];//ensimmäisenä tallennetun näytteen MSB-alkio
                matriisinluku = 2;
                //regnro=2;
                }
                else if ((startUSART == 1)&(regnro == 1))
                {
                startUSART = 2;
                UDR0 = np2[0][0];//ensimmäisenä tallennetun näytteen MSB-alkio
                matriisinluku = 2;
                //regnro= 1;
                }
                else{}


        }
return 0;
}
```

2 [Kiinnityslaippaparin koneistuskuva]



PDF Created with deskPDF PDF Writer - Trial : http://www.docudesk.com

3 [Mittausdatan käsittely ohjelma, MATLAB]

```
clear
R = 0.04; %akselin säde [m]
D = 2*R; %akselin halkaisija
E = 210*10^9; %Kimmokerroin [N/m^2]
K = 2; %Siltavakio
%t = 2000; %mittausjakson kesto [s]
%Sample = t*1000; % jokaista mittaus sekuntia kohden otetaan 1000 näytettä
(SampleFREQ. 1 kHz)
%Filepath = C:/Torque18082008.txt; %määritetään mittausdatan sisältävä tiedoston
polku

%--------------------------------
% LÄMPÖTILAN MITTAUS

%Uin = (TempADC/1024)*5; % Lämpötilan ADC-muunnos on 10-bittinen, mittausalue on 0 -
5 V.
%Temp = (-1481.96 + sqrt(2.1962*10^6 + (1.8639-(Uin)/3.88*10^-6))-20; %LM-19
lämpötila-anturin siirtofunktio.
%DTemp = Temp-20; %Lämpötilan vaikutusta Vääntömomentin mittaukseen tarkastellaan 20
C referenssi pisteen suhteen.
%--------------------------------
% Vääntömomentin siirtofunktio

                        %Torque =
                        %1.4*10^-3*pi*(E-E*3*10^-
6*DTemp)*D^3*TorqueADC/((DTemp*12*10-^4*K+K)*16*2^16);
                        %Mittausdata tiedoston lataus
                        %load -ASCII justjuu.txt %tiedostoa etsitään  'path'
komennolla saatavan listan kohteista. Uusia polkuja voidaan lisätä 'addpath'-
komennolla jne
fid=fopen('staticnoise4.txt'); %tiedosto kaapataan RealTerm ohjelmalla. Capture
välilehti ja tiedoston nimi Esim C:\ABB.txt, näytteen pituus määritetään
                        %'END After' -kohdasta. Bytes: määräksi kelpaavat kaikki 200
jaolliset luvut.
DATA_FILE       = fread(fid);
TOTALLENGTH     = length(DATA_FILE);
%MEASURETIME     =((length(DATA_FILE)-2*PACKETNUMBER)/2)/1000; %[s] lasketaan
näytteen pituus ajallisesti
%%STARTPOINT      =(TOTALLENGTH-PACKETNUMBER*100)+1;%määritetään datavektorin luvun
aloituspiste.
%koska mittausdatan tallentaminen alitetaan satnnaisella ajan hetkellä on
%mahdollista ettei datan tallennus ala paketin alusta. tällöin datavektorin
%alkuun tulee näytteitä joiden mukaan ottaminen häiriöittää laskenta
%sekvenssin. sillä joka 50 näyte on lämpötilan arvo joka täytyy saada
%erotettua vääntömomentti anturilta kerätystä mittaus datasta.


%%RealTerm ohjelman toiminnasta johtuen, käynnistettäessä mittausdatan
%%tiedostoon kirjoitus, voi vajaa paketti esiintyä tiedoston Datavektorin
%%alussa tai lopussa.
%Tutkitaan DATA_FILE vektori ja määritetään missä on vajaita paketteja.
%Pakettien eheys määritetään lämpötila arvon perusteella, eli etsitään
%toistuvaa sekvenssiä joka on mahdollinen lämpötila-arvo. Ensimmäisen arvo
%parin löytyessä tarkastetaan koko datavektori sitten että varmistutaan
%siitä että sekvenssi toteutuu. Lämpötila arvon oletetaan olevan välillä
%15-52 C eli käytännössä etsitään tavuparia MSB 1 , LSB 0- 94
%Kun ensimmäinen pari löydetään seuraavat tulokset eivät saa heittää yli 10 LSB:tä
%muutoin sekvenssiä ei pidetä luotettavana.
Endi=TOTALLENGTH;
ready=0;
for n=1:1:Endi;
    if ready == 0
     if DATA_FILE(n)==1
        if DATA_FILE(n+1) <= 90
            STARTPOINT = n+2;
            FTempMSBn =n;
            FTempLSBn =n+1;
            FTempLSB =DATA_FILE(n+1,1);
            FTempMSB =DATA_FILE(n,1);
            ready =1;
        end
     end
```

```
    else
    end
end

PACKETNUMBER    = fix((TOTALLENGTH-STARTPOINT)/100);%lasketaan datavektorin
sisältämien tavujenmäärä, jonka jälkeen määritetään täysien pakettien määrä.
ENDPOINT= PACKETNUMBER*100;
% Kun sekvenssin kiintopiste on paikallistettu, tarkistetaan että sekvenssi
% pätee ENDPOINT:in asti.

erroroccured=0;
for i=STARTPOINT:100:ENDPOINT;
   if DATA_FILE(i+99)> 94 | DATA_FILE(i+98)~= 1
    ERROR=2;
   if erroroccured == 0
    errorplace = i;
   erroroccured=1;
   end
   end
end



%yhdistetään tavu parit 16-bittisiksi sanoiksi
n=1;                     %16Bittisen sanavektorin soluosoitin
                    %8-bittisen datavektorin soluosoitin.

for i=STARTPOINT:2:ENDPOINT;
    UINT=DATA_FILE(i,1)*256+DATA_FILE(i+1,1); %MSB-tavu kerrotaan 256 ja summataan
LSB tavuun

    if UINT < 32768% AD_muunnin lähettää negatiiviset jännite arvot 2.
komplementtina. Eli HEXA-luvut 0- 7FFF (0-32767) vastaavat positiivia jännite arvoja
                         %ja puolestaan FFFF-8000 negatiivisia arvoja. siten että FFFF
on
                         %lähinnä 0 tasoa oleva negatiivinen arvo ja FFFF suurin
negatiivinen
                         %arvo.
        WORD(n)= UINT;  % positiiviset väntömomentti arvot,
    elseif UINT >= 32768
        WORD(n)=UINT-65536; %negatiiviset vääntömomentti arvot
    end

    n=n+1;
end

                %%jaotellaan vääntömomentti arvot ja lämpötila referenssi.
                %%luodaan vääntömomenttiarvoille matriisi. Jokainen 49 sanainen
vektori
                %%omalle riville. Joka 50 sana tallennetaan lämpötila vektoriin,
celsius
                %%asteina sekä suhteellisena lämpötilana 20 C nähden.
PACKET1 = 0;
SAMPLE1 = 0;
n=1;
                %TorqueMATRIX = ([PACKETNUMBER, 49]);
                %TempVECTOR = (PACKETNUMBER);
for PACKET1=1:1:(PACKETNUMBER-1);
   for SAMPLE1=1:1:50;
        if SAMPLE1 < 50
            TorqueMATRIX(PACKET1,SAMPLE1) = WORD(n);
           n= n+1;
        elseif SAMPLE1 == 50
            TEMP(PACKET1) = WORD(50*PACKET1)*5/1024;
            TempVECTOR(PACKET1) =(-1481.96 + sqrt(2.1962*10^6 + (1.8639-
TEMP(PACKET1))/(3.88*10^-6)))-20;
            n=n+1;
        else
        ERROR=1;
        end
   end
end

                %LASKETAAN vääntömomtti arvot.
PACKET = 0;
SAMPLE = 0;
time=0;
```

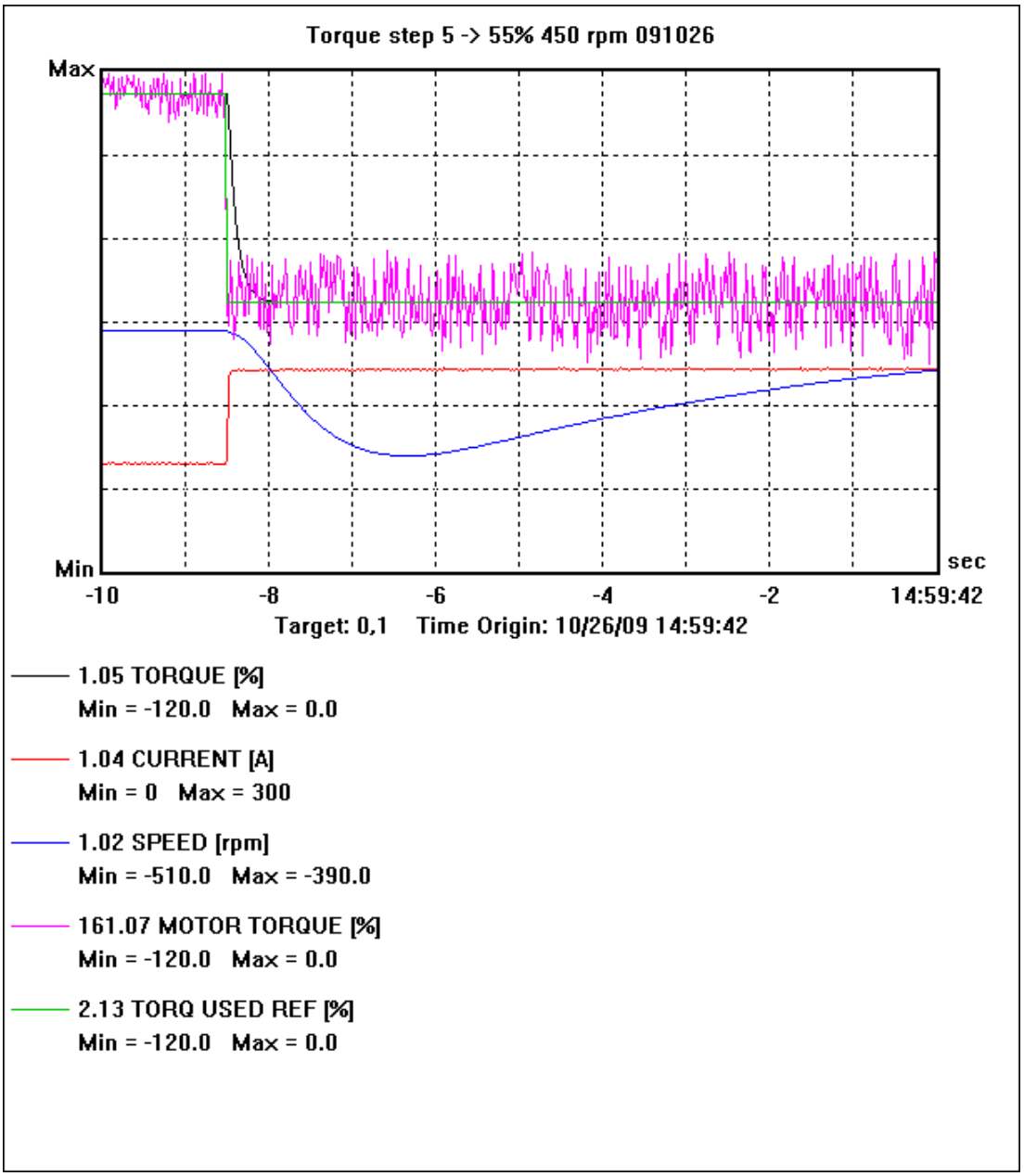
```
n=0;

for PACKET=1:1:(PACKETNUMBER-1);

    for SAMPLE=1:49;
        n=n+1;
        Torque(n) = 1.4*10^-3*pi*(E-E*3*10^-
6*TempVECTOR(PACKET))*D^3*TorqueMATRIX(PACKET,SAMPLE)/((TempVECTOR(PACKET)*12*10^-
4*K+K)*16*2^16);
        time(n)=n+1;
    end

end

i=1;

%ENDtime = length(time);
 %   for i=1:1:ENDtime
  %      TEMPPLOT(i)=TempVECTOR(n);
   %     i=i+1;
   % end
time=time/1000;
TorqueFiltered = medfilt1(Torque,15);
figure();
Torque=Torque*10;
plot(time,Torque,'r');
grid on;
hold;
xlabel('Aika [s]');
ylabel('Vääntömomentti [Nm]');
figure();
TorqueFiltered=TorqueFiltered*10;
plot(time,TorqueFiltered,'g');
grid on;
hold;
xlabel('Aika [s]');
ylabel('Vääntömomentti [Nm]');



       %% Jännite ajan funktiona
       c=0;
       SAMPLE=0;
       PACKET=0;
       for PACKET=1:1:(PACKETNUMBER-1);
          for SAMPLE=1:49;
             c=c+1;
             Voltage(c) = 10*(TorqueMATRIX(PACKET,SAMPLE))/32768;
            time1(c)=c+1;
          end
       end


        figure();
        VoltageFiltered = medfilt1(Voltage,15);
        plot(time,VoltageFiltered,'g');
        grid on;
        hold;
        xlabel('Aika [s]');
        ylabel('Jännite [V]');
       %%
figure();
hold;
plot(time1,Voltage,'b');
ylabel('Jännite [V]');
Xlabel('Aika [ms]');
grid on;


%%

% Kohinan RMS-arvo
% DC-komponentin poisto
d=0;
DCVoltageSum=0;
for d=1:1:n
```

```
DCVoltageSum=DCVoltageSum+Voltage(d);
end
VoltageDCkomp=DCVoltageSum/n%DC-komponentin arvo.


d=0;
VoltageSum=0;
for d=1:1:n
   ACVoltage(d)=(Voltage(d)-VoltageDCkomp);%poistetaan näytteistä DC-komponentti.
   VoltageSum=VoltageSum+(ACVoltage(d)^2); %kohinan energia
end
figure()
plot(time,ACVoltage,'b');
grid on;
hold;
xlabel('Aika [s]');
ylabel('Jännite [V]');

EnergyRMS = (1/n)*VoltageSum

PowerRMS = EnergyRMS/47000

%%
%taajuusanalyysi suodattamattomasta jännitesignaalista.
Fs = 1000; %1/(y(2,1)-y(1,1));

m=4096; % ikkunoiden pituus

       figure();
         % pwelch(ACTorque, hamming(m), [], 2048, Fs);
       [Pxx,f]=pwelch(Voltage, hamming(m), [], m, Fs);
       plot(f,10*log10((Pxx./47*10^3)./1e-3))%47000 A/D-muuntimen tuloimpedanssi.
       title(['Welch PSD Estimaatti']);
       xlabel('Taajuus [Hz]');
       ylabel('Tehotiheysspektri [dBm/Hz]');
       grid;
       hold;
```

4 [Venymälaskelma Baumerelectronics]

DSRC .. TO Srain Rings for torsion measuring						
Bar porperties						
Diameter	d	80	[mm]		mm	
upper tolerance		0	[mm]	Dmax =	80,00	
lower tolerance		-0,1	[mm]	Dmin =	79,90	
Material		1,7225	-			
Young's Module	E	205000	[N*mm-2]		210000	
Poisson's Ration	n	0,28	-		205000	
Shear Module	$G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)}$				2 %	
Shear Module						
				Nominal Moment	[N*mm-2]	
	G	80078,125	[N*mm-2]	Max. Bar Dia	0,3979	
				Min. Bar Dia	0,3994	
Application						
Torsion Load	M_t	40	[Nm]	Variating the Moment		
Tolerance of the load	+/-	0,2	[Nm]	Max. Moment	0,3999	
				Min. Moment	0,3959	
a) Round bar	$I_p = \frac{\pi}{32} \cdot d^4$					
Polar moment of interia				Variation of Young's Module		
(round bar)				Gmax	81680	
	$\tau = \frac{M_t}{I_p} \cdot z = \frac{M_t}{\frac{\pi}{32} \cdot d^4} \cdot z = \frac{32 \cdot M_t}{\pi \cdot d^4} \cdot z$			Gmin	78477	
Torsion Stress				at Mmax		
				at Mmin		
Radial distance from the bar axis	z		[mm]			
Torsion Stress on the bar surface	z=D/2	40	[mm]			
	t_{sur}	0,3979	N*mm^-2			
Displayed Strain Value						
	$\tau = \varepsilon_D \cdot 10^{-6} \cdot G$					
	$\varepsilon_D = \frac{\tau}{10^{-6} \cdot G}$					
Displayed Strain						
Noninal Bar Diameter	e_D	4,9687	[mE]			
Min. Bar Diameter		4,9874	[mE]	=	0,38 %	
Max. Bar Diameter		4,9687	[mE]	=	0,00 %	
Max. Torsion load		4,9936	[mE]	=	0,50 %	
Min. Torsion load		4,9439	[mE]	=	-0,50 %	
Variation of Young's Module	2,0%	4,8713	[mE]	=	-1,96 %	
(Due to differences between Datasheet and Reality)	-2,0%	5,0701	[mE]		2,04 %	

5 [Moottorinsähköinen vääntömomentti]



LÄHTEET

[Aalto J, 2002] Aalto Jukka, rakenteiden mekaniikka, 2002. http://www.tkk.fi/Yksikot/Rakenteidenmekaniikka/henk/aalto/materiaalia/vaan.pdf

[Aaltonen K, 2002] Aaltonen Kalevi, Seminaari, ISO 9000 Mittaukset konepajassa 30.5.2002 (Majvik, Kirkkonummi) TKK Konepajatekniikan laboratorio, 5.2.2007 © Professori Kalevi Aaltonen, Teknillinen korkeakoulu. https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/kon-15.../mittauskyky.pdf (lainattu 8.11.2009)

[ADS-7813] Datasheet, ADS7813, Low-Power, Serial 16-Bit Sampling ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER, ©1997 Burr-Brown Corporation PDS-1302A Printed in U.S.A. March, 1997. http://fl.hw.cz/constrc/ad_lpt/ads7813.pdf (lainattu 27.11.2009)

[Antenna, 2005] Digi International, XBee & XBee Pro OEM RF Module antenna considerations, Application Note, XST-AN019a, September 2005

[AVR-128, 2009] ATmega128A 385 pages, revision C, updated 6/09. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8151.pdf (lainattu 7.7.2009)

[Baumerelectric] http://www.baumerelectric.com

[CSMA-CA, 2007] Information Networks, 2007, TSIN01. http://www.icg.isy.liu.se/courses/tsin01/material/slides/7_CSMA_CA.pdf (lainattu 10.11.2009)

[DABU AD2T-2Q Datasheet] Datasheet, Bridge Amplifier for 2 x 1/4 Strain Gage Bridge DABU AD2T-2Q. http://sensor.baumerelectric.com/productnavigator/downloads/Produkte/PDF/Datenblatt/Kraft_Dehnung/en_DAB_DABU_AD2T_2Q.pdf (lainattu 27.11.2009)

[DABU AD2T-2Q Instruction Manual] Instruction manual Bridge Amplifier, 2009, DABx_AD2T_BA_V1_0m.doc 1/20 Baumer Electric AG 01.04.09/rut. http://sensor.baumerelectric.com/productnavigator/downloads/Produkte/PDF/Allgemein/BA_DABx_AD2T.pdf (lainattu 27.11.2009)

[Digi] www.digi.com

[DIGI International, 2006], Product manual, XBee/XBee-PRO Code Development, M100320 [2006.05.15]. http://ftp1.digi.com/support/documentation/productmanual_xbeecodedevelopment.pdf lainattu (11.11.2009)

[DSRC-AX Datasheet] Strain ring with axial cable exit, http://sensor.baumerelectric.com/productnavigator/downloads/Produkte/PDF/Datenblatt/Kraft_Dehnung/en_DAB_DSRC_AX.pdf (lainattu 27.11.2009)

[DSRC-AX Installation manual] Installation Manual, Strain Ring, V1,1, 28.2.2008, http://sensor.baumerelectric.com/productnavigator/downloads/Produkte/PDF/Allgemein/BA_DSRC.pdf (lainattu 27.11.2009)

[Eenennaam M, 2009] Eenennaam Martijn van, Presentation, An overview of ZigBee and IEEE 802.15.4, 9.6.2009, University of Twente, Enschede, The Netherlands.

[ETSI] Standardi, ETSI EN 300 328 V1.4.1 (2003-04), Candidate Harmonized European Standard (Telecommunications series,), REN/ERM-TG11-003, 650 Route des Lucioles, F-06921 Sophia Antipolis Cedex - FRANCE

[Farahani S, 2008] Farahani Shahin, Zigbee wireless networks and transceivers, ISBN: 978-0-7506-8393-7, Newnes is an imprint of Elsevier, 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK, Copyright © 2008, Elsevier Ltd.

[Farnell] www.farnell.fi

[FTDICHIP] Virtual COM port (VCP) drivers, XBee-laudan USB-piirin ajurit, http://ftdichip.com/Drivers/VCP.htm (lainattu 29.11.2009)

[Gylen H, 2006] Henry Gylén Digitaalinen tiedonsiirto, TURUN AMMATTIKORKEAKOULU DIGITAALINEN TIEDONSIIRTOTEKNIIKKA, luentomateriaali, Syksy 2006 230BS03. http://kehittaminen.turkuamk.fi/hgylen/DigiTiesi/Digitiesi_06.pdf (lainattu 10.11.2009)

[Honkanen H] Oppimateriaalit, YHTEISTEN IMPEDANSSIEN KAUTTA KYTKEYTYMINEN, http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/EMCs_Yhteiset_impedanssit.pdf (lainattu 13.7.2009)

[Häkkinen E, 1999] Häkkinen Esa, Fallström Kim, Haapalinna Atte, Kärhä Petri, Häiriöt mittauksissa, Teknillinen korkeakoulu, Mittaustekniikan laboratorio, Espoo 1999 http://metrology.hut.fi/courses/s108-180/hairmit.pdf (lainattu 8.11.2009)

[Jennic, 2006] Application note: JN-AN-1035, Calculating 802.15.4 Data Rates. http://www.jennic.com/files/support_files/JN-AN-1035%20Calculating%20802-15-4%20Data%20Rates-1v0.pdf (lainattu 17.7.2009)

[Juutilainen M, 2006-2007] Juutilainen Matti, Siirtyvä tietoliikenne, Luento 3, Radiotekniikan perusteet: Signaalien eteneminen http://www2.it.lut.fi/kurssit/06-07/Ti5312600/luentokalvot/luento03.pdf (lainattu 8.11.2009)

[Kuiska M, 2003] Kuisma Mikko, EMC:n perusteet luentomateriaali. http://www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/Sa2920200/L2-kytkeytyminenweb.pdf (lainattu 19.8.2009)

[LM-19, 2001] Datasheet, © 2001 National Semiconductor Corporation DS200040, LM-19. http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/M/1/9/LM19.shtml (lainattu 2.12.2009)

[Ondrej, S, 2006] Ondrej S, Zdenek B, Petr F, Ondrej H, ZigBee Technology and Device Design, Ondrej, S.; Zdenek, B.; Petr, F.; Ondrej, H, Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies, 2006. ICN/ICONS/MCL 2006. International Conference on, 23-29 April 2006 Page(s):129 - 129, Digital Object Identifier 10.1109/ICNICONSMCL.2006.233 (lainattu 27.11.2009)

[Proakis J, 1996] Digital Signal Processing, John G. Proakis, Dimitris G. Manolakis, ISBN 0-13-158932-6

[Pupolin S, 2007] Pupolin Silvano, Wireless Communications 2007 CNIT Thyrrenian Symposium, edited by , Boston, MA : Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA, ISBN 978-0-387-73824-6, e-ISBN 978-0-387-73825-3.

[QPSK] What is QPSK. http://www.tech-faq.com/qpsk.shtml (lainattu 2.5.2009)

[Rohde-Schwarz, 2004] Application note, EVM measurements for ZIGBEE signaling the 2.4 GHz band, 11/2004 – 1EF55_1E, http://www2.rohde-schwarz.com/file_1180/1EF55_1E.pdf (laianttu 2.5.2009)

[Schmidt T, 2000] Thomas Schmidt, Preliminary, AN730,CRC Generating and Checking, 2000 Microchip Technology Inc. DS00730A

[Silventoinen P] Silventoinen Pertti, EMC in power electronics, luentomateriaali https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl50a0600/materiaali (lainattu 8.11.2009)

[Sparkfun] www.sparkfun.com

[Stevanovic D, 2007] Stevanovic Dusan, Presentation, June 20, 2007, Zigbee / IEEE 802.15.4 standard. www.cse.yorku.ca/~dusan/Zigbee-Standard-Talk.pdf

[Strain Gages] Terms/Explanations Strain Gages

http://www.baumersensopress.com/portal/pics/bs/802302_Katalog_2006_e_pdf/12_Begriffe_und_Erkl%E4rungen_e/12.05_begriffe_und_erklaerungen_dms_e.pdf (lainattu 19.5.2009)

[suhteellinen venymä 2008] Perusmekaniikka 761101P, luentomateriaali, syksy 2008,Oulu, Tasapaino ja kimmoisuus. http://physics.oulu.fi/fysiikka/oj/761101P/2008/luennot/PM_AA_luku11.pdf

[suhteellinen venymä, 2009] Fysiikaosion luennot 2009, Kiinteiden aineiden reologia. http://www.mm.helsinki.fi/mmtek/opiskelu/kurssit/yfys1/YFYS1_lectures_week3_09.pdf

[Särkimäki V, 2006] Särkimäki Ville, Langaton tiedonsiirto sähkökoneen roottorilta sijaitsevalta anturoinnilta, LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO, SÄHKÖTEKNIIKAN OSASTO, Teollisuuden käynnissäpidon prognostiikka, Case Paperi- ja kartonkiteollisuus, 1. huhtikuuta 2006.

XBee-Explorer, 2008] XBee-Explorer –v12, 3.6.2008, piirikytkentäkaavio-pdf. http://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Explorer.pdf (lainattu 29.11.2009)

[XBee- regulated, 2009] XBee-regulated-v10, 26.1.2009, piirikytkentäkaavio-pdf. http://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Regulated-v10.pdf (lainattu 12.11.2009)

[XBee Pro, 2008] Product manual, XBee™/XBee-PRO™ OEM RF Modules, Product Manual v1.xCx - 802.15.4 Protocol For OEM RF Module Part Numbers: XB24-...-001, XBP24-...-001, 2008. XBee®/XBee-PRO® OEM RF Modules XBee®/XBee-PRO® OEM RF Modules RF Module Operation RF Module Configuration Appendices IEEE® 802.15.4 OEM RF Modules by Digi International, 90000982_A 2008.09.04, http://voltar.org/XBee-Manual-Cx.pdf (lainattu 11.11.2009)

[XBee_SE, 2009] XBee®/XBee-PRO® SE (Smart Energy) RF Modules ZigBee SE (Smart Energy) RF Modules by Digi International Firmware Versions: - 31xx Coordinator - API Operation - 33xx Router - API Operation - 39xx End Device - API Operation 90033931_A, 6/26/2009, http://www.digi.com/standards/smart-energy/assets/90033931_A.pdf (lainattu 17.7.09)

[X-CTU, 2008] X-CTU Configuration & Test Utility Software User's Guide, 90001003_A, 2008.08.20, http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001003_A.pdf (lainattu 12.11.2009)

[Xianchun Y] Xianchun Yang, Frame Check Sequence (FCS) Calculation Explained, State Key Laboratory for Novel Software Technology at Nanjing University. http://cs.nju.edu.cn/yangxc/dcc_teach/fcs-calc.pdf

[Yuxiang Y] Yuxiang Yuan, Presentation, ZigBee, IEEE 802.15.4, Kuroda Lab, Department of Electrical Engineering, Keio University.http://www.arts-dl.com.cn/download/ZigBee%E7%B2%BE%E7%AE%80%E6%A6%82%E8%A6%81.pdf

[Zigbee alliance] www.zigbee.org (lainattu 11.10.2009)

[Zigbee, 2007] White paper, ZigBee and Wireless Radio Frequency Coexistence, june 2007, ©2009 ZigBee Alliance. http://www.zigbee.org/LearnMore/WhitePapers/tabid/257/Default.aspx (lainattu 2.5.2009)