

Jere Hostikka

**LANGATON MITTAUSJÄRJESTELMÄ NIVELLIKKEEN MITTAAMISEEN**

Insinöörityö  
Kajaanin ammattikorkeakoulu  
Tekniikan ja liikenteen ala  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Kevät 2012



Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	Koulutusohjelma Tietotekniikan koulutusohjelma
Tekijä(t) Jere Hostikka	
Työn nimi Langaton mittausjärjestelmä nivelliikkeen mittaamiseen	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot	Ohjaaja(t) Asko Kinnunen
	Toimeksiantaja Markku Karppinen / Kajaanin ammattikorkeakoulu
Aika Kevät 2012	Sivumäärä ja liitteet 31+8
<p>Insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa langaton mittausjärjestelmä urheilijan nivelliikkeen mittaamiseen. Työn pohjana on käytetty Matti Lehtisen insinööriyötä, jossa hän tutki Biometrics Ltd. -yhtiön valmistaman SG150-kulmanmittausanturin soveltuvuutta luistelijan nivelliikkeen mittaamiseen. Tämän työn pohjalta päädyttiin käyttämään kyseistä anturia.</p> <p>Mittausjärjestelmä kehitettiin jääkiekkoilijan polven liikkeen tarkkailuun. Tämän avulla voidaan seurata oikean luisteluasennon oppimista. On tärkeää, että oikeanlainen luisteluasento opitaan jo nuorena.</p> <p>Mittausjärjestelmä koostuu lähettimestä sekä vastaanottimesta. Lähetinkorttia voidaan käyttää myös ilman vastaanotinta ja tietokonetta, jolloin oikeasta polvenasennosta ilmoitetaan käyttäjälle sekä ääni- että valomerkillä. Äänimerkki annetaan 3,5 mm kuulokeliitännästä kuulokkeille. Käyttämällä sekä lähetinkorttia että vastaanotinta voidaan tietokoneella seurata käyttäjän polven kulmaa ja tallentaa lähetinkortilta saadut kulmatiedot tekstitiedostoon.</p> <p>Mittausjärjestelmästä saatiin toteutettua ensimmäinen versio, jonka pohjalta mittausjärjestelmää voidaan lähteä laajentamaan ja kehittämään.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	Langaton, kulmamittaus, SG150, Atmel, Python
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Verkkokirjasto Theseus <input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto



School School of Engineering	Degree Programme Information Technology
Author(s) Jere Hostikka	
Title A Wireless Measurement System for Measuring an Athlete's Joint Movement	
Optional Professional Studies	Instructor(s) Mr Asko Kinnunen, Senior Lecturer
	Commissioned by Mr Markku Karppinen, Development Engineer / Kajaani University of Applied Sciences
Date Spring 2012	Total Number of Pages and Appendices 31+8
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to develop and build a wireless measurement system that can measure an athlete's joint movement. This thesis is based on Matti Lehtinen's Bachelor's thesis which was published in 2011. The angle sensor used in this thesis was SG150 which was manufactured by company called Biometrics Ltd.</p> <p>The measurement system was developed to measure the knee angle of an ice hockey player. With this information ice hockey players can get feedback about their skating angle. This feedback can be used to find the correct knee angle for skating. It also helps ice hockey players to adapt the correct knee angle.</p> <p>The wireless measurement system includes a transmitter and a receiver. The transmitter can be used without the receiver to inform the user about the correct knee angle. In this case the transmitter will play sound through a 3.5 mm headphone jack and turn on led when the correct knee angle has been achieved. With receiver and computer, user can monitor and log knee angles.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	Wireless, jointmovement, SG150, Atmel, Python
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Electronic library Theseus <input checked="" type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 KULMAN MITTAAMINEN	2
2.1 Venymäliuska-anturi	2
2.2 Potentiometri	5
2.3 Differentiaalimuuntaja	5
3 MITTAUSJÄRJESTELMÄN RAKENNE	7
3.1 LMP8358-instrumentointivahvistin	7
3.2 AT86RF230-piiriin perustuva radiomoduuli	8
3.3 Python-ohjelmointikieli	9
4 TOTEUTUS	10
4.1 Elektroniikka	10
4.1.1 Lähetin	10
4.1.2 Vastaanotin	17
4.2 Viestiliikenne	18
4.2.1 Lähettimen ja vastaanottimen välinen viestiliikenne	18
4.2.2 Vastaanottimen ja tietokoneen välinen viestiliikenne	20
4.3 Ohjelmisto	24
4.3.1 Lähetin	24
4.3.2 Vastaanotin	24
4.4 Käyttöliittymä	25
5 TULOKSET JA ANALYSOINTI	27
6 YHTEENVETO	29
LÄHTEET	30
LIITTEET	

## 1 JOHDANTO

Insinööriyön aiheen sain lehtori Asko Kinnuselta, joka ehdotti työni aiheeksi langattoman mittausjärjestelmän kehittämistä nivelliikkeen mittaamiseen. Tämän työn pohjana toimi Matti Lehtisen vuonna 2011 tekemä insinööriyö, jossa hän tutki Biometrics Ltd. -yhtiön valmistaman SG150-kulmanmittausanturin soveltuvuutta luistelijan polvinivelen kulmanmittaamiseen. Hänen insinööriyöstään käy ilmi, että kyseinen kulmanmittausanturi soveltuu luistelijan polvinivelen kulmanmittaamiseen. Mittausjärjestelmän on tarkoitus avustaa juniorijääkiekkoilussa oikean luisteluasennon opettelussa [1.]

Oikeaoppisessa luisteluasennossa on tärkeää, että potkun aloittavan jalan reiden ja säären välinen kulma 90 astetta. On tärkeää, että oikeanlainen luisteluasento opitaan jo nuorena [2.]

Insinööriyön tilaajana toimi Kajaanin ammattikorkeakoulun kehitysinsinööri Markku Karpinen, joka valitsi työssä käytetyn ohjelmoitavan instrumentointivahvistimen ja radiomodulin. Mittausjärjestelmän on tarkoitus pystyä keräämään ja tallentamaan lähettimen lähettämää kulmatietoa, jolloin voidaan tutkia luistelijan polven kulmaa tarkasti luistelun aikana. Tämän lisäksi mittausjärjestelmää tulee voida käyttää ilman vastaanotinta, jolloin laite informoi käyttäjää oikeasta polven kulmasta sekä ääni- että valomerkillä. Mittausjärjestelmän pääasiallinen tarkoitus tulee olemaan käyttäjän informointi, kun oikea polven kulma on saavutettu.

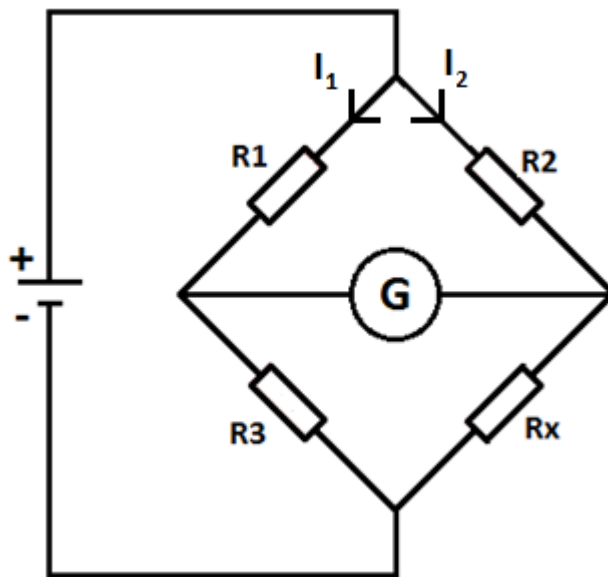
## 2 KULMAN MITTAAMINEN

### 2.1 Venymäliuska-anturi

Biometrics Ltd. -yhtiön valmistaman SG150-kulmanmittausanturin toiminta perustuu venymäliuskoihin. Venymäliuska-anturi on yleinen anturityyppi, joka muuttaa kappaleen muodonmuutoksen anturin resistanssin muutokseksi. Se koostuu ohuesta muovikalvosta, johon on asetettu vastuslanka, joka mutkittelee muovikalvolla. Vastuslangan muovikalvolle muodostama kuvio voi vaihdella anturin eri käyttökohteiden mukaan. Vastuslangan resistanssi riippuu vastuslangan materiaalista, pituudesta sekä sen poikkipinta-alasta. Kun anturia venytetään, muuttuu vastuslangan pituus sekä sen poikkipinta-ala. Tämä muuttaa vastuslangan resistanssia [3.] Verrattuna muihin esiteltyihin kulmanmittausratkaisuihin SG150-kulmanmittausanturi on yksinkertainen käyttää. Tämän lisäksi Matti Lehtisen insinööriyön mukaan kyseinen anturi sopii hyvin urheilijan nivelliikkeen mittaamiseen. Näiden syiden vuoksi työssä käytettiin SG150-kulmanmittausanturia urheilijan nivelliikkeen mittaamisessa.

### Wheatstonen siltakytkentä

Vuonna 1833 S.H. Christie kehitti siltakytkennän, jonka avulla voitiin määrittää tuntemattoman vastuksen resistanssi tarkasti. Sir Charles Wheatstone paranteli S.H. Christien kehittelemää kytkentää ja teki sen tunnetuksi vuonna 1843. Wheatstonen siltakytkennässä tuntemattoman vastuksen resistanssi voidaan määrittellä kolmen tunnetun vastuksen perusteella [4.] Yhden tunnetun vastuksen resistanssia on pystyttävä muuttamaan, jotta siltakytkentä saataisiin tasapainoasemaan. Tämän lisäksi tuntemattoman vastuksen resistanssin määrittämiseksi tarvitaan jännitelähde sekä galvanometri eli herkkä virtamittari. Wheatstonen siltakytkentä on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Wheatstonen siltakytkentä tuntemattoman vastuksen resistanssin määrittämiseen

Kuvan 1 mittauskytkennässä vastusten  $R(1)$ ,  $R(2)$  ja  $R(3)$  resistanssit ovat tunnettuja ja  $R(x)$  on tuntemattoman vastuksen resistanssi. Tämän lisäksi vastuksen  $R(1)$  resistanssi on säädettävissä. Tuntemattoman vastuksen resistanssin määrittäminen tapahtuu säätämällä vastuksen  $R(1)$  resistanssia siten, että galvanometrini läpi ei kulje virtaa [3.] Tällöin siltakytkentä on tasapainossa eli vastusten  $R(x)$  ja  $R(3)$  yli olevat jännitteet ovat yhtä suuria. Tämän seurauksena myös vastusten  $R(1)$  ja  $R(2)$  yli olevat jännitteet ovat yhtä suuria. Tällöin saadaan kaksi yhtälöä

$$I_1 * R_1 = I_2 * R_2 \quad (1)$$

$$I_1 * R_3 = I_2 * R_x, \quad (2)$$

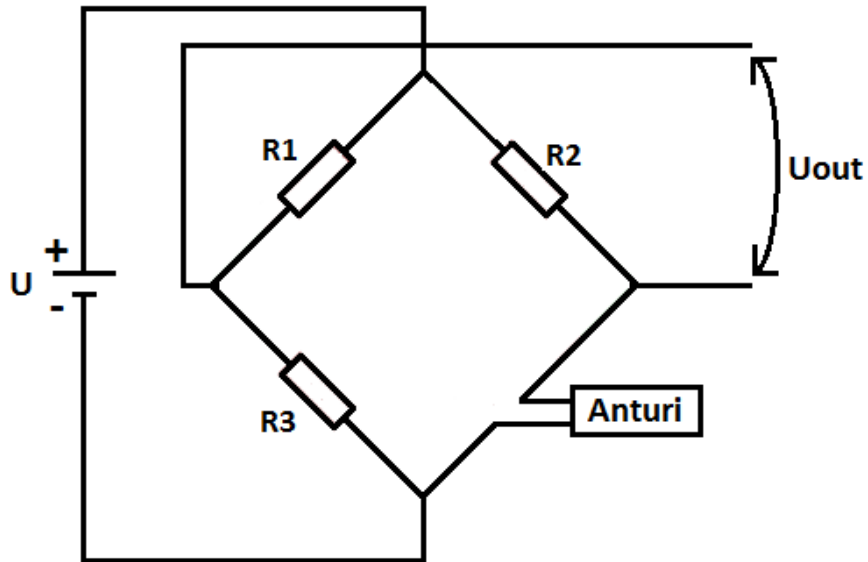
joissa  $I(1)$  ja  $I(2)$  ovat siltakytkennän haaravirrat ja  $R(1)$ ,  $R(2)$ ,  $R(3)$  ja  $R(x)$  ovat vastusten resistansseja. Kun kaavasta 1 ratkaistaan  $I(1)$  ja sijoitetaan saatu tulos kaavaan 2, saadaan kaava muotoon

$$\frac{I_2 R_2 R_3}{R_1} = I_2 R_x \quad (3)$$

Jakamalla kaava 3 puolittain  $I(2)$  haaravirralla saadaan tuntemattoman resistanssin  $R(x)$  kaavaksi

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (4)$$

Kun Wheatstonen siltakytkentää käytetään muuttamaan venymäliuska-anturin resistanssin muutosta jännitteen muutokseksi, korvataan vastus  $R(x)$  venymäliuska-anturilla. Tällöin kytkennästä saadaan kuvan 2 kaltainen.



Kuva 2. Wheatstonen siltakytkennän käyttäminen venymäliuska-anturin kanssa

Kuvan 2 kytkennässä ulostuleva jännite saadaan vastusten  $R(3)$  ja  $R(\text{anturi})$  ylijäävien jännitteiden erotuksena. Tällöin ulostulevan jännitteen kaavaksi saadaan

$$U_{out} = \left( \frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_{anturi}}{R_2 + R_{anturi}} \right) * U, \quad (5)$$

missä  $R(1)$ ,  $R(2)$ ,  $R(3)$  ja  $R(\text{anturi})$  ovat vastusten resistansseja ja  $U$  on kytkennän jännite. Koska Wheatstonen siltakytkennästä ulostuleva jännite on usein millivolttien luokkaa, joudutaan sitä usein vahvistamaan differentiaalivahvistimella, jotta sitä voitaisiin käsitellä myöhemmin. Käytetyssä SG150-kulmanmittausanturissa on sisäänrakennettu Wheatstonen siltakytkentä, jonka seurauksena se voidaan kytkeä suoraan instrumentointivahvistimeen.

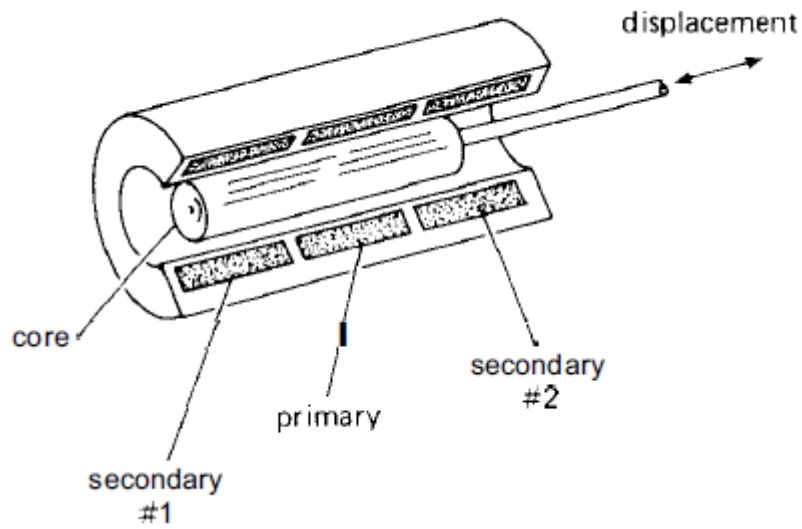


## 2.2 Potentiometri

Kulmanmittaaminen voidaan suorittaa myös potentiometrin avulla, mutta tämä ratkaisu vaatii paljon mekaanista toteutusta nivelen ympärille. Tässä ratkaisussa polven ympärille on rakennettava tuki, joka liikkuu nivelen mukana pyörittäen potentiometriä. Tämä saa aikaan jännitemuutoksen, josta voidaan laskea kulma. Mekaanisen toteutuksen tarve tekee potentiometrin käyttämisen hankalaksi, sillä tuen tulisi sopia kaikille käyttäjille. Se voi myös haitata urheilijan liikkumista ja tukirakennelman kestävyys voi aiheuttaa myös ongelmia urheilukäytössä. Myös potentiometrin kuluminen ajan saatossa heikentää sen käyttämistä urheilijan nivelliikkeen mittaamisessa.

## 2.3 Differentiaalimuuntaja

Differentiaalimuuntajan eli LVDT-anturin (linear variable differential transformer) toiminta perustuu muuntajaan, jonka sisällä liikutetaan rauta- tai ferriittisydäntä. Muuntajassa on keskellä lähetyskäämi ja molemmissa päissä mittauskäämit [5.] Keskellä sijaitsevaan lähetyskäämiin syötetään AC-jännitettä. Kun muuntajan sisällä oleva sydän on muuntajan keskellä, näkyy mittauskäämeissä samantasoiset AC-jännitteet, mutta niiden välinen vaihe-ero on 180 astetta. Sydäntä liikuttamalla muuntajan sisällä näkyy mittauskäämeissä AC-jännitteen tasossa vastakkaiset muutokset. Näitä mittauskäämeissä tapahtuvia muutoksia vertailemalla voidaan päätellä liikkeen suunta ja suuruus [6.] Kuvassa 3 on esitetty poikkileikkauskuva LVDT-anturista.



Kuva 3. LVDT-anturin poikkileikkauskuva [6]

LVDT-anturit ovat erittäin tarkkoja, ja niitä käyttämällä voidaan mitata pieniä, jopa mikrometrin osia olevia liikkeitä. Rakenteensa vuoksi LVDT-anturi on lähes kulumaton, mutta se on altis värinälle ja ulkoisille magneettikentille [5.] Yleensä LVDT-antureita käytetään liikkeen mittaamiseen, mutta niistä on saatavilla myös kulmanmittaukseen tarkoitettuja versioita [6.]

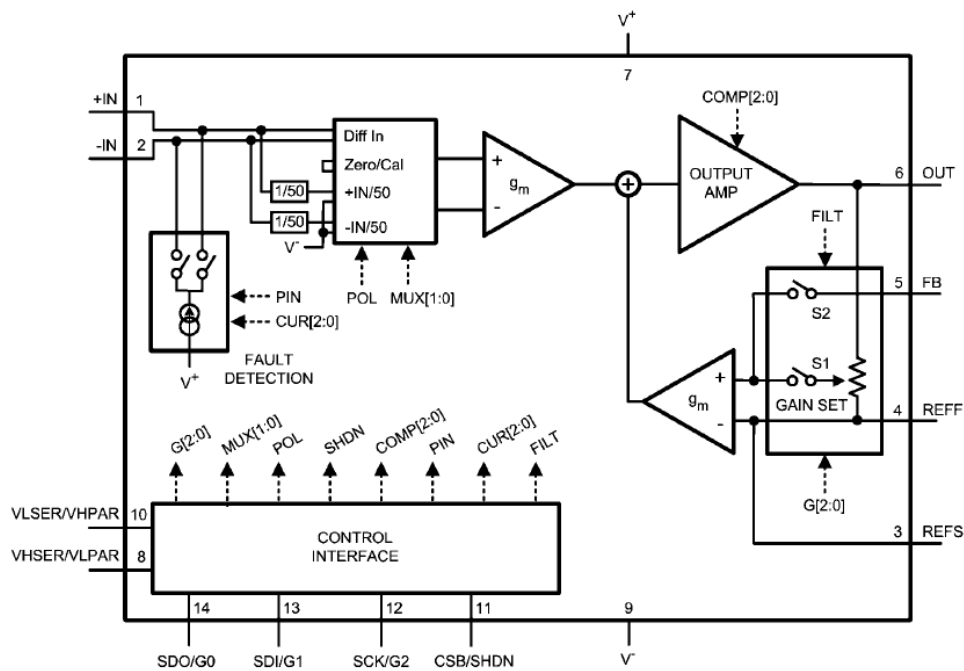
### 3 MITTAUSJÄRJESTELMÄN RAKENNE

Mittausjärjestelmän toteuttamiseksi työn tilaaja oli määrännyt käytettäväksi Biometrics Ltd. -yhtiön valmistamaa SG150-kulmanmittausanturia, LMP8358-instrumentointivahvistinta sekä Atmel-yrityksen AT86RF230-piiriin perustuvia radiomoduuleita. Mittausjärjestelmän käyttöliittymä toteutettiin Linux-käyttöjärjestelmälle Python-ohjelmointikielen 2.0-versiolla. Työssä päädyttiin käyttämään Linux-käyttöjärjestelmistä Ubuntu 11.04 -jakelua sen ilmaisuuden ja saatavuuden vuoksi. Tämän seurauksena Python-ohjelmointikielen valinta oli ilmeinen, sillä Ubuntu-jakelussa on valmiiksi asennettuna Python-tulkki, joten mittausjärjestelmän pystyttäminen on yksinkertaisempaa. Mikäli mittausjärjestelmän käyttöliittymää halutaan käyttää Windows-käyttöjärjestelmällä varustetulla tietokoneella, voidaan käyttää ilmaista VMware Player -ohjelmaa. Sillä voidaan luoda Ubuntu-virtuaalikone, jossa Python-ohjelmointikielillä toteutettua käyttöliittymää voidaan käyttää.

Sekä lähetin- että vastaanotinkortilla on käytetty ATmega1281-mikrokontrolleria. Se on Atmel-yrityksen valmistama 8-bittinen mikrokontrolleri.

#### 3.1 LMP8358-instrumentointivahvistin

LMP8358-instrumentointivahvistin on National Semiconductor -yrityksen valmistama ohjelmoitava instrumentointivahvistin tarkkuutta vaativiin mittauksiin. Instrumentointivahvistin on mahdollista ohjelmoida käyttämällä joko SPI-väylää tai rinnakkaisväylää. Tämän lisäksi instrumentointivahvistin sisältää sisäänrakennettua vikadiagnostiikkaa, jonka avulla voidaan tarkkailla sisääntulon kytketyn anturin kuntoa. Tämän vikadiagnostiikan avulla voidaan havaita esimerkiksi sisääntulon oikosulut tai huonot liitokset. Ohjelmoinnilla voidaan muuttaa instrumentointivahvistimen vahvistusta, taajuuskompensointia, suodatusta sekä vikadiagnostiikkaa. Vikadiagnostiikan ansiosta voidaan esimerkiksi muuttaa sisääntulon napaisuutta. LMP8358-instrumentointivahvistin soveltuu hyvin akkukäyttöisiin laitteisiin pienen virrankulutuksen ja matalan käyttöjännitealueen takia. Kuvassa 4 on esitetty LMP8358-instrumentointivahvistimen lohkoakaavio [7.]



Kuva 4. LMP8358-instrumentointivahvistimen lohkokaavio [7]

### 3.2 AT86RF230-piiriin perustuva radiomoduuli

Työssä langaton radioliikenne toteutettiin käyttämällä Atmelin RZ600-kehitysalustasta löytyviä AT86RF230-radiopiireihin perustuvia radiomoduuleita. RZ600-kehitysalusta on tarkoitettu AT86RF212-, AT86RF230- ja AT86RF230-radiopiirien kokeiluun ja testaukseen. AT86RF230-radiopiirit kommunikoivat SPI-väylällä mikrokontrollerin kanssa, ja tämän lisäksi radiopiirien ohjaamiseen tarvitaan muutama ohjauslinja [8.]

Käytetyt radiomoduulit sisältävät radiopiiriin vaaditut komponentit, ja ne kytketään 10-napaisella riviliittimellä mikrokontrollerille. Tämä tekee radiomoduulien liittämisen helpoksi omiin kytkentöihin [8.] AT86RF230-radiopiirit toimivat 2,4 GHz taajuusalueella, ja Atmel tarjoaa valmiit ZigBee-pinot useille erilaisille mikrokontrollereille. Valitettavasti valmista ZigBee-pinoa ei löytynyt käytetylle ATmega1281-mikrokontrollerille, joten radiopiirejä jouduttiin käyttämään ilman ZigBee-pinoa. Tämä vaikeuttaa hieman luotettavan langattoman kommunikoinnin toteutusta radiomoduuleiden välillä.

### 3.3 Python-ohjelmointikieli

Python-ohjelmointikieli on alustariippumaton korkeantason tulkettava ohjelmointikieli. Guido van Rossum aloitti Python-ohjelmointikielen kehittämisen 1980-luvun loppupuolella ja ensimmäinen versio julkaistiin vuonna 1990.

Tulkattavalla ohjelmointikielellä tarkoitetaan sitä, että Python-kielellä ohjelmituista ohjelmia ei käännetä vaan ne ajetaan Python-tulkin välityksellä. Tämä mahdollistaa sen, että Python-kielisiä ohjelmia voidaan suorittaa useilla eri alustoilla, mikäli näihin löytyy Python-tulkki. Huonona puolena tulkattavissa ohjelmointikielissä on se, että niiden suorituskyky ei ole samalla tasolla konekielelle käännettyjen ohjelmien kanssa. Python-tulkki on ilmainen, ja se on useissa yleisimmissä Linux-jakeluissa valmiiksi asennettuna. On huomattava, että uusi Python 3.0 -versio ei ole yhteensopiva aikaisempien Python-versioiden kanssa [9.]

Python-ohjelmointikieltä pidetään yleisesti helppona ohjelmointikielenä, jolloin se sopii hyvin aloittelijoille. Laajojen standardikirjastojen avulla Python-ohjelmointikieltä käytetään usein testiohjelmien tekemiseen ja mittaustietojen keräykseen. Nämä asiat mahdollistavat sen, että Python-ohjelmointikielellä voidaan luoda nopeasti monimutkaisiakin ohjelmia [9.] Tämän lisäksi Python-ohjelmointikieli mahdollistaa C- tai C++-kielellä kirjoitettujen moduulien käytön, joka lisää Python-ohjelmointikielen käyttömahdollisuuksia [10.]

## 4 TOTEUTUS

### 4.1 Elektroniikka

Elektroniikkasuunnittelussa keskityttiin enemmän lähettimen suunnitteluun, sillä se on rakenteeltaan monimutkaisempi kuin vastaanotin. Lähettimen kytkentäkaavio löytyy liitteestä 1 ja vastaanottimen kytkentäkaavio löytyy liitteestä 2.

#### 4.1.1 Lähetin

##### Mittauselektroniikan suunnittelu

Jotta mikrokontrollerilla voitaisiin lukea kulma-anturia, joudutaan kulmatietoa vahvistamaan instrumentointivahvistimella. Käytetyn kulma-anturin ulostuleva jännite riippuu kulma-arvosta. Tämä arvo on välillä 0–7,5 mV, kun käytössä on 5 voltin käyttöjännite [1]. Kortin käyttöjännitteeksi valittiin 3,3 voltia, sillä radiomoduuli käyttää 3,3 voltin käyttöjännitettä. Tätä 3,3 voltin jännitettä käytetään myös mikrokontrollerin AD-muuntimen referenssijännitteenä, jonka seurauksena kulma-anturin ulostuleva jännitealue tulee selvittää mittaamalla, kun anturin käyttöjännitteenä käytetään 3,3 voltia.

Käyttöjännitteen lähetinkortti saa kahdesta AA-paristosta, jolloin täysillä paristoilla käyttöjännite on noin 3 voltin luokkaa. Tämä jännite kuitenkin laskee paristojen tyhjentyessä, jonka vuoksi on käytettävä jännitettä nostavaa hakkurikytkentää. Tämän hakkurikytkennän avulla käyttöjännite saadaan pidettyä 3,3 voltissa riippumatta paristoista saatavasta jännitteestä. Hakkuripiirinä käytettiin Texas Instruments -yhtiön valmistamaa TPS61097-33-piiriä. Kyseinen hakkuripiiri valittiin hyvän hyötysuhteen sekä ulostulossa esiintyvän alhaisen häiriöjännitteen (rippeli) vuoksi. Rippelijännite on ominaista hakkurikytkennöille, ja se muodostuu hakkuritaajuudesta [11]. Tämän lisäksi vähäinen ulkoisten komponenttien tarve helpottaa piirilevyn suunnittelua ja vähentää hankittavien komponenttien lukumäärää [12.]

Kulmanmittausanturin jännitealue mitattiin syöttämällä anturille 3,3 voltin käyttöjännite ja asettamalla kulma-anturi 90 asteen kulmaan. Tämän jälkeen mitattiin anturilta ulostuleva differentiaalinen jännite yleismittarilla. Kulma mitattiin 90 asteen kulmalla, sillä sen muodosta-

minen tarkasti on yksinkertaisempaa kuin esimerkiksi 150 asteen kulman muodostus. Lisäksi kun anturilta ulostuleva jännite muuttuu lineaarisesti kulman muuttuessa, voidaan muilla kulmilla ulostuleva jännite laskea verrannon avulla. Suoritetun mittauksen ei tarvitse olla kovinkaan tarkka, sillä sen tehtävä on määrittää ulostulevan jännitealueen suuruusluokka. Tämän lisäksi vahvistuksesta tehdään säädettävä, jolloin vahvistus voidaan hienosäätää sopivaksi. Kun käytetään 3,3 voltin käyttöjännitettä, saadaan 90 asteen kulmalla anturilta ulostulevaksi jännitteeksi 2,7 millivoltia. Tästä muodostamalla verranto saadaan kaava

$$\frac{90^\circ}{2,7 \text{ mV}} = \frac{\alpha}{x}, \quad (6)$$

missä  $\alpha$  on haluttu kulma ja  $x$  on halutulla kulmalla ulostuleva jännite. Ratkaisemalla kaavasta 6 muuttuja  $x$  saadaan kaava muotoon

$$x = \frac{\alpha \cdot 2,7 \text{ mV}}{90^\circ} \quad (7)$$

Kun kaavaan 7 sijoitetaan kulma-arvoksi 150 astetta, saadaan ulostulevaksi jännitteeksi 4,5 millivoltia. Samalla kaavalla testattiin myös 180 kulmalla ulostuleva jännite, joka oli 5,6 millivoltia. Tämän jälkeen kulma-anturi asetettiin 180 asteen kulmaan ja kokeiltiin, toimiiko anturi 180 asteeseen saakka. Kun ulostuleva jännite mitattiin, huomattiin sen vastaavan lasketta arvoa. Tästä voidaan päätellä, että vaikka kulma-anturin mittausalue on 0 asteesta 150 asteeseen, toimii se 180 asteeseen saakka. Mittauselektronikka päätettiin mitoittaa 0–180 asteen mittausalueelle, koska se mahdollistaa käytetyn kulma-anturin testauksen ilmoitetun mittausalueen ulkopuolella.

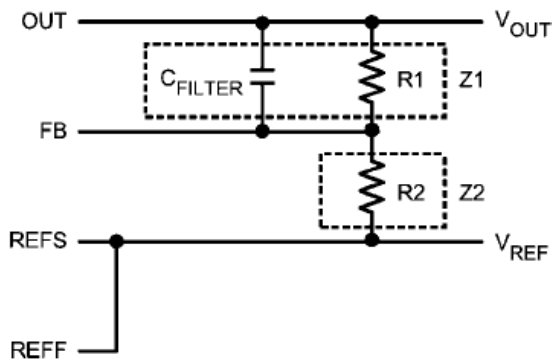
Näiden tietojen perusteella voidaan laskea tarvittava vahvistus kaavalla

$$A = \frac{V_{\text{maxoutput}} - V_{\text{minoutput}}}{V_{\text{maxinput}} - V_{\text{mininput}}}, \quad (8)$$

missä  $V_{\text{maxoutput}}$  on vahvistimelta ulostulevan jännitteen maksimiarvo,  $V_{\text{minoutput}}$  on vahvistimelta tulevan jännitteen minimiarvo,  $V_{\text{maxinput}}$  on anturilta ulostulevan jännitteen maksimiarvo ja  $V_{\text{mininput}}$  on anturilta tulevan jännitteen minimiarvo. Kaavalla 8 vahvistukseksi saadaan

$$A = \frac{3,3 \text{ V} - 0 \text{ V}}{5,6 \text{ mV} - 0 \text{ V}} = 590$$

Instrumentointivahvistimen vahvistus määritellään kahden vastuksen vastusjaolla. Kuvassa 5 on datalehdestä otettu kuva, josta ilmenee vahvistuksen määrittäminen käytetyssä instrumentointivahvistimessa.



Kuva 5. Instrumentointivahvistimen vahvistuksen määrittäminen [7]

Tämän seurauksena voidaan laskea instrumentointivahvistimen vastusten arvot käyttämällä datalehdestä löytyvää kaavaa

$$GAIN = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \quad (9)$$

Koska kytkennässä ei käytetä vahvistimen suodatinta, kytkennässä ei tarvita  $C_{FILTER}$ -kondensaattoria. Tällöin kaava voidaan muuttaa muotoon

$$GAIN = 1 + \frac{R_1}{R_2}, \quad (10)$$

missä  $R_1$  ja  $R_2$  ovat vastusten arvoja. Vaikka  $C_{FILTER}$ -kondensaattoria ei tarvita, lisätään se kuitenkin piirilevyille. Tällöin se voidaan tarvittaessa lisätä, mikäli siihen tulee myöhemmin tarvetta. Vahvistusta laskettaessa vastuksen  $R_1$  arvoksi valittiin  $560 \text{ k}\Omega$ , jolloin vastuksen  $R_2$  arvo saadaan laskettua ratkaisemalla kaavasta 10 muuttuja  $R_2$ . Tällöin kaava tulee muotoon

$$R_2 = \frac{R_1}{GAIN-1} \quad (11)$$

Kun kaavaan 11 asetetaan arvot, saadaan vastuksen  $R_2$  arvoksi

$$R_2 = \frac{560 \text{ k}\Omega}{590-1} = 950 \Omega$$



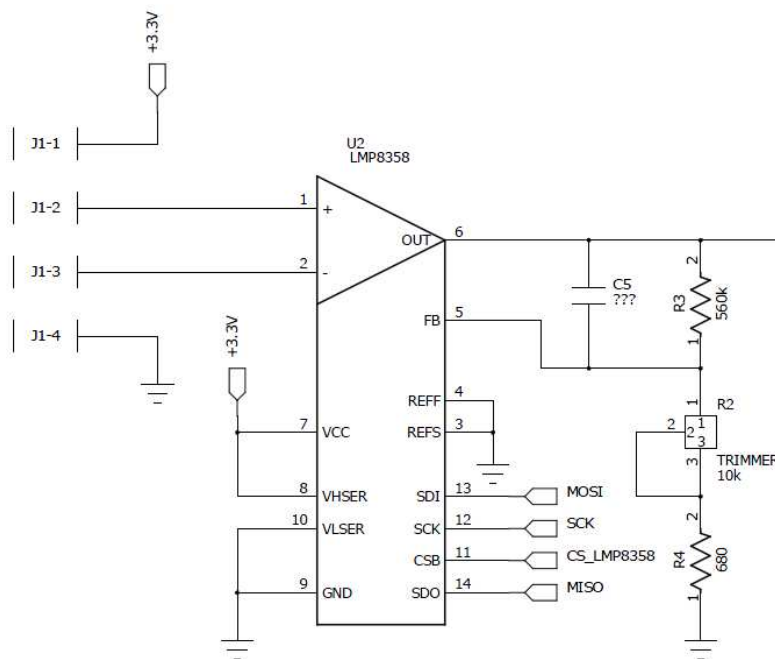
Koska instrumentointivahvistimen vahvistusta halutaan säätää, korvataan vastus  $R_2$  trimmerin ja vastuksen sarjaan kytkennällä. Tällöin trimmerin avulla voidaan säätää vahvistus halutunlaiseksi. Trimmeriksi valittiin  $10\text{ k}\Omega$  monikierrostrimmeri ja vastukseksi valittiin  $680\ \Omega$  vastus. Kyseinen trimmeri valittiin sen vuoksi, sillä niitä löytyi suoraan hyllystä. Paremmiin tähän olisi käynyt  $1\text{ k}\Omega$  monikierrostrimmeri. Käyttämällä näitä arvoja vahvistukset voidaan laskea käyttämällä kaavaa 10

$$GAIN_{min} = 1 + \frac{560\text{ k}\Omega}{10\text{ k}\Omega + 680\ \Omega} = 53,4$$

$$GAIN_{max} = 1 + \frac{560\text{ k}\Omega}{680\ \Omega} = 824,5$$

Ensimmäinen protokortti sisälsi pelkästään LMP8358-instrumentointivahvistimen, liittimen radiolle sekä liittimet kehityskortille liittämiseen. Protokortti pyrittiin pitämään yksinkertaisena, jotta se saatiin nopeasti valmiiksi. Tämä mahdollisti ohjelmiston toteutuksen jo insinööri-työn aikaisessa vaiheessa.

Protokortille ei suunniteltu minkäänlaista suodatusta vahvistuksen jälkeen, koska esimerkiksi näytteenottotaajuutta ei ollut valittuna. Tämä ratkaisu mahdollistaa sen, että erilaisia suodatinvaihtoehtoja voidaan rakentaa koekytkentäalustalle ja niiden sopivuutta voidaan testata protokortin kanssa. Kuvassa 6 on esitetty mittauselektroniikan kytkentäkaavio.



Kuva 6. Mittauselektroniikan kytkentäkaavio

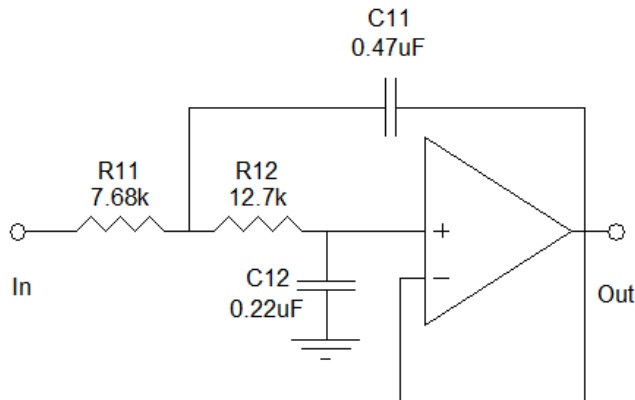
Protokortilla käytettyä mittauskytkentää käytettiin myös kortin lopullisessa versiossa.

### Suodattimien suunnittelu

Protokortilla tehtyjen testien perusteella päädyttiin 100 hertsin näytteenottotaajuuteen. Tämän seurauksena voitiin aloittaa suodattimien suunnittelu mittauskytkennälle. Lähetinkortilla mitataan kulmatiedon lisäksi myös kortin paristojen jännitettä. Tämän seurauksena kortti vaatii kaksi samanlaista alipäästösuodatinta suodattamaan AD-muuntimille tulevia jännitteitä. Lähetinkortilla päädyttiin käyttämään 2. asteen aktiivisia suodattimia, joiden suunnittelu tapahtui käyttämällä ilmaista FilterLab-ohjelmaa. FilterLab-ohjelma on Microchip-yrityksen valmistama aktiivisten suodattimien suunnitteluun tarkoitettu ohjelma.

Ennen aktiivisten suodattimien suunnittelua joudutaan miettimään, käytetäänkö Sallen-Key-topologiaa vai MultipleFeedback-topologiaa. MultipleFeedback-topologiaa käytetään, kun suodattimilta tarvitaan korkeita Q-arvoja ja suuria vahvistuksia. Sallen-Key-topologiaa käytetään, kun tarvitaan pieniä Q-arvoja, tarkkaa vahvistusta tai mikäli sisään tulevaa signaalia ei tarvita vahvistaa. Lähetinkortilla tarvitaan suodattimet, joiden Q-arvo on pieni eivätkä ne vahvista sisään tulevaa signaalia. Näiden vaatimusten perusteella päädyttiin Sallen-Key-topologiaan. Suodattimien approksimaatioksi valittiin Butterworth, koska se tarjoaa tasaisen vahvistuksen päästökaistalla. Tämän vuoksi Butterworth-approksimaatio sopii hyvin käytettäväksi laskostumisenestosuodattimissa [13.]

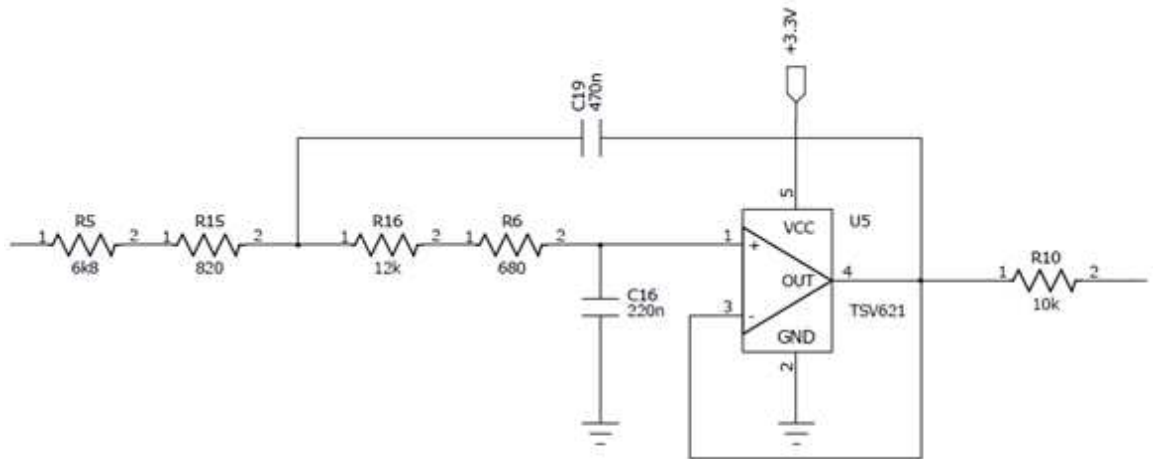
Koska käytetään 100 hertsin näytteenottotaajuutta, tulee alipäästösuodattimien rajataajuuksien olla puolet käytetystä näytteenottotaajuudesta. Tämä johtuu siitä, että alipäästösuodin toimii samalla myös laskostumisenestosuodattimena. Kun suodattimen tiedot syötetään FilterLab-ohjelmalle, antaa se kytkentäkuvan lisäksi suodattimen Boden-kuvaajan sekä sen spice-mallin. Kuvassa 7 on esitetty FilterLab-ohjelman ehdottama kytkentäkuva alipäästösuodattimelle.



Kuva 7. 50 Hz alipäästösuodin Sallen-Key-topologialla

Suodattimen soveltuvuus lähetinkortille testattiin rakentamalla kytkentä koekytkentälevylle ja tarkistamalla suodattimen rajataajuus. Rajataajuuden määrittäminen tapahtui syöttämällä funktiogeneraattorilla 20 Hz taajuutta, jonka huipusta huippuun -arvo on 1 voltti, suodattimen sisään tulevaan. Ulostulevaa jännitettä tutkittiin oskilloskoopilla. Ulostuleva signaali vastasi sisään tulevaa signaalia. Kun suodattimen sisään tulevaa taajuutta nostettiin 50 hertsiin, huomattiin ulostulevan signaalin vaimentuneen noin 3 dB verran. Tästä voidaan päätellä, että suodatin toimii suunnitelmien mukaisesti.

Tämän jälkeen koekytkentälevylle rakennettu suodatin kytkettiin protokortin ja kehityskortin välille ja testattiin, soveltuuko rakennettu suodatin lähetyskortin suodattimeksi. Tarkkailemalla suodatettua kulmatietoa havaittiin, että siinä esiintyvät häiriöt suodattuivat tehokkaasti ja että kulman nopea muutos välittyy nopeasti mikrokontrollerille. Mikäli suodattimen rajataajuutena olisi käytetty pienempää rajataajuutta kuin 50 Hz, on mahdollista, että kulmatietojen muuttuminen ei välittyisi mikrokontrollerille nopeasti. Tämä heikentäisi kulmanmittauksen soveltuvuutta nopeiden kulman muutoksien mittaamiseen. Kuvassa 8 on esitetty lähetinkortin sekä kulmanmittauksessa että paristojen jännitetietojen suodatuksessa käytettyjen alipäästösuodattimien kytkentäkaaviot.



Kuva 8. Alipäästösuotimien kytkentäkaaviot

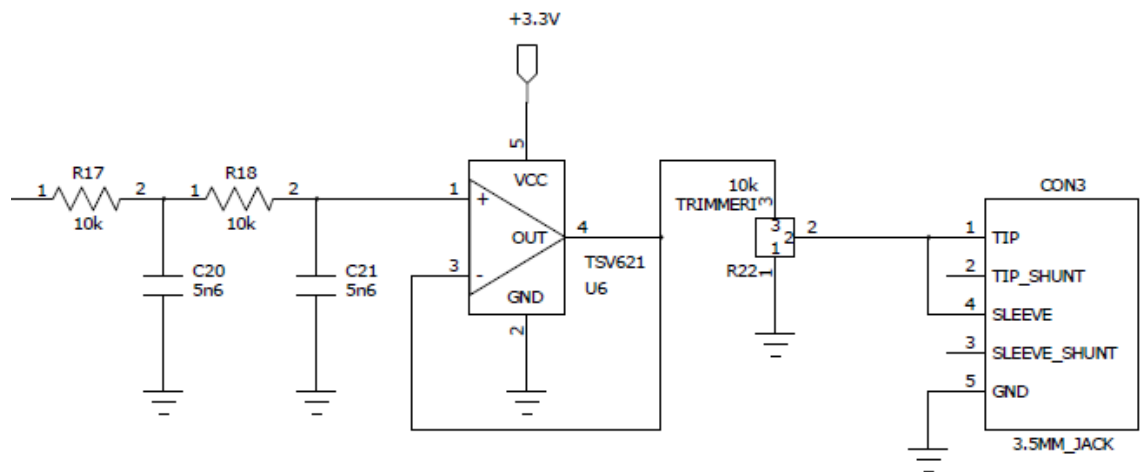
Kuvan 8 kytkennästä voidaan havaita, että haluttujen vastusarvojen saamiseksi on käytettävä kahden vastuksen sarjaankytkentöjä. Suodattimen ulostulossa käytetyn vastuksen tarkoituksena on sovittaa kuorma ATmega1281-mikrokontrollerin sisäiselle AD-muuntimelle, jotka on optimoitu toimimaan  $10\text{ k}\Omega$  tai sitä pienemmällä kuormalla. Mikäli AD-muuntimen kuorma on suurempi kuin  $10\text{ k}\Omega$ , hidastaa se mikrokontrollerin sample-hold-piirin toimintaa. Tällöin AD-muuntimen näytteenottotaajuuden on oltava pienempi kuin datalehden lupaama näytteenottotaajuus, jotta AD-muuntimella saataisiin oikea tulos [14.] Tämän lisäksi on tärkeää, että suodattimen operaatiovahvistimen sisääntulo ja ulostulo kykenee toimimaan jännitealueella 0 voltista käyttöjännitteeseen asti. Tällöin vältetään useiden käyttöjännitteiden käyttämiseltä, koska operaatiovahvistimien käyttöjännitteenä voidaan käyttää 3,3 voltin käyttöjännitettä. Tämä vaatii sen, että operaatiovahvistin on rail-to-rail-tyyppinen. Tämä tarkoittaa sitä, että sekä sisääntulo että ulostulo kykenee toimimaan erittäin lähellä käyttöjännitettä sekä maatasoa. Näiden perusteella operaatiovahvistimeksi valittiin STMicroelectronics-yrityksen valmistama TSV621-operaatiovahvistin.

### Äänimerkin muodostaminen

Äänimerkki päätettiin muodostaa käyttämällä ATmega1281-mikrokontrollerin PWM-ulostuloa. PWM-ulostulossa tulee ulos kanttiaaltoja ja suodattamalla sitä alipäästösuotimella siitä saadaan muodostettua siniaaltoja, mikäli PWM-ulostuloa ohjataan oikein ohjelmallisesti. Tässä työssä riittää, että kuulokelitännästä saadaan ulos äänimerkki, jonka voimakkuutta voidaan muuttaa. Tämän seurauksena äänimerkin laatu ei ole kovinkaan tärkeä. Alipääs-

tösuodattimena käytettiin kahta peräkkäistä RC-alipäästösuodatinta, jotta siniaallosta saataisiin mahdollisimman puhdasta. Aluksi kytkentää testattiin yhdellä alipäästösuotimella, mutta havaittiin, että tämä ei suodata signaalia tarpeeksi. RC-suodattimien vastusten ja kondensaattorien arvojen valinta tehtiin kokeilemalla eri arvoja ja samalla testattiin, mikä taajuus kuulostaisi kuulokkeista hyvältä. Lopulta päädyttiin käyttämään 10 k $\Omega$  vastuksia ja 5,6 nF kondensaattoreita.

Alipäästösuodattimien jälkeen puskuroitiin suodatettu signaali TSV621-operaatiovahvistimella, josta se vietiin trimmerin kautta 3,5 mm kuulokeliittimelle. Kuvassa 9 on esitetty äänimerkin muodostamiseen käytetty kytkentä.



Kuva 9. Äänimerkin muodostamiseen käytetty kytkentä.

#### 4.1.2 Vastaanotin

Vastaanotin on rakenteeltaan huomattavasti yksinkertaisempi kuin lähetinkortti. Sen ainut tehtävä on välittää sanomia anturin ja tietokoneen välillä. Tietokoneen ja vastaanottimen välinen viestiliikenne kulkee USB-portin välillä, josta saadaan myös + 5 voltin käyttöjännite. Koska radiomoduuli käyttää + 3,3 voltin käyttöjännitettä ja vastaanottimen virrankulutus on pieni, käytetään lineaarista regulaattoria + 3,3 voltin käyttöjännitteen muodostamiseen.

Tiedonsiirto USB-portin ja vastaanottimen välityksellä päätettiin toteuttaa käyttämällä Future Technology Devices International Ltd. -yrityksen valmistamaa FT232-piiriä. Kyseinen piiri toimii tietokoneen puolella virtuaalisena sarjaporttina, jolloin tietojen lähettäminen ja vas-

taanottaminen on helppoa käyttöliittymässä. FT232-piiri kytketään mikrokontrollerin UART-väylään, jolloin sitä käsitellään sarjaporttina.

Vastaanottimeen lisättiin kaksi kappaletta ledejä sekä kaksi kappaletta kytkimiä, joita voidaan käyttää, mikäli niille tulee tarvetta myöhemmässä vaiheessa.

## 4.2 Viestiliikenne

Viestiliikenteessä käytetään viesteille ID-tunnuksia, joilla eri viestit voidaan tunnistaa toisista. Tämä helpottaa viestien käsittelyä sekä käyttöliittymässä että lähettimessä ja vastaanottimessa. Tällöin viestien käsittely voidaan tehdä tilakoneella, jossa eri tilat vastaavat viestin ID-tunnuksia. Tämän seurauksena uusien viestien lisääminen viestiliikenteeseen helpottuu, sillä riittää, että tilakoneisiin toteutetaan uusien viestien ID-tunnusten käsittely. Tämän lisäksi laitteisiin pitää toteuttaa viestiä vastaavat toiminnallisuudet.

### 4.2.1 Lähettimen ja vastaanottimen välinen viestiliikenne

Lähettimen ja vastaanottimen välinen langaton liikenne kulkee kahden AT86RF230-radiomoduulien välillä. Kyseinen radiomoduuli muodostaa langattomasti lähetettävän viestin kehyksen ja laskee CRC-tarkistussumman automaattisesti. Kyseinen kehys liitetään lähetettävään sanomaan sanomaa lähetettäessä ja se poistetaan automaattisesti vastaanotetusta sanomasta. Tämän lisäksi lähetettävän sanoman datakenttään lisätään toinen sanomakehys, jota käytetään lähettimen ja vastaanottimen välisien sanomien tunnistamiseen.

Tässä työssä AT86RF230-radiomoduulien välisessä viestikehyksestä hyödynnetään viestin pituutta ilmoittavaa viestikenttää sekä automaattisesti laskettua CRC-tarkistussummaa.

Varsinainen sanomakehys, jota käytetään viestien välittämisessä lähettimen ja vastaanottimen välillä, perustuu viestien tunnistamiseen viestin ID-numeron perusteella. Jokaisella sanomalla on oma ID-numero, jonka perusteella voidaan tietää datakentän sisältö. Sanomakehyksessä ensimmäinen tavu ilmoittaa viestin ID-numeron, jota seuraa ASCII-taulukon pilkku-merkki. Tämän jälkeen sanomakehyksessä tulee varsinainen sanoman data. Taulukossa 1 on esitetty eri viestien ID-numerot.

Taulukko 1. Viestien ID-numerot

Viestin ID-numero	Viestin tarkoitus
0x01	Anturitietojen lähetys
0x02	Anturi odottaa asetuksia
0x03	PC lähettää asetukset
0x04	Anturi lähettää nykyiset asetukset
0x05	Start-käsky
0x06	Stop-käsky

Viestin datakentän sisältö riippuu viestin ID-numerosta. Datakentässä jokainen yksittäinen tieto on erotettu ASCII-taulukon pilkulla, ja mikäli datakenttä on tyhjä, lähetetään pelkkä viestin ID-numero. Taulukossa 2 on esitetty eri viestien ID-numeroita vastaavat datakentän sisällöt.

Taulukko 2. Datakenttien sisältö eri viestien ID-numeroilla

Viestin ID-numero	Datakentän sisältö
0x01	Kulmatieto (16-bittiä), akku (8-bittiä), tila (8-bittiä)
0x02	Akku (8-bittiä), tila (8-bittiä)
0x03	Mode (8-bittiä), rajakulma (16-bittiä), offset (8-bittiä), ajastus (16-bittiä)
0x04	Mode (8-bittiä), rajakulma (16-bittiä), offset (8-bittiä), ajastus (16-bittiä), akku (8-bittiä), tila (8-bittiä)
0x05	Dataa ei lähetetä
0x06	Dataa ei lähetetä

Datakentän yksittäiset tiedot lähetetään aloittaen eniten merkitsevistä bitistä. Taulukossa 3 on selitetty tarkemmin yksittäisien datakentän tietojen tarkoitus ja muoto.

Taulukko 3. Datakentän tietojen selitykset

Datakentän tieto	Selitys
Kulmatieto	Lähettimeltä luettu kulmatieto kerrottuna luvulla 10, jolloin päästään eroon desimaalipilkusta. Lähetetään 2 tavuisena heksalukuna. Esimerkiksi $0x054C = 1356_{10} = 135,6$ astetta
Akku	Lähetinkortin akun varaustaso prosentteina. Luku väliltä 0–100 lähetetään 1 tavun mittaisena heksalukuna. Esimerkiksi $0x38 = 56_{10} = 56\%$
Tila	1 tavun mittainen heksaluku, joka kertoo lähettimen senhetkisen tilan. Tietoa voidaan käyttää esimerkiksi kertomaan, onko mittaus käynnistetty. Heksaluvut $0x00$ – $0x09$ .
Mode	1 tavun mittainen heksaluku, jolla voidaan asettaa lähetinkortti toimimaan eri toimintatiloissa. Heksaluvut $0x00$ – $0x09$
Rajakulma	Rajakulman arvo kerrottuna luvulla 10, jolloin päästään eroon desimaalipilkusta. Käytetään määrittämään kulma, jonka saavutettua äänimerkki muodostetaan. Lähetetään 2 tavuisena heksalukuna. Esimerkiksi $0x005A = 900_{10} = 90,0$ astetta
Offset	1 tavun mittainen heksaluku, joka alueen rajakulman ympärillä, jossa äänimerkki muodostetaan. Esimerkiksi jos rajakulma on $90,0$ astetta ja offset on $0x05$ ( $= 5_{10} = 5$ astetta) niin äänimerkki soitetaan kun kulma on välillä $85,0$ – $95,0$ astetta.
Ajastus	2 tavun mittainen heksaluku, joka kertoo ajastuksen pituuden sekunteina. Esimerkiksi $0x0258 = 600_{10} = 600\text{ s} = 10\text{ min}$

#### 4.2.2 Vastaanottimen ja tietokoneen välinen viestiliikenne

Vastaanottimen ja tietokoneen välisessä viestiliikenteessä sanomakehys eroaa hieman lähettimen ja tietokoneen välisestä sanomakehyksestä. Tässä viestin aloitusmerkkinä toimii ASCII-taulukon #-merkki ja lopetusmerkkinä toimii ASCII-taulukon =-merkki. Tämän lisäksi yksittäiset tiedot erotetaan ASCII-taulukon pilkku-merkillä. Vastaanottimen tärkein tehtävä on muuttaa lähettimeltä saadun sanoman sisältö ASCII-muotoon ja lähettää se tietokoneen käyttöliittymälle. Kun sanoma on saatu muutettua ASCII-muotoon, lasketaan sanomalla CRC-tarkistussumma. Tällä varmistetaan se, että käyttöliittymässä voidaan havaita tiedonsiirrossa tapahtuvat virheet.



Sanomakehyksessä aloitustavun jälkeen viestissä on viestin lähettäneen anturin osoite. Anturin osoitteen avulla voidaan tunnistaa, mikä anturi on lähettänyt sanoman, mikäli järjestelmässä käytetään useampia lähettimiä. Tämän osoitteen jälkeen lähetetään varsinainen data ja viestin loppuun lisätään CRC-tarkistussumma ennen lopetusmerkkiä. Taulukossa 4 on esitetty vastaanottimen ja tietokoneen välisessä sanomakehyksessä käytettyjen viestien ID-numeroiden selitykset.

Taulukko 4. Viestien ID-numerot

Viestin ID-numero ASCII-merkkeinä	Viestin tarkoitus
1	Anturitietojen lähetys
2	Anturi odottaa asetuksia
3	PC lähettää asetukset
4	Anturi lähettää nykyiset asetukset
5	Start-käsky
6	Stop-käsky

Kuten lähettimen ja vastaanottimen välisessä viestiliikenteessä, myös vastaanottimen ja tietokoneen välisessä viestiliikenteessä datakentän sisältö riippuu viestin ID-numerosta.

Taulukossa 5 on esitetty datakentän sisältö eri viestien ID-numeroilla.

Viestin ID-numero ASCII-merkkeinä	Datakentän sisältö
1	Kulmatieto (5 tavua), akku (3 tavua), tila (1 tavu)
2	Akku (3 tavua), tila (1 tavu)
3	Mode (1 tavu), rajakulma (5 tavua), offset (4 tavua), ajastus (2 tavua)
4	Mode (1 tavu), rajakulma (5 tavua), offset (4 tavua), ajastus (2 tavua), akku (3 tavua), tila (1 tavu)
5	Dataa ei lähetetä
6	Dataa ei lähetetä

Datakenttien selitykset ovat samat kuin lähettimen ja vastaanottimen välisessä viestiliikenteessä olevissa datakentissä, jotka on esitetty taulukossa 3. Eroina on kuitenkin datakenttien pituudet. Taulukossa 6 on esitetty vastaanottimen ja tietokoneen välisen viestikehyksen datakenttien rakenne selitettynä.

Taulukko 6. Datakentän tietojen selitykset

Datakentän tieto	Selitys
Kulmatieto	Kulma 5-tavuisena ASCII-merkkeinä, jossa desimaalieriotteena toimii ASCII-taulukon piste-merkki. Mikäli kulma on alle 100 astetta, asetetaan eniten merkitseväksi tavuksi välilyöntiä vastaava ASCII-merkki (0x20). Sama tehdään myös toiseksi eniten merkitsevälle tavulle, mikäli kulma on alle 10 astetta.
Akku	Akun taso prosentteina 3-tavuisena ASCII-merkkeinä. Mikäli akun taso on alle 100 astetta, asetetaan eniten merkitseväksi tavuksi välilyöntiä vastaava ASCII-merkki (0x20). Sama tehdään myös toiseksi eniten merkitsevälle tavulle, mikäli akun taso on alle 10 prosenttia.
Tila	Vastaanottimen lähettämä heksaluku muutettuna ASCII-taulukon numeroiksi. 1 tavun mittainen (luvut 0–9)
Mode	Vastaanottimen lähettämä heksaluku muutettuna ASCII-taulukon numeroiksi. 1 tavun mittainen (luvut 0–9)
Rajakulma	Rajakulma 5 tavuisena ASCII-merkkeinä, jossa desimaalierottimeksi toimii ASCII-taulukon piste-merkki. Mikäli kulma on alle 100 astetta, asetetaan eniten merkitseväksi tavuksi välilyöntiä vastaava ASCII-merkki (0x20). Sama tehdään myös toiseksi eniten merkitsevälle tavulle, mikäli kulma on alle 10 astetta.
Offset	Offset 3 tavuisena ASCII-merkkeinä, jossa desimaalierottimeksi toimii ASCII-taulukon piste-merkki. Mikäli offset on alle 10 astetta, asetetaan eniten merkitseväksi tavuksi välilyöntiä vastaava ASCII-merkki (0x20).
Ajastus	2 tavun mittainen heksaluku, joka kertoo ajastuksen pituuden sekunteina. Esimerkiksi $0x0258 = 600_{10} = 600 \text{ s} = 10 \text{ min}$

Kulmatieto, akun taso, rajakulma sekä offset pidetään vakiopituisena, joka helpottaa näiden tietojen käsittelyä käyttöliittymässä. Tämän vuoksi joudutaan kyseisten tietojen eteen lisäämään välilyöntejä, mikäli tietojen pituus ei täyty.

### 4.3 Ohjelmisto

Sekä lähettimen että vastaanottimen ohjelman toiminta perustuu yksinkertaiseen tilakoneeseen. Tämä ratkaisu mahdollistaa uusien ominaisuuksien helpon lisäämisen myöhemmässä vaiheessa. Tämän lisäksi se tekee ohjelman koodista helppolukuisen. Tarkoituksena oli luoda sekä lähettimelle että vastaanottimelle yksinkertaiset ohjelmistot, joilla kulmatietoa voitaisiin lukea langattomasti käyttöliittymässä. Näiden ohjelmistojen pohjalta ohjelmistoja voidaan ruveta laajentamaan ja uusia ominaisuuksia voidaan lisätä. Tämän vuoksi kaikkia ominaisuuksia ei ohjelmistoihin toteutettu.

#### 4.3.1 Lähetin

Lähettimen ohjelmiston toiminta perustuu sisäkkäisiin tilakoneisiin, joista ulompi tilakone määrittää laitteen tilan ja sisemmät tilakoneet määrittelevät toiminnallisuuden. Uloimmalla tilakoneella voidaan toteuttaa lähetinkortille erilaisia toimitiloja ja tilojen vaihtaminen on yksinkertaista. Sisemmissä tilakoneissa voidaan laitteen toiminta jakaa eri tiloille, jolloin uusien tilojen lisääminen on helppoa. Tällä tavalla myös toiminnallisuuden järjestyksen muuttaminen on helppoa.

Jotta lähettimen näytteenottonopeudeksi saataisiin 100 Hz, tarvitaan 10 ms viive. Tämä viive päätettiin toteuttaa käyttämällä yhtä ATmega1281-mikrokontrollerin sisäistä 16-bittistä ajastinta. Ajastin asetettiin aiheuttamaan keskeytys 10 ms välein. Tällöin kun edellinen kulmatieto on luettu ja lähetetty, jäädään odottamaan, että ajastimelta tulee keskeytys. Tämän jälkeen voidaan lukea ja lähettää luettu kulmatieto. Radiomoduulin operaatioiden väliset ajastukset tehtiin käyttämällä delay.h-kirjastoa, joka mahdollistaa mikrosekuntien ja millisekuntien viiveiden luonnin helposti.

#### 4.3.2 Vastaanotin

Vastaanottimen ohjelmiston toiminta perustuu tilakoneeseen, jossa suoritetaan vastaanottimen toiminnallisuudet.

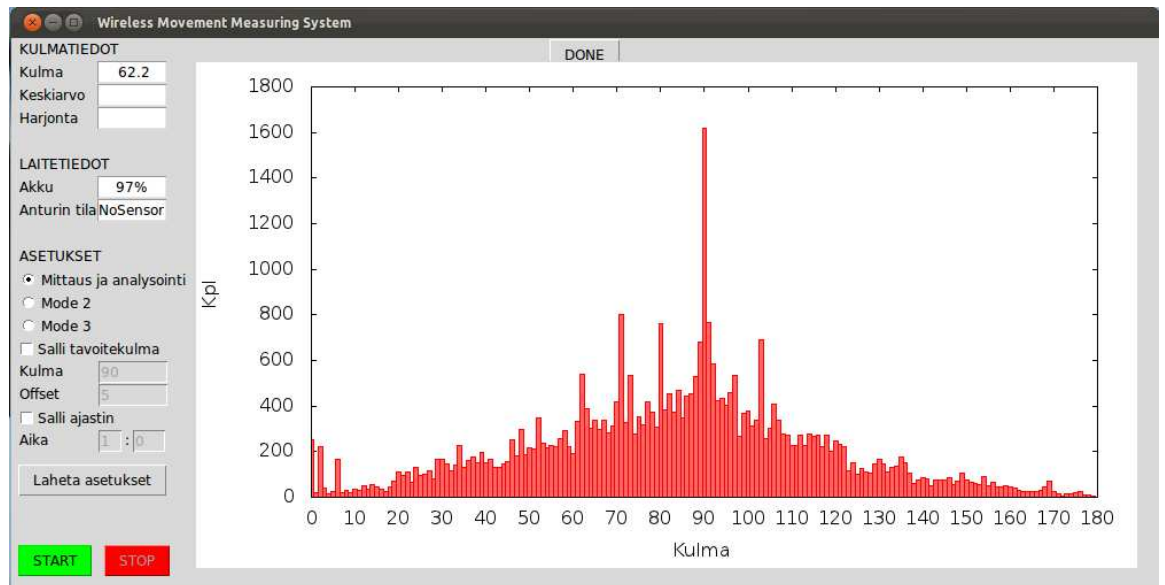
Vastaanotin odottaa sanomia sekä sarjaportista että lähetinkortilta. Mikäli vastaanotin saa sanoman lähetinkortilta, muuttaa se sanoman tiedot ASCII-muotoon. Muunnoksen jälkeen sanoman muoto vastaa taulukoissa 5 ja 6 esitettyjä muotoja. Tämän jälkeen sille lasketaan CRC-tarkistussumma ja se lähetetään tietokoneelle. Kun vastaanotin saa tiedon sarjaportista, se tarkistaa sanoman CRC-tarkistussumman. Mikäli tarkistussumma on oikea, muuttaa vastaanotin sanoman vastaamaan taulukoiden 2 ja 3 muotoa. Tämän jälkeen viesti lähetetään lähettimelle.

#### 4.4 Käyttöliittymä

Käyttöliittymä toteutettiin Python-ohjelmointikielellä käyttäen Tkinter-kirjastoa, joka mahdollistaa graafisen käyttöliittymän (GUI) toteuttamisen. Tkinter-kirjasto on Python-ohjelmointikielen eniten käytetty kirjasto graafisen käyttöliittymän toteuttamiseen. Kyseinen kirjasto pitää sisällään useita erilaisia tekstikenttiä, nappuloita sekä muita komponentteja käyttöliittymän toteuttamiseen. Internetistä löytyy useita dokumentteja sekä käyttöohjeita Tkinter-kirjaston käyttämiseen. Tämä helpottaa kyseisen kirjaston hyödyntämistä.

Käyttöliittymän tarkoituksena on ohjata lähetinkortin toimintaa ja näyttää lähetinkortin lähetämä kulma-arvo sekä paristojen tila. Tämän lisäksi vastaanotetut kulmatiedot tallennetaan tekstitiedostoon myöhempää käyttöä varten. Tallennetut kulmatiedot voidaan vaikka siirtää Excel-tiedostoon, jossa kulmatiedoista voidaan muodostaa esimerkiksi graafinen esitys. Käyttöliittymään tulee pylväsdiaagrammi, josta käy ilmi, kuinka monta kertaa kulmat 0–180 astetta esiintyvät tallennetussa tiedostossa. Tämän avulla voidaan nähdä, miten vastaanotetut kulmatiedot ovat jakautuneet eri asteiden välille.

Pylväsdiaagrammin muodostamisessa käytettiin Gnuplot-ohjelmaa, jonka avulla voidaan luoda erilaisia diagrammeja tiedostoon keräytyistä arvoista. Gnuplot-ohjelmaa käytetään komentoriviltä, jolloin sitä voidaan ohjata suoraan Python-ohjelmointikielestä. Tämä vaati sen, että komentoriville kirjoitettavat komennot tallennetaan tekstitiedostoon ja ne ajetaan käyttöliittymän välityksellä. Diagrammit tallennetaan kuvatiedostona, jonka seurauksena niiden liittäminen käyttöjärjestelmään on helppoa. Kuvassa 10 on esitetty kuva käyttöliittymästä.



Kuva 10. Python-ohjelmointikielellä toteutettu käyttöliittymä

Kuvasta 10 voidaan havaita, että käyttöliittymä on vielä keskeneräinen, sillä kaikkiin kenttiin ei ole toteutettu toiminnallisuutta. Tämän lisäksi ikkunan yläaidasta löytyvä DONE-nappula on jätetty käyttöliittymään debuggauksen takia.

## 5 TULOKSET JA ANALYSOINTI

Testauksen ensimmäisessä vaiheessa mittausjärjestelmän toimivuus varmistettiin ensin työpöydällä, jossa vertailtiin anturilta saadun lukeman tarkkuutta. Samalla testattiin myös sekä ääni- että valomerkin toimivuutta, kun tavoitekulma on saavutettu. Toisessa vaiheessa mittausjärjestelmän lähetinkortti ja anturi kiinnitettiin jalkaan. Tällä tavalla testattiin mittausjärjestelmän toimivuutta polven nivelen liikkeen mittaamisessa.

Ensimmäisessä vaiheessa paperille merkittiin kulmat 45, 90, 135 ja 180 astetta ja asetettiin anturi paperin päälle. Kyseiset kulmat valittiin sen vuoksi, koska ne ovat helppo muodostaa tarkasti. Koska anturilta ulostuleva jännite muuttuu lineaarisesti, voidaan olettaa muidenkin kulmien tarkkuuden olevan samaa luokkaa. Tämän jälkeen anturia käännetään siten, että se muodostaa paperille merkityt kulmat. Kulman muodostus tehtiin silmämääräisesti mahdollisimman tarkasti, ja sen jälkeen käyttöliittymällä luettiin lähettimen antama kulma-arvo. Jokainen kulma-arvo muodostettiin 5 kertaa, ja ne taulukoitiin. Taulukkoon 7 on merkitty saadut mittaustulokset.

Taulukko 7. Ensimmäisen vaiheen mittaustulokset

Kulmat	1. mittaus	2. mittaus	3. mittaus	4. mittaus	5. mittaus	keskiarvo
45°	43,7°	43,9°	44,6°	44,6°	44,8°	44,3°
90°	89,5°	89,1°	89,6°	90,5°	89,9°	89,7°
135°	135,3°	134,0°	135,1°	134,9°	135,2°	134,9°
180°	182,4°	182,0°	183,1°	181,3°	182,2°	182,2°

Toisessa vaiheessa lähetinkortti ja kulma-anturi kiinnitettiin jalkaan ja kulma-arvoa luettiin käyttöliittymällä. Tämän testin tarkoituksena oli pääasiassa testata, riittääkö mittausjärjestelmässä käytetty 100 Hz näytteenottotaajuus jalan liikkeen mittaamiseen. Testin aikana jalkaa liikutettiin nopeaan tahtiin ja seurattiin käyttöliittymällä lähetinkortin lähettämää kulma-arvoa. Testin alussa lähetinkortin lähettämä kulmatieto päivittyi hyvin käyttöliittymälle ja näytteenottonopeus näytti riittävän jalan liikkeen mittaamiseen. Joitain satunnaisia nopeita jalan liikkeitä käyttöliittymässä ei havaittu.

Testin aikana lähetinkortti lopetti kulmatietojen lähettämisen, ja tämän ongelman syytä alettiin selvittämään. Kun yleismittarilla mitattiin instrumentointivahvistimelta ulostulevaa signaalia, havaittiin, että se on 0 volttia useilla eri kulma-arvoilla. Tämän jälkeen mitattiin anturilta tuleva differentiaalinen jännite ja havaittiin, että se muuttuu halutunlaisesti eri kulma-arvoilla. Ongelmaa yritettiin korjata vaihtamalla instrumentointivahvistin uuteen, mutta tämä ei tuottanut tulosta. Todennäköisesti ongelma johtui jyritystä piirilevystä, joka aiheuttaa oikeuslun instrumentointivahvistimen vedoissa.

### Tulosten analysointi

Ensimmäisen testausvaiheen aikana havaittiin, että näytteenottonopeus ja kulma-anturin tarkkuus riittävät urheilijan nivelliikkeen mittaamiseen. Mittausten perusteella kulmatiedon esittämiseen riittäisi yhden asteen tarkkuus, sillä silmämääräisesti on vaikea erottaa 0,1 asteen muutosta kulmassa. Taulukosta 7 voidaan havaita, että 180 asteen kohdalla mitatuissa kulma-arvoissa virhe on suurempi kuin muilla arvoilla. Tämä johtuu siitä, että kulma-anturia ei ole tarkoitettu toimimaan yli 150 asteen kulmilla. Tästä huolimatta 180 asteen kohdalla virhe ei ole kuitenkaan kovinkaan suuri ja siinä oleva virhe voidaan poistaa tai pienentää ohjelmallisesti. Tämän lisäksi kun 90 asteen kulma saavutettiin, ilmoitti lähetinkortti siitä sekä ääni- että valomerkillä.

Lähetinkortin suodattimien 50 Hz rajataajuus oli riittävä, kun näytteenottotaajuutena käytettiin 100 Hz. Sen avulla saatiin kulmatiedosta suodatettua häiriöt pois, jolloin kulmatieto pysyy vakaampana kun anturin asentoa pidettiin vakiona.

Testien aikana havaittiin, että kulmatieto voidaan lukea vain yhteen suuntaan. Sen seurauksena kulmatieto voidaan lukea vain vasemmasta jalasta. Tämä suunta riippuu siitä, miten päin kulma-anturin ulostulon johdot kytketään instrumentointivahvistimen sisääntuloihin. Ongelman muodostaa se, että kulman muutos yhteen suuntaa aiheuttaa positiivisen jännitemuutoksen ja toiseen suuntaa negatiivisen jännitemuutoksen. Tämän seurauksena instrumentointivahvistin ei kykene käsittelemään negatiivista jännitetietoa sen sisääntuloissa. Ongelman voidaan ratkaista yksinkertaisesti siten, että käytetään instrumentointivahvistimen sisäänrakennettua vikadiagnostiikkaa. Tämä mahdollistaa sen, että instrumentointivahvistimen sisääntulon napaisuutta voidaan muuttaa ohjelmallisesti.



## 6 YHTEENVETO

Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa langaton mittausjärjestelmä urheilijan nivelliikkeen mittaamiseen. Pohjana tässä insinööriyössä on käytetty Matti Lehtisen vuonna 2011 tekemää insinööriyötä. Hän tutki insinööriyössään Biometrics Ltd. -yhtiön valmistaman SG150-kulmanmittausanturin soveltuvuutta urheilijan nivelliikkeen mittaamiseen. Testausten perusteella SG150-kulmanmittausanturin tarkkuus riittää hyvin nivelliikkeen mittaamiseen.

Käytetty LMP8358-instrumentointivahvistin mahdollisti kulmanmittausanturin helpon kytkennän ja kulmatiedon lukemisen mikrokontrollerilla. Työn perusteella käytetty instrumentointivahvistin sopi hyvin käytettäväksi SG150-kulmanmittausanturin kanssa. Mittausjärjestelmästä saatiin tehtyä ensimmäinen versio, jolla pystyttiin mittaamaan nivelliikettä langattomasti. Langattomasta radioliikenteestä ei saatu kovinkaan luotettavaa, vaan radiopiirit jumittuivat satunnaisesti. Tämä todennäköisesti saadaan korjattua optimoimalla sekä lähettimen että vastaanottimen ohjelmistoa radiomoduulin käsittelyn osalta.

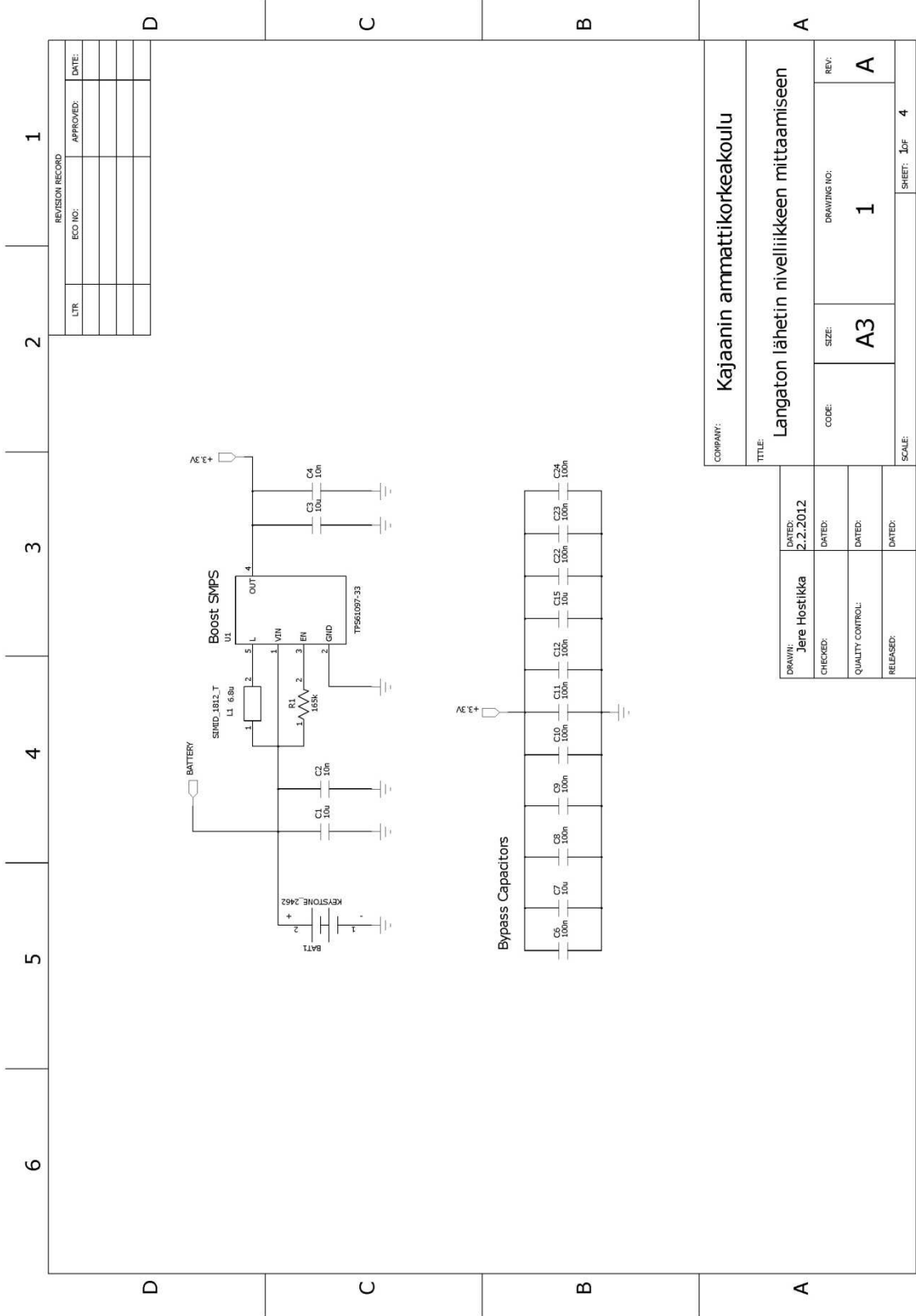
LMP8358-instrumentointivahvistimen sisäänrakennettu vikadiagnostiikka mahdollistaa sisääntulon napaisuuden vaihtamisen ohjelmallisesti. Sisääntulon napaisuuden vaihtaminen on harvinainen ominaisuus instrumentointivahvistimessa. Tämän seurauksena lähetinkortille voidaan ohjelmallisesti toteuttaa toiminto, joka automaattisesti tunnistaa kumpaan jalkaan anturi on kiinnitetty. Käyttämällä käytetyn jalan tunnistusta voidaan mittausjärjestelmästä tehdä käyttäjälle helppokäyttöisempi.

Luotettavuusongelmista huolimatta suunnitellusta mittausjärjestelmästä saatiin sellainen, että sen pohjalta voidaan mittausjärjestelmää lähteä kehittämään ja luotettavuutta parantamaan. Työn aikana saatiin selville, että 100 Hz näytteenottotaajuus riittää nopean polvenliikkeen mittaamiseen. Kuitenkin joitain nopeita nivelen liikkeitä ei saatu havaittua käyttöliittymässä.

## LÄHTEET

1. Lehtinen, Matti. 2011. Kulmanmittausanturi. Luettu 27.3.2012. Insinööriyö. Kajaanin ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2011060711379>
2. Ahvenainen, Ville. 2011. Nuorten jääkiekkoilijoiden luistelun kehittämisen opas. Insinööriyö. HAAGA-HELIA ammattikorkeakoulu. Luettu 27.3.2012. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201105269840>
3. Inkinen, Pentti. & Manninen, Reijo. & Tuohi, Jukka. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy. 2009. Momentti 2, Insinöörifysiikkaa
4. Leslie, Green. Maaliskuu 2007. AnalogSeekrets, DC to daylight. Luettu 5.4.2012. [PDF-dokumentti]. <<http://www.logbook.freemove.co.uk/seekrets>>
5. Honkanen, Harri. Anturit. Opetusmateriaali. Luettu 9.4.2012. [PDF-dokumentti]. [http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/ELE\\_A%20N%20T%20U%20R%20I%20T.pdf](http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/ELE_A%20N%20T%20U%20R%20I%20T.pdf)
6. Horowitz, Paul. & Winfield, Hill. Cambridge University Press. 1989. The Art of Electronics.
7. National Semiconductor. 5.5.2010. LMP8358-datasheet. Luettu 3.4.2012. [PDF-dokumentti]. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp8358.pdf>>
8. Atmel. 2/2009. AT86RF230-datasheet. Luettu 8.4.2012. [PDF-dokumentti]. <<http://www.atmel.com/Images/doc5131.pdf>>
9. Python Software Foundation. General Python FAQ. Luettu 27.3.2012. [WWW-dokumentti] <<http://docs.python.org/faq/general>>
10. Python Software Foundation. Extending Python with C or C++. Luettu 27.3.2012. [WWW-dokumentti] <<http://docs.python.org/extending/extending.html>>
11. Honkanen, Harri. Hakkurireguloinnin periaatteet. Opetusmateriaali. Luettu 29.3.2012. [PDF-dokumentti]. [http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honhar/ma/REG\\_HAKKURIREGULOINNIN%20PERIAATTEET.pdf](http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honhar/ma/REG_HAKKURIREGULOINNIN%20PERIAATTEET.pdf)
12. Texas Instruments. 12/2011. TPS61097-33-datasheet. Luettu 29.3.2012. [PDF-dokumentti]. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61097-33.pdf>>
13. Mancini, Ron. Elokuu 2002. Op Amps For Everyone. Luettu 27.3.2012. [PDF-dokumentti]. <<http://www.ti.com/lit/an/slod006b/slod006b.pdf>>

14. Atmel. 5/2011. ATmega1281-datasheet. Luettu 27.3.2012. [PDF-dokumentti].  
<<http://www.atmel.com/Images/doc2549.pdf>>



1

2

3

4

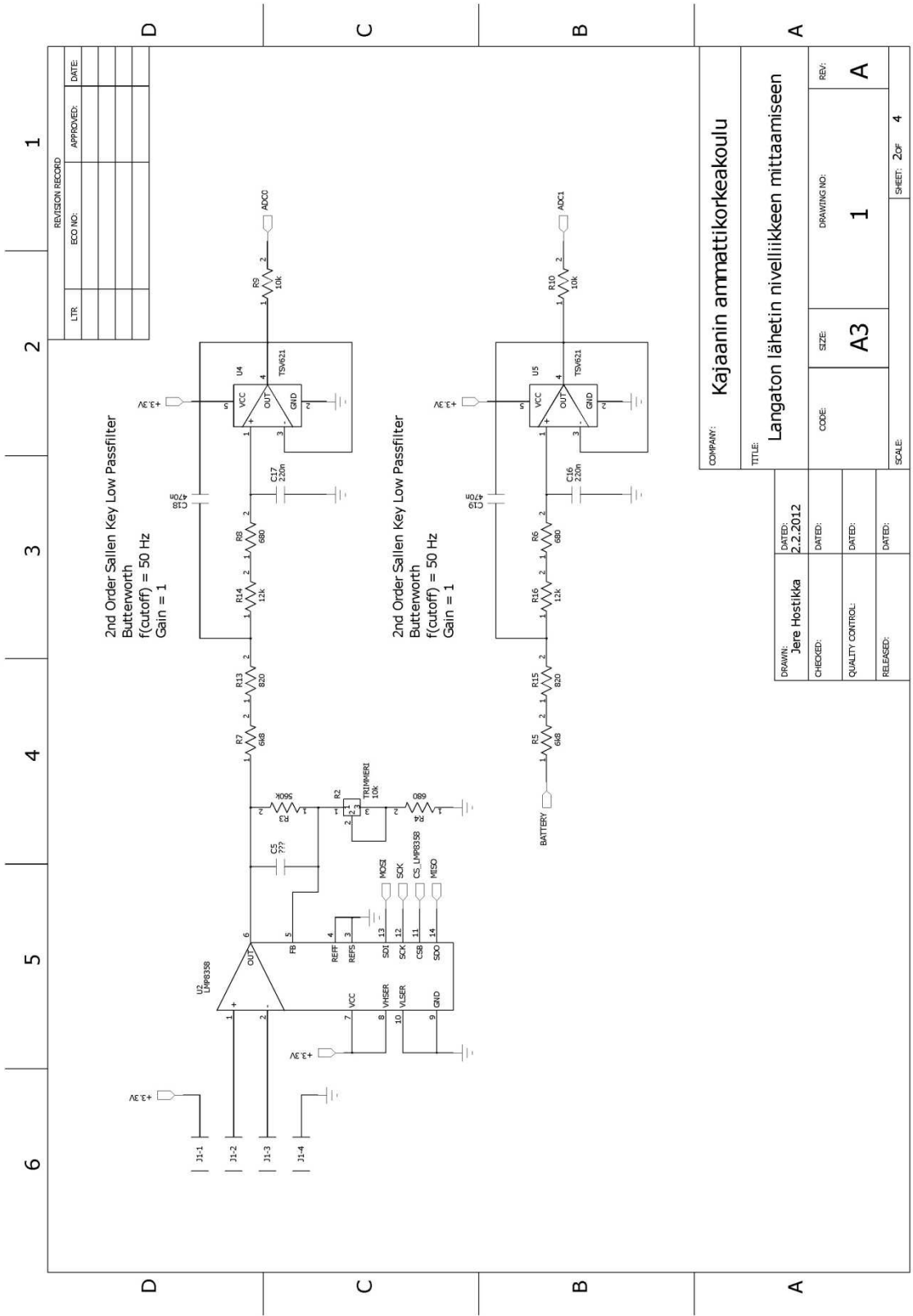
5

6

REVISION RECORD			
LTR.	ECO NO.	APPROVED:	DATE:

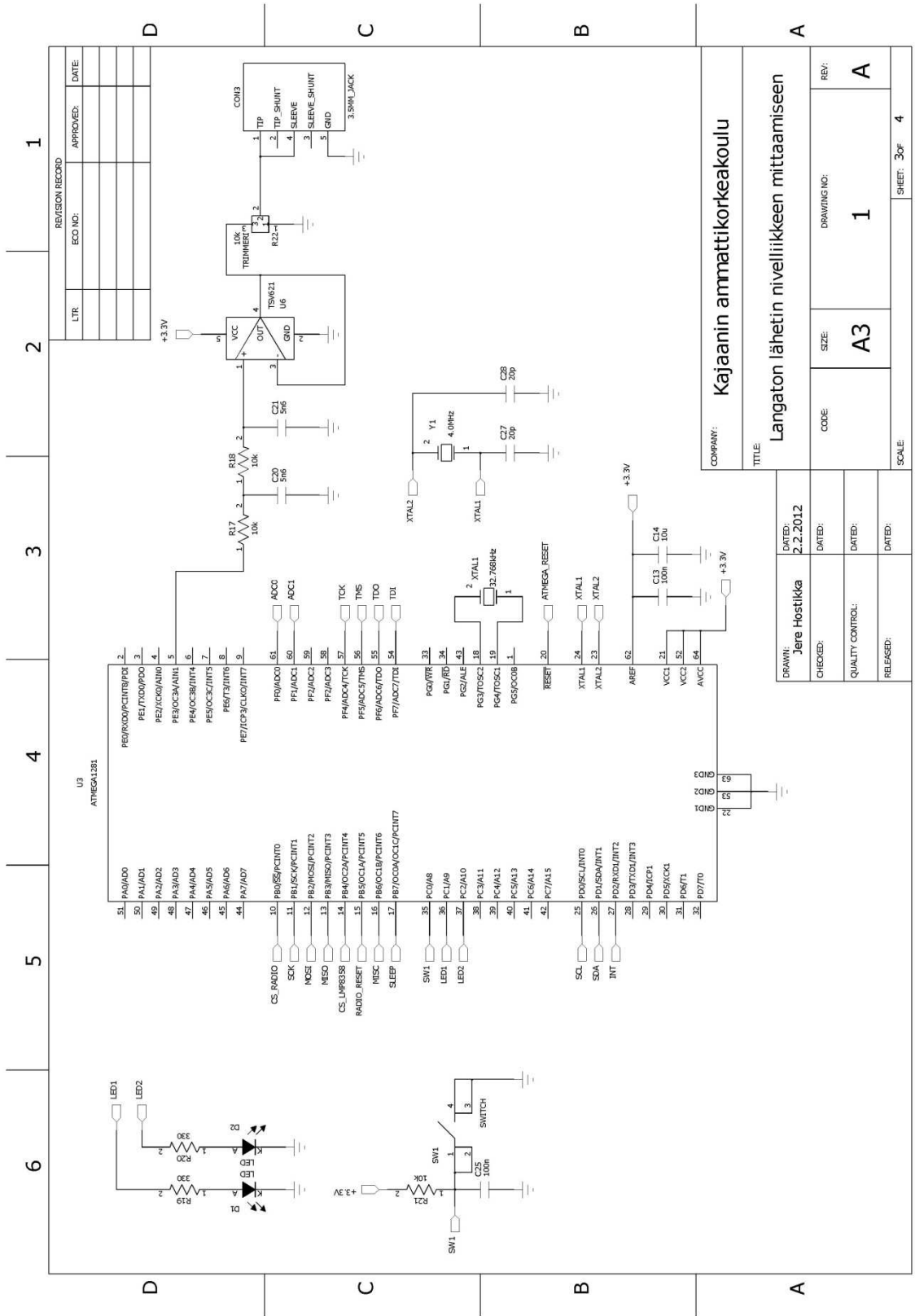
COMPANY: <b>Kajaanin ammattikorkeakoulu</b>			
TITLE: <b>Langaton lähetin nivelliikkeen mittaamiseen</b>			
CODE	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO: <b>1</b>	REV: <b>A</b>
SCALE:			SHEET: <b>1 of 4</b>

DRAWN: <b>Jere Hostikka</b>	DATED: <b>2.2.2012</b>
CHECKED:	DATED:
QUALITY CONTROL:	DATED:
RELEASED:	DATED:



REVISION RECORD		
LTR.	ECO NO.	APPROVED: DATE

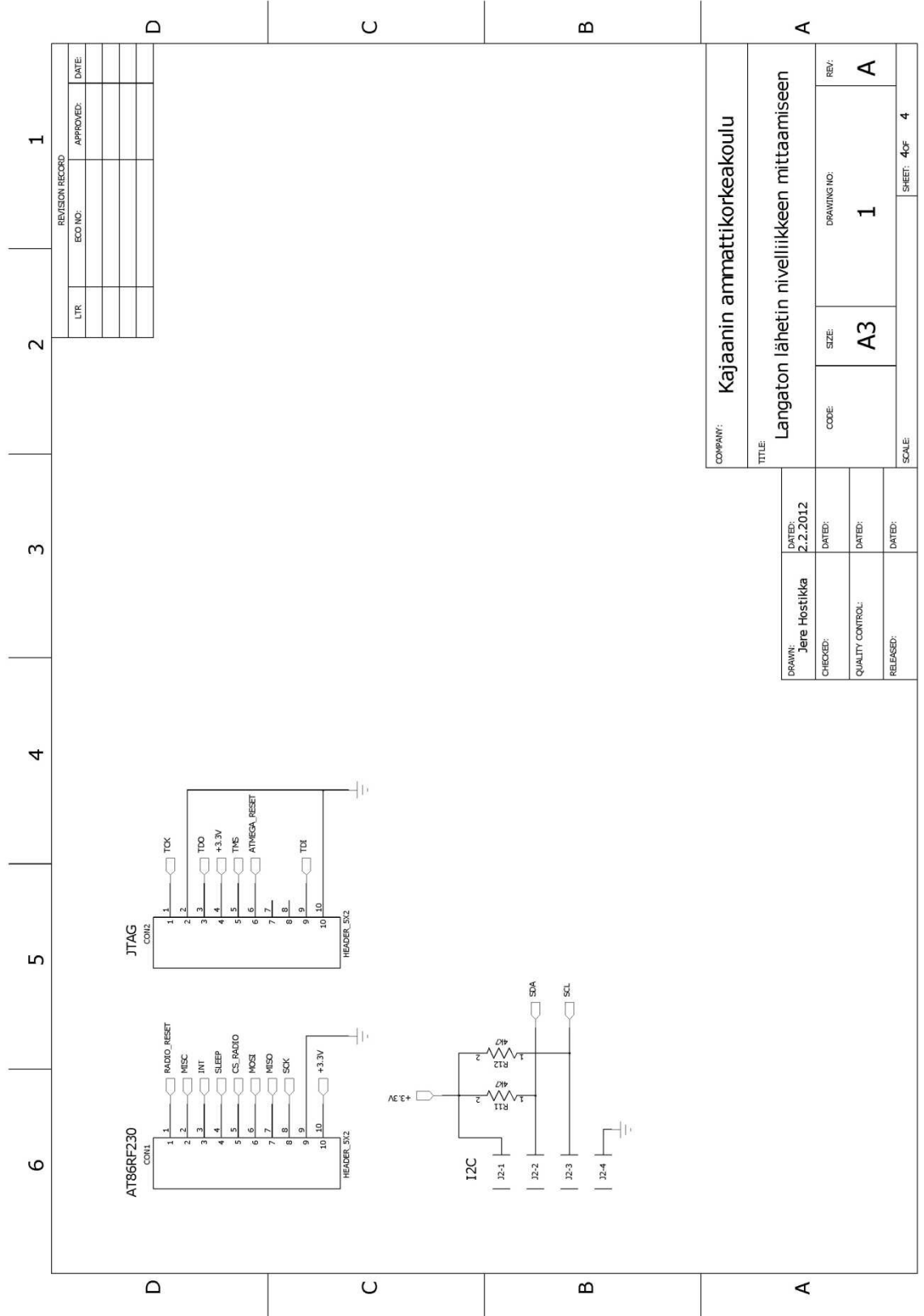
COMPANY: <b>Kajaanin ammattikorkeakoulu</b>			
TITLE: <b>Langaton lähtetin nivelliikkeen mittaamiseen</b>			
DATE: 2.2.2012	CODE: <b>A3</b>	SIZE: <b>1</b>	REV: <b>A</b>
CHECKED: Jere Hostikka	QUALITY CONTROL:	RELEASED:	SCALE: SHEET: 2 of 4



1 2 3 4 5 6

REVISION RECORD		
LTR	ECO NO.	APPROVED: DATE

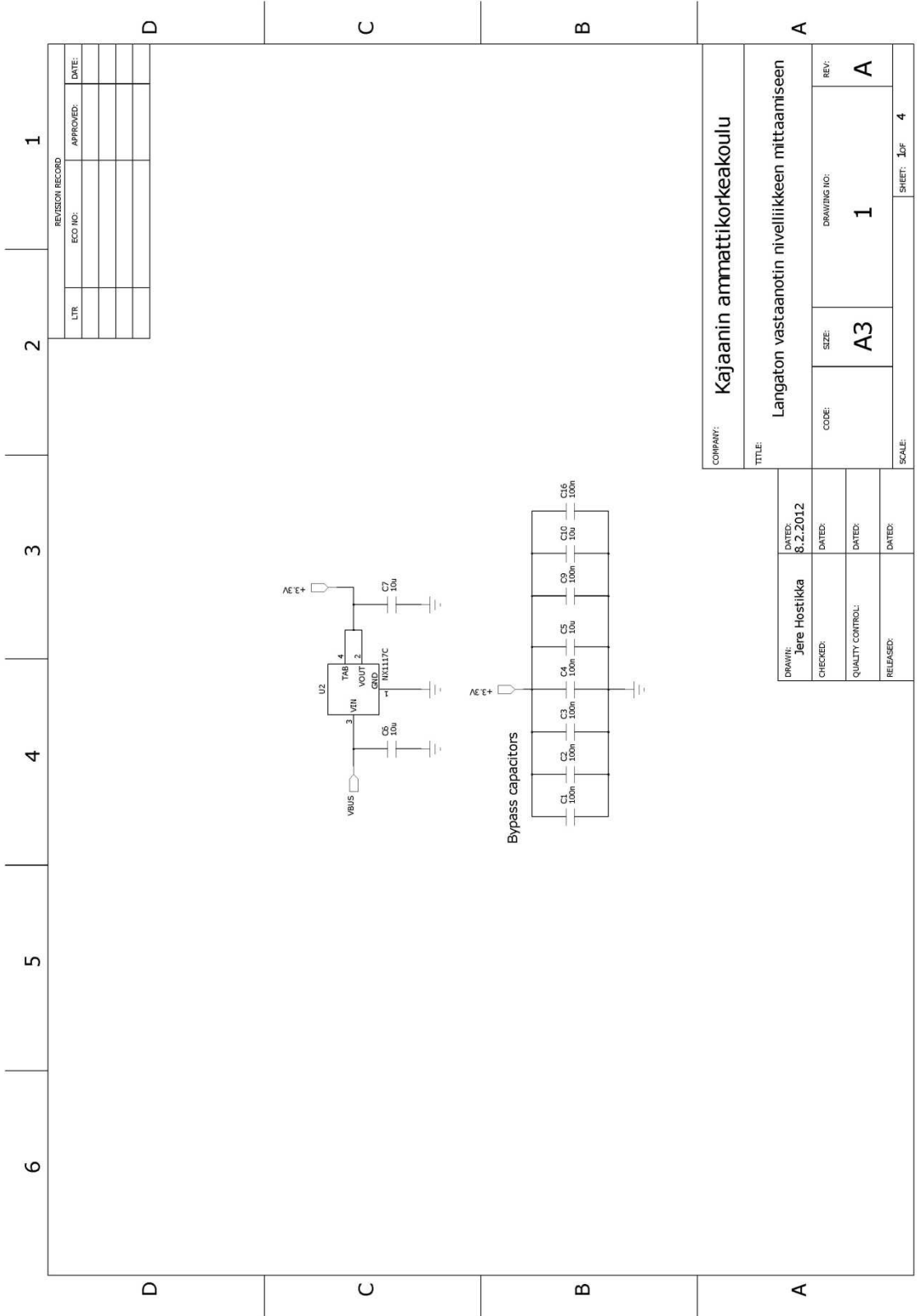
COMPANY: <b>Kajaanin ammattikorkeakoulu</b>			
TITLE: <b>Langaton lähetin nivelliikkeen mittaamiseen</b>			
DRAWN: <b>Jere Hostikka</b>	DATED: <b>2.2.2012</b>	CODE: <b>A3</b>	REV: <b>A</b>
CHECKED:	DATED:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO: <b>1</b>
QUALITY CONTROL:	DATED:	SCALE: <b>3OF 4</b>	
RELEASED:	DATED:		



REVISION RECORD			
LTR	ECO NO:	APPROVED:	DATE:

COMPANY: <b>Kajaanin ammattikorkeakoulu</b>			
TITLE: <b>Langaton lähetin nivelliikkeen mittaamiseen</b>			
CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO: <b>1</b>	REV: <b>A</b>
SCALE:	SHEET: 4 OF 4		

DRAWN: <b>Jere Hostikka</b>	DATED: <b>2.2.2012</b>
CHECKED:	DATED:
QUALITY CONTROL:	DATED:
RELEASED:	DATED:

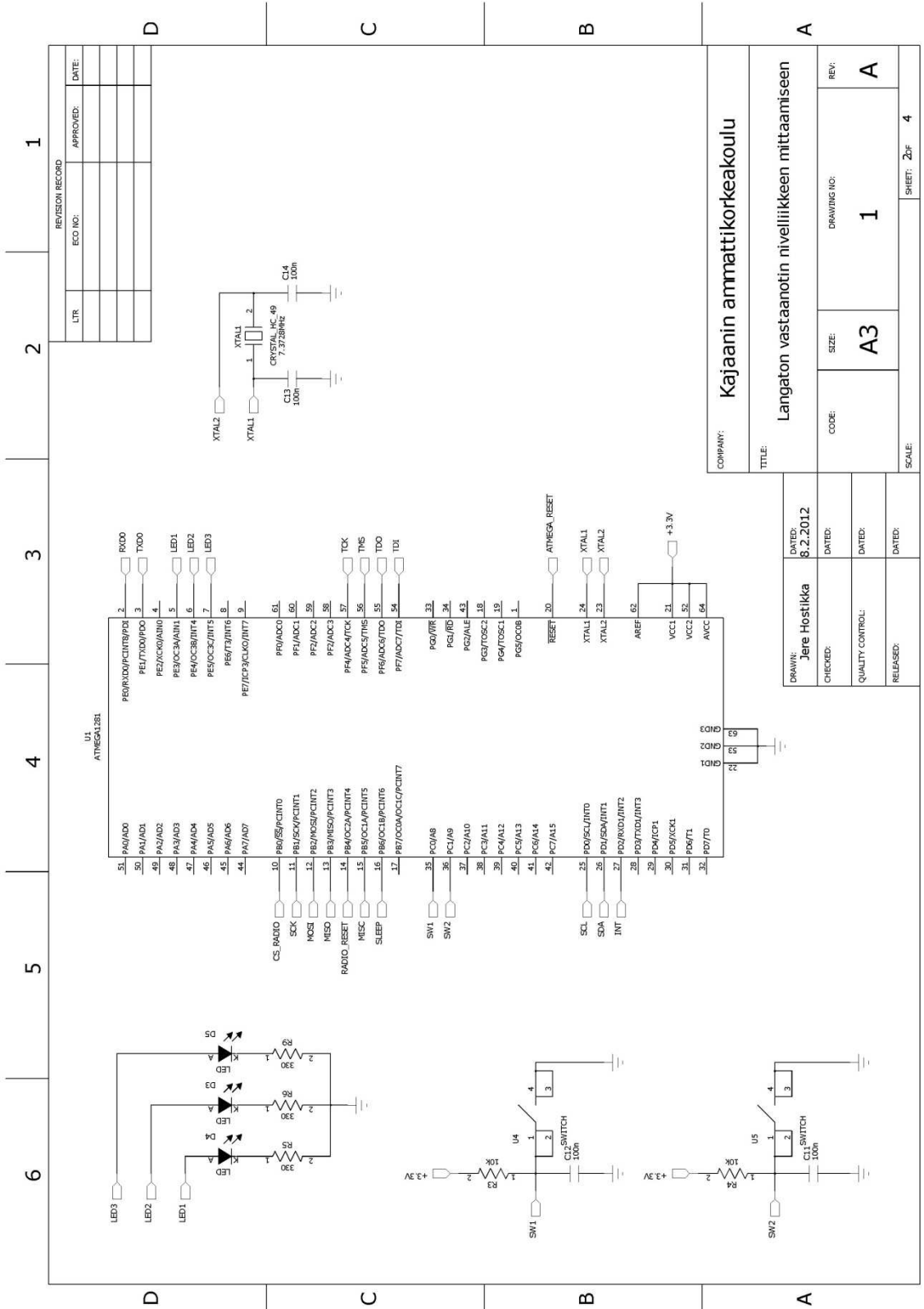


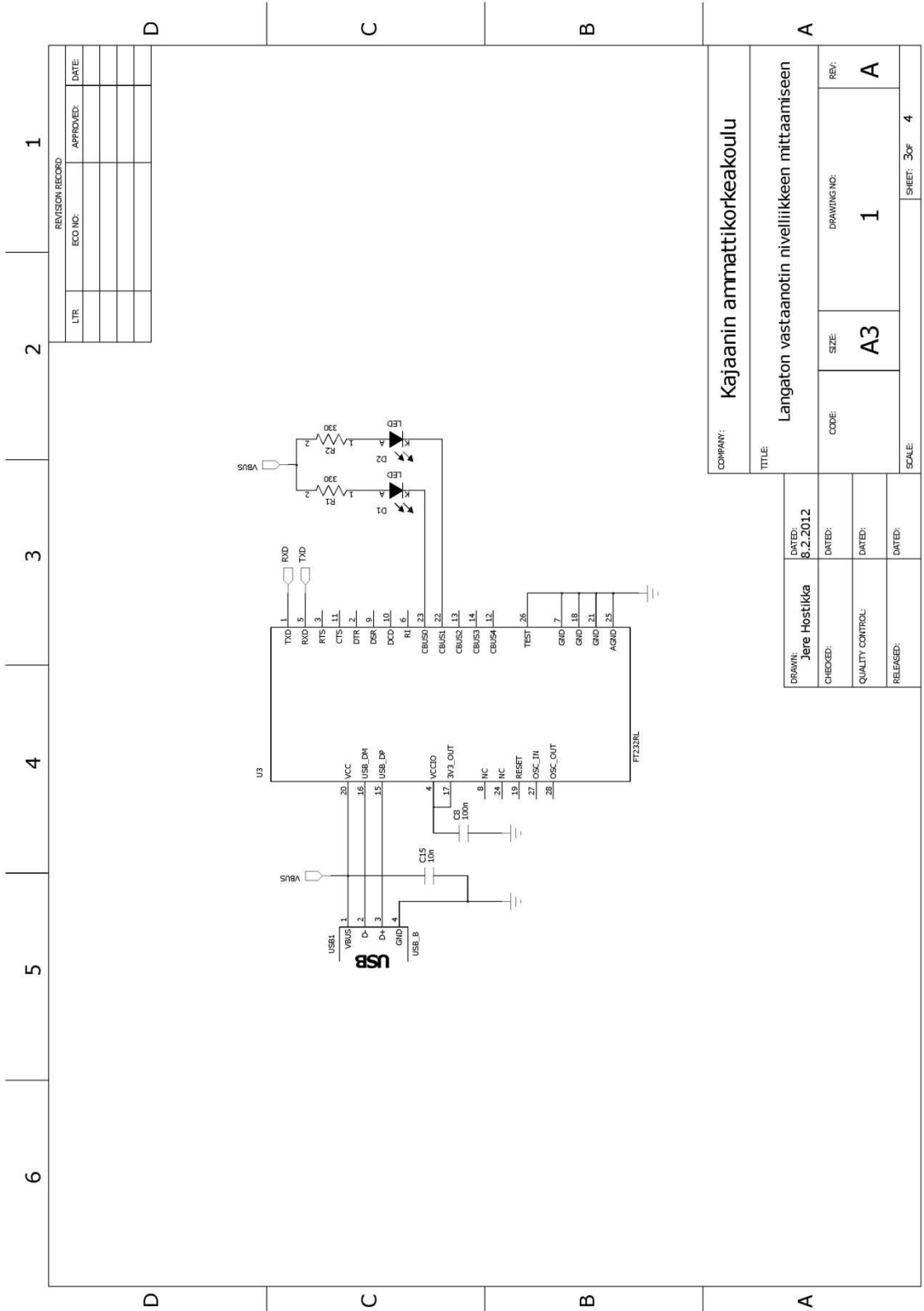
REVISION RECORD			
LTR.	ECO NO.	APPROVED:	DATE:

COMPANY: Kajaanin ammattikorkeakoulu	
TITLE: Langaton vastaanotin nivelliikkeen mittaamiseen	
CODE: A3	REV: A
SIZE: A3	DRAWING NO: 1
SCALE: 1:1	SHEET: 4 of 4

DRAWN: Jere Hostikka	DATED: 8.2.2012
CHECKED:	DATED:
QUALITY CONTROL:	DATED:
RELEASED:	DATED:

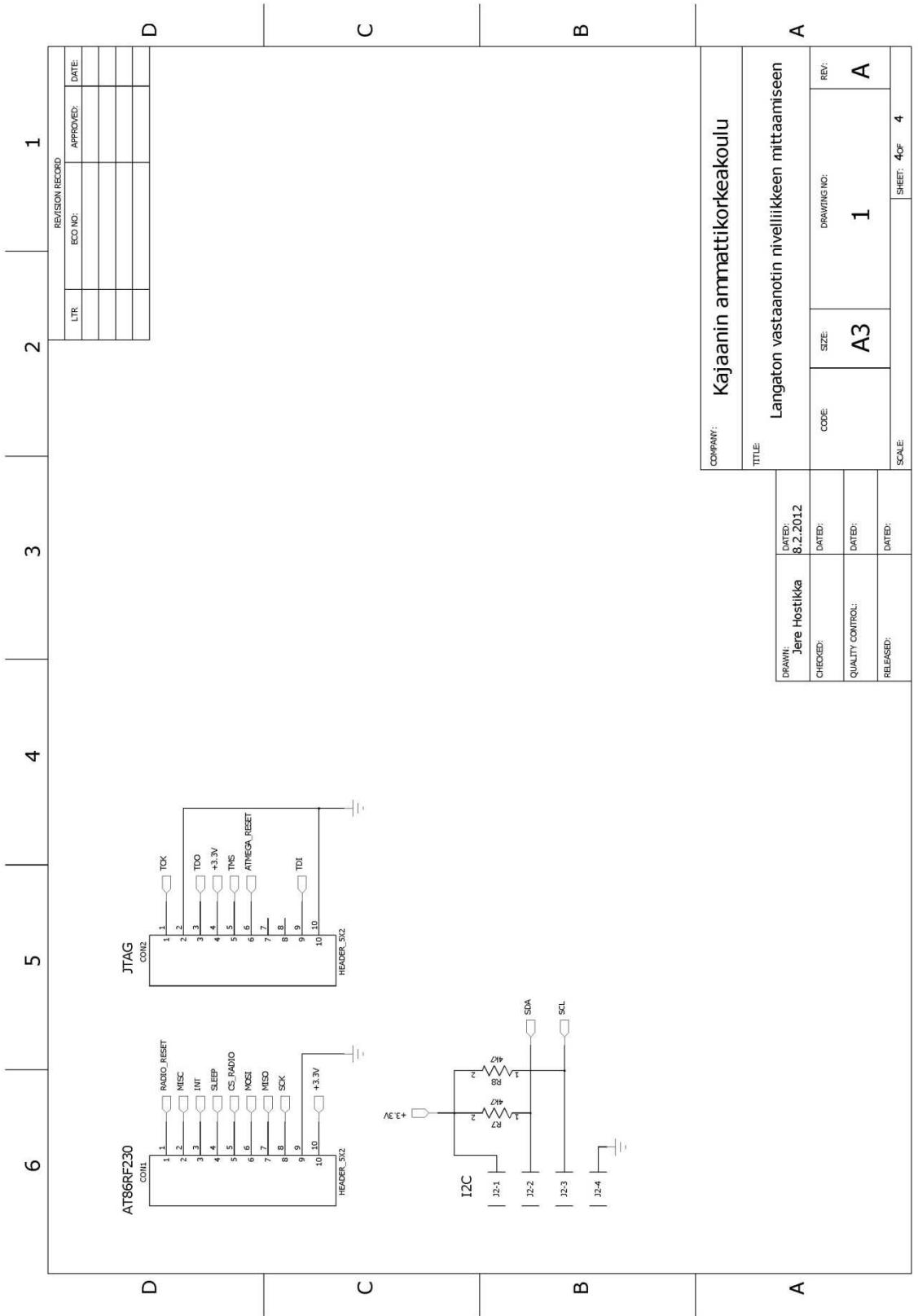






REVISION RECORD			
LTR	ECO NO.	APPROVED:	DATE

COMPANY: <b>Kajaanin ammattikorkeakoulu</b>			
TITLE: <b>Langaton vastaanotin nivelliikkeen mittaamiseen</b>			
DRAWN: <b>Jere Hostikka</b>	DATED: <b>8.2.2012</b>		
CHECKED:	DATED:		
QUALITY CONTROL:	DATED:		
RELEASED:	DATED:		
		CODE:	
		SIZE: <b>A3</b>	
		DRAWING NO: <b>1</b>	
		REV: <b>A</b>	
			SCALE: <b>3of 4</b>



REVISION RECORD		
LTR	ECO NO.	APPROVED: DATE

COMPANY: <b>Kajaanin ammattikorkeakoulu</b>		DRAWING NO: <b>1</b>		REV: <b>A</b>
TITLE: <b>Langaton vastaanotin nivelliikkeen mittaamiseen</b>		CODE: <b>A3</b>	SIZE: <b>A3</b>	SCALE: <b>1</b>
DRAWN: <b>Jere Hostikka</b>	DATED: <b>8.2.2012</b>	CHECKED:	DATED:	QUALITY CONTROL:
RELEASED:	DATED:	SHEET: <b>4</b> OF <b>4</b>		