

Jaakko Korva

**BIOSENSORIMITTALAITTEEN ELEKTRONIIKAN SUUNNITTELU
JA TESTAUS**

BIOSENSORIMITTALAITTEEN ELEKTRONIIKAN SUUNNITTELU JA TESTAUS

Jaakko Korva
Opinnäytetyö
Syksy 2015
Hyvinvointiteknologian koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Hyvinvointiteknologian koulutusohjelma

Tekijä(t): Jaakko Korva

Opinnäytetyön nimi: Biosensorimittalaitteen elektroniikan suunnittelu ja testaus

Työn ohjaaja(t): Jukka Jauhiainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2015 Sivumäärä: 38 + 4 liitettä

Opinnäytetyön tehtävänä oli tutkia, millaisella elektroniikkatoteutuksella voitaisiin muodostaa biosensoreiden amperometriseen mittaukseen tarkoitettu laite. Tämä laite tulisi olla helppo monistaa ja sitä kautta edelleen käyttää eri tutkimus- ja kehitysorganisaatioissa biosensoreihin liittyvien sovellusten kehittämiseen. Prototyypin tilaajana oli Manne Hannula, joka edusti Hyvinvointiteknologian tutkimus- ja tuotekehityskeskusta (HYTKE).

Mittalaitteen tehtävänä on toimia prototyyppialustana yritysten erilaisille biosensorisovelluksille sekä toimia samalla biosensorisovellusten kehittämisen käytännöllisenä opetusvälineenä. Mittalaite suunniteltiin yhteensopivaksi PrinLabin (Painettavien antureiden kehityslaboratorio) suunnittelemien sensoreiden kanssa. Kehitystyössä toteutettu nk. Sara-prototyyppi kehitettiin ja testattiin tältä pohjalta OAMK:n tiloissa (HYTKE ja PrinLab).

Prototyypin alustaksi valittiin hinnan ja saatavuuden takia Arduino (mikrokontrolleri-elektroniikka-alusta ja ohjelmointiympäristö), jonka avulla erilaisia komponentteja pystyttiin helposti testaamaan ja niiden kanssa voitiin kommunikoida. Prototyyppiin valittiin potentiostaatti (LMP91000), jonka avulla saatiin biosensorin pinnalla tapahtuva kemiallinen reaktio muutettua jännitteeksi, sekä AD-muunnin (ADS1100), joka puolestaan muuntaa potentiostaatilta saatavan jännitteen digitaaliseen muotoon. Arduinon avulla voitiin hallita ja lukea näitä komponentteja. Arduinon avulla kytkentään saatiin käyttöjännite, I²C-yhteys sekä sarjaporttisyhteys tietokoneelle USB-väylän avulla.

Prototyypille suunniteltiin alustavasti myös Eagle-piirisuunnitteluohjelmalla sopiva piirilevy, joka sopii suoraan Arduino-alustan päälle. Tätä piirilevyä ei opinnäytetyön aikana saatu täysin valmiiksi. Laadittujen suunnitelmien pohjalta tehdystä toteutuksesta on jatkossa helppo rakentaa toimiva piirilevykokonaisuus, jota voidaan käyttää suunniteltuun tarkoitukseen.

Asiasanat: biosensori, potentiostaatti, mittalaite

ALKULAUSE

Haluan kiittää Manne Hannulaa ja HYTKE:tä, joka esitteli idean mittalaitteen rakentamiseksi. Tämä idean avulla teimme kahden vuoden aikana toimivan prototyypin, jonka pohjalta tämä opinnäytetyö sai alkunsa. Haluan kiittää myös Jukka Jauhiaista, joka toimi opinnäytetyöni ohjaajana, sekä Tuula Hopeavuorta, joka auttoi kieliopin ja rakenteen kanssa.

Kiitokset myös OAMK:n opettajille sekä henkilökunnalla, jotka toimivat prototyypin kehityksen tukena, erityisesti Henry Hinkula, joka oli mukana koko projektin ajan, sekä myös Timo Matalalampi, joka oli mukana kehityksen alkuvaiheissa.

Kiitän myös kaikkia opiskelijoita, jotka olivat mukana ja tekivät suuren työn projektin eri osa-alueilla. Ilman tätä panosta prototyyppi tuskin olisi nyt tässä pisteessä.

Kiitän myös tukea kotona, jota ilman tämä opinnäytetyö ei olisi valmistunut.

Oulussa 10.8.2015

Jaakko Korva

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	12
2 POTENTIOSTAATTI	14
2.1 Potentiostaatin toiminta	14
2.2 Amperometria	16
2.3 LMP91000-piirin toiminta	17
2.4 I ² C	18
2.5 Rekisterit	19
2.5.1 Lukitus	20
2.5.2 TIACN	20
2.5.3 REFCN	21
2.5.4 MODECN	22
2.5.5 Kommukointi	23
3 A/D-MUUNNIN	25
3.1 Teoria	25
3.2 Toiminta	26
3.3 Ohjelmointi	28
4 KYTKENTÄ JA PIIRILEVY	29
5 TESTAUS JA TULOKSET	35
6 YHTEENVETO	37
LÄHTEET	39
LIITTEET	41

SANASTO

ACK	Signaali joka välitetään kahden laitteen välillä. Lyhenne sanalle "Acknowledgement". Kertoo signaalin tulleen perille ja ymmärrettävissä vastaanottavalla laitteella.
A/D-muunnin	Analogia–digitaalimuunnin on elektroniikan komponentti, joka muuntaa analogisen arvon (jännite) digitaaliseksi luvuksi. Tässä työssä käytettiin ADS1100 muunninta. (1.)
Amperogrammi	Amperometrillä mittaustulosta kuvaava diagrammi, jossa x –akselilla on aika ja y-akselilla mitattu virta (ampeeri).
Amperometrinen mittaus	Biosensorissa pidetään työ– ja vertailuelektrodin välinen potentiaali vakiona, jolloin vastaelektrodilta saatu virta-arvoa tarkastellaan ajan suhteen. Tämä mittaus kuvataan amperogrammin avulla. (2.)
Anodi	Elektrolyyttisessä kytkennässä se elektrodi, jossa tapahtuu hapettumisreaktio. Tämä elektrodi on se, jonne negatiiviset ionit virtaavat, kun kennoon kytketään jännite. (3.)
Arduino	Arduino on avoimeen lähdekoodiin perustuva elektroniikka– ja ohjelmointialusta. Arduinosta on saatavilla useita erilaisia alustoja, jotka kaikki kuitenkin perustuvat Atmelin AVR-mikrokontrollereihin. Arduinon ohjelmointi tapahtuu Arduino Alpha–ohjelmalla, jonka avulla kirjoitettu koodi muutetaan C/C++ kielelle. (4.)

Biosensori	Biosensorit ovat antureita, jotka reagoivat tutkittavaan analyttiin. Siihen kuuluu biologinen komponentti sekä elektrokemiallinen osa, joka muuttaa hapettumis-pelkistymisreaktiossa syntyvän elektronien liikkeen mitattavaksi virraksi. (5.)
C/C++	C++ on yleisimpiä käytettyjä ohjelmointikieliä ja se on kehitetty C-kielen pohjalta niin, että siihen on lisätty uusia ominaisuuksia. Sitä käytetään yksinkertaisessa elektroniikassa sekä kokonaisten käyttöjärjestelmien ohjelmoinnissa.
EEPROM	Haihtumaton puolijohdemuisti, joka voidaan uudelleen kirjoittaa. Sitä käytetään tallentamaan mikroprosessorien ja –kontrollereiden asetustietojen tallennukseen. Tallennetut tiedot eivät katoa, käyttöjännite muistipiirillä katkaistaan. (6.)
Elektrodipotentiali	Sähkömotorinen voima, joka syntyy sähkökemiallisen kennon sisälle. Potentialin tunnus on E ja yksikkö voltti. Potentiali mitataan työ- ja vertailuelektrodin väliltä, jonka vuoksi tarvitaan kolmas elektrodi, vastaelektrodi, jonka avulla virta voidaan mitata. (7.)
Hapettumisreaktio	Reaktio, jossa tapahtuu elektronien siirtymistä pelkistyvälle aineelle. Samalla myös hapettumisluku kasvaa.

Ioni	Sähköisesti varautunut atomi tai molekyyli. Kun sähköisesti neutraalin atomin elektroniverkko luovuttaa tai vastaanottaa elektronin, muuttuu se joko positiiviseksi tai negatiiviseksi ioniksi.
I ² C-väylä	Yksinkertainen, sarjamuotoinen ja 8-bittinen kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä. Väylään kuuluu kello- sekä datalinja. Käytetään mikropiirien väliseen kommunikointiin. (8.)
Katodi	Sähkökemiallisen kennon elektrodi, jossa tapahtuu pelkistyminen. Katodi ottaa siis vastaan elektrodeja hapettavalta aineelta.
Kellotaajuus	Kellotaajuuden määrää prosessorin kellopiiri, joka tuottaa kellosignaalia. Kellosignaali tahdistaa mikropiirit sisäisesti ja ulkoisesti toisiinsa. Kellotaajuus ilmaistaan hertseinä, joka kuvastaa tilanvaihdosten määrää, joka suorittemella tapahtuu yhden sekunnin aikana. (9.)
Mooli	SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö, joka ilmaisee ainemäärän, tunnus n . Yksi mooli ainetta sisältää aineen perushiukkasia niin monta kuin tasan 12 g:n näytteessä hiili-12-isotoopissa on atomeita. Aineen hiukkasilla tarkoitetaan atomeja, molekyyliä, ioneita, elektroneja tai muita aineen perusosaa tai hiukkasryhmää. (10.)

NACK	Vastakohta ACK:lle. Signaali laitteiden välillä, jolla kerrotaan, että lähetetty signaali ei ole tullut perille tai on virheellinen.
Pelkistymisreaktio	Kemiallinen reaktio, jossa vastaanotetaan negatiivisesti varautuneita elektroneja. Hapetusluku pienenee.
Potentiostaatti	Elektroninen komponentti, jolla hallitaan elektrodien välisiä jännitteitä. Sen avulla voidaan pitää yllä tasainen jännite työ- ja vertailuelektrodin välillä, jolloin voidaan suorittaa amperometrinen mittaus vastaelektrodin kautta. (11.)
Pulssinleveysmodulaatio	Modulaatiotapa, jolla helpotetaan tiedon siirtoa tai tallennusta. Mitä kauemmin pulssi on päällä, sitä suurempi on kuormalle tuleva teho. (12.)
Serial-monitori	Tiedonsiirto tietokoneen ja Arduinon välillä tapahtuu USB-väylän avulla. Arduinon serial monitori-sovelluksen avulla voidaan lukea ja kirjoittaa dataa, joka siirtyy laitteiden välillä.
Signaalikohinasuhde	Sähkötekniikan käsite, joka tarkoittaa järjestelmässä esiintyvän hyötysignaalin ja kohinasignaalin tehojen suhdetta. Mitä suurempi signaalikohinasuhde on, sitä paremmin signaali erottuu kohinasta. (13.)
SRAM	Staattinen muistityyppi, jonka kiikkupiiri vaatii jatkuvan jännitteen, jottei menetä siihen tallennettua tietoa. On nopea muistityyppi, koska data voidaan lukea ulosmenolinjalta ilman erityistoimenpiteitä. (14.)

Steady state -tila	Amperometrisen mittauksen tila, jossa kemiallinen reaktio on saavuttanut tasapainon ja virta-arvo ei enää merkittävästi muutu.
Transimpedanssivahvistin	Analogiaelektroniiikan komponentti, jota käytetään esim. vahvistimena ja suodattimena. Siihen kuuluu kaksi tuloa ja yksi lähtö. Vahvistin toimii avoimen silmukan periaatteella, mutta siihen on lisätty takaisinkytkentä tulokytkenään, jolloin vahvistuksen määrä voidaan valita halutuksi sopivalla vastuksella takaisinkytkennässä. (15.)
Työelektrodi	Työelektrodilla tapahtuu se reaktio, joka amperometrisessä mittauksessa halutaan mitata. Mittauksen aikana jännitepotentiaali pidetään vakiona työelektrodin ja vertailuelektrodin kanssa. (5.)
USB-sarjaväylä	Fyysinen liitäntä tietokoneen ja oheislaitteiden välillä (Arduino). Toimii kaksisuuntaisesti ja sen avulla voidaan myös syöttää käyttöjännite liitetyille laitteille.
Vastaelektrodi	Biosensorissa tapahtuvan kemiallisen reaktion aiheuttaman sähkömotorisen voima mitataan vastaelektrodin läpi kulkevana virtana. (5.)
Vertailuelektrodi	Työelektrodin kanssa toimiva pari, joiden välinen jännite pidetään vakiona. Koska virta ei saa kulkea vertailuelektrodin läpi, niin tarvitaan erillinen vastaelektrodi työ- ja

vertailuelektrodin välisen reaktion
aiheuttaman virran mittaamiseen. (5.)

1 JOHDANTO

Painettava elektroniikka luo tänä päivänä paljon uusia mahdollisuuksia alhaisten tuotantokustannusten avulla. Tämä mahdollistaa uudenlaisten laitteiden ja sovellusten kehittämisen, jotka pohjautuvat massavalmistettuihin sensoreihin. Tässä opinnäytetyössä kehitetty niin kutsutun Sara-prototyypin tarkoitus on auttaa kehittämään olemassa olevia sovelluksia, esimerkiksi verensokerimittausta, muuttamalla sen noninvasiiviseksi, sekä luomaan uusia sovelluksia, esimerkiksi laktaatin reaaliaikainen mittaus.

Opinnäytetyössä kehitetty mittalaitteen rakentaminen alkoi 2013. Manne Hannulla antoi minulle muutaman kappaleen painettuja sensoreita ja hän pyysi kehittämään laitteen, jolla pystyimme seuraamaan sensoreiden pinnalla tapahtuvaa reaktiota. Tehtävänäni oli johtaa opiskelijavoimin mittalaitteen kehitystä sekä pyrkiä saavuttamaan toimiva kokonaisuus, jota voitaisiin hyödyntää mahdollisimman laajasti.

Sara-prototyypin tarkoitus on helpottaa erilaisten biosensorisovellusten kehittämistä. Sen tulisi myös soveltua koulutustarkoitukseen olemalla tarpeeksi helppokäyttöinen. Edulliset valmistuskulut alentavat kynnystä testata omia innovaatioita ja näin ollen se soveltuu hyvin myös opetuskäyttöön.

Arduinon päälle asettava piirilevy oli paras ratkaisu. Sen avulla saatiin kaikki tarvittavat ominaisuudet yhdessä paketissa. Arduinon avulla voitiin ohjelmoida piirilevyllä oleva potentiostaatti ja A/D-muunnin I²C-väylän avulla. Arduinon avulla saadaan myös käyttäjännite kytkentään. Arduinon avulla voidaan lukea A/D-muuntajalta tuleva data, jonka analysointi tapahtuu helposti tietokoneella Excelin tai Matlabin avulla. Suunnittelimme piirilevyn sopimaan vain Arduino Mega 2560 -alustalle kanssa. Mikäli piirilevy halutaan saada toimimaan muilla alustoille, tulee niiden erilaiset fyysiset ominaisuudet ottaa huomioon .

Potentiostaatin valinta ja sen toimintaan saattaminen oli tärkein vaihe.

Vaihtoehtoja valmiiksi potentiostaattipiiriksi ei ollut montaa . Texas Instrumentsin piiri LMP91000 vakiintui hyvin pian Saraan sydämeiksi.

Potentiostaatti ohjelmoitiin Arduinon avulla, joka tarkoitti I²C-väylän avulla sen

muistirekistereiden muokkaamista, jolloin sen toiminta saatiin sopivaksi. Aluksi sensorilta saatu jännite luettiin Arduinon omalla 10-bittisellä A/D-muuntajalla, mutta sen tarkkuus ei ollut riittävä. Tämän vuoksi kytkentään otettiin mukaan erillinen A/D-muunnin.

A/D-muuntimeksi valikoitui lopulta ADS1100, joka on toimintaperiaatteeltaan 16-bittinen, joka tarkkuutena oli riittävä. Näin saimme ohitettua Arduinon oman AD-muuntimen, joka myös tarkoitti sitä, että data piti lukea I²C-väylän avulla.

Arduinon avulla tämä onnistui helposti ja datan tallettaminen tietokoneelle oli helppoa joko suoraan Arduinon oman Serial Monitorin kautta tai Putty-ohjelman avulla. Datan tallennus ei kuitenkaan ole osa tätä työtä, joten se sivuutetaan.

Opinnäytetyöni tarkoitus oli selvittää prototyypissä tarvittavat piirit, niiden toiminta ja lopulta tehdä niistä toimiva kytkentä, jolla pystyimme biosensoreiden avulla tutkimaan mitattavia näytteitä.

2 POTENTIOSTAATTI

Sähkökemiallinen tapa molekyylikonsentraation mittaukseen vaatii vähintään kahden elektrodin muodostaman kennon. Näillä elektrodeilla tapahtuu hapettumis- tai pelkistymisreaktio. Potentiostaatti pitää työ- ja vertailuelektrodin välisen jännitteen tasaisena. Tämän jännitteen avulla myös vahvistetaan kemiallista reaktiota. Jotta sähkökemiallista reaktiota voidaan mitata tarvitaan kolmas elektrodi (vastaelektrodi), jonka avulla voidaan mitata saatavaa sähkövirtaa, joka muutetaan transimpedanssivahvistimen avulla jännitteeksi. Transimpedanssivahvistimessa olevan vastuksen arvoa muuttamalla saadaan halutun tasoinen jännite. Tähän voidaan kytkeä ulkoinen vastus tai käyttää sisäisiä vastuksia. (11.)

Sensorin pinnalla tapahtuva reaktio on hapettumis- tai pelkistymisreaktio, jossa vapautuvat ionit aiheuttavat sähkövirran syntymisen. Kemiallisen reaktion voimakkuus on suoraan verrannollinen tutkittavan kohteen ainepitoisuuteen. Mitä suurempi moolimäärä tutkittavassa kohteessa on, sitä suurempi virta voidaan lukea vastaelektrodilta. Testeissä käytettiin tutkittavan aineena kaliumferrosyanidia, ja sensorit reagoivat nesteessä olleeseen raudan määrään. Mitä enemmän tutkittavassa kohteessa on rautaa, sitä vahvempi reaktio sekä vastaelektrodilta saatu sähkövirta. (5.)

Potentiostaatilta saatava jännite voidaan laskennallisesti muuttaa vastaamaan tiettyä ainepitoisuusmäärää, jolloin steady state -tilassa oleva jännite vastaa tietyn suuruista moolimäärää. Prototyypin toiminta perustuukin siihen, että se kalibroidaan ensin tunnetun ainepitoisuuden omaavan nesteen avulla.

Prototyypissä käytetty potentiostaatti eli LMP91000-mikropiiri on todella monipuolinen ja sen ohjelmoitavuus vastaa täysin tarpeita. Sen energiakulutus on pieni, joten se soveltuu myös kannettaviin laitteisiin.

2.1 Potentiostaatin toiminta

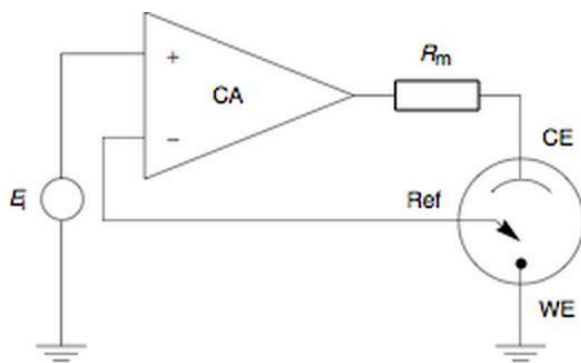
Potentiostaatti kontrolloi sähköistä potentiaalia mittauskennossa tutkimalla sen vastusta. Vastuksen kasvaessa virta pienenee ja vastuksen laskiessa virran

määrä nousee, jotta jännite pysyy vakiona. Kaavalla 1 muunnetaan potentiostaatilta saatava jännite virraksi. (16.)

$$I_o = \frac{E_c}{R_v}$$

KAAVA 1

I_o on potentiostaatin virta, joka muuttuu potentiostaatissa. E_c on jännite, joka pidetään vakiona säätämällä virtaa sen mukaan miten, vastuksen määrä R_v muuttuu. Kaava on johdettu Ohmin laista. Kuvassa 1 on esimerkkikytkentä potentiostaatista.(16.)



KUVA 1. Potentiostaattikytkentä (11.)

Kun asetetaan tutkittava liuos johtavan elektrodin päälle, syntyy näiden välille elektrodipotentiaaliero (puolikennotentiaaliero). Tätä potentiaalieroa ei voida mitata suoraan, joten tarvitaan toinen elektrodi, jolloin voidaan mitata näiden kahden elektrodin välistä puolikennotentiaalieroa (7). Eri materiaaleille on määritetty standardipotentiaali, joka on saatu vertaamalla niiden puolikennotentiaalialia vetyelektrodin potentiaaliin. Tätä hyödyntäen voidaan materiaalien potentiaali laskea standardiolosuhteista poikkeavissa olosuhteissa Nernstin yhtälön avulla , joka on esitelty kaavassa 2.(17, s. 4).

$$E = E^o + \frac{RT}{zF} \ln \frac{a_{Ox+}}{a_{Re}}$$

KAAVA 2

Tässä E^0 on elektrodin standardipotentiaali, R on kaasuvakio ja T on lämpötila (Kelvin). F on Faradayn vakio ja z elektrodimateriaalin valenssi. a_{Re} on pelkistyneen ja a_{Ox+} on hapettuneen muodon aktiivisuus (Reduced ja oxidized). Kun tutkittava neste asetetaan sensorin päälle, jossa on kaksi eri materiaalista valmistettua elektrodia, niiden välille muodostuu potentiaaliero, kennopotentiaali (17, s. 4). Kennopotentiaali on tutkittavan elektrolyyttiliuoksen ja elektrodien muodostama sähkökemiallinen kenno. Elektrodien materiaali ja tutkittava elektrolyytti määrittävät tasapainotilanteessa olevan potentiaalieron suuruuden. Sähkökemiallisessa kennossa tapahtuva molekyylien hapettumisesta syntyvä virta on tietyissä oloissa suoraan verrannollinen molekyylin konsentraatioon.(7).

2.2 Amperometria

Sara-prototyypissä käytimme amperometristä mittausta, jossa jännite pidetään vakiona ajan suhteen. Jännite tulee olla sellaisella tasolla, että seurattava analyytti hapettuu elektrodin pinnalla. Amperometrisestä mittauksesta saadaan johdettua amperogrammikuvaaja, jossa aika on x-akselilla ja vastaelektrodilta mitattu virta arvo on y-akselilla. (2).

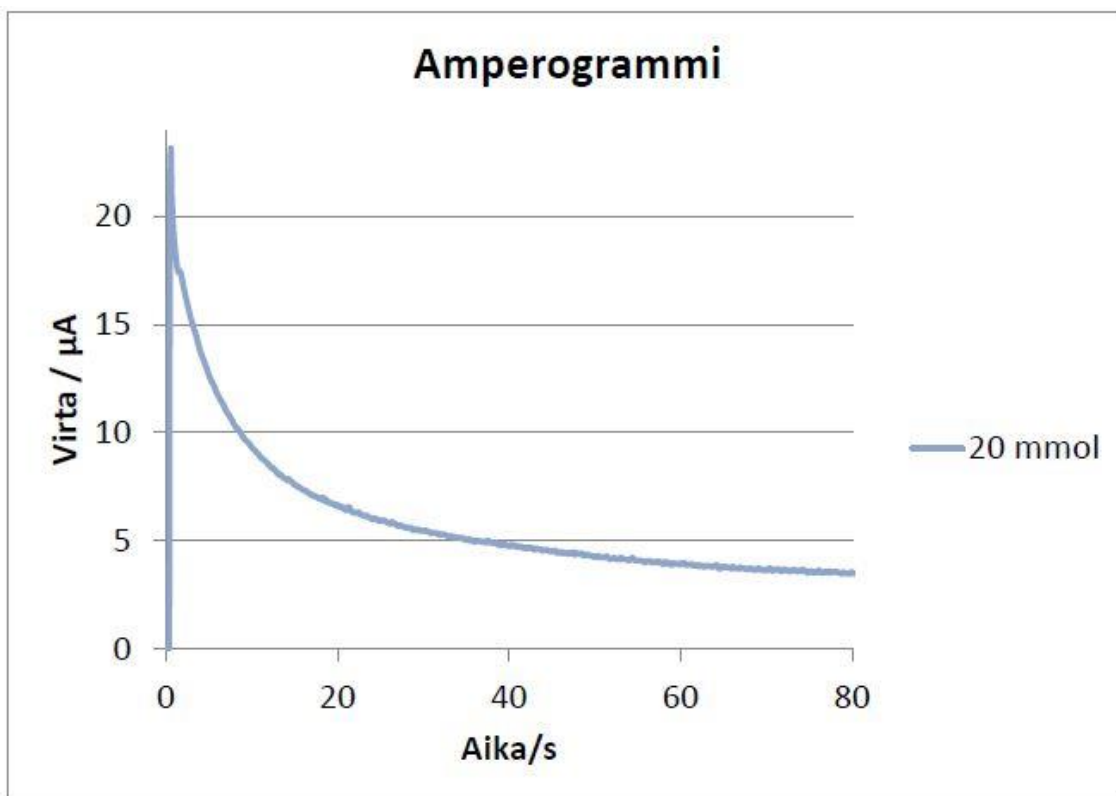
Kuvassa 2 on käytettyjen sensorien malliesimerkki. Vaikka sensorit eivät ulospäin näytä samalta kuuluu niihin kaikkiin samat fyysiset osat.



KUVA 2. Biosensori

Kuvassa 3 on esimerkki millaiselta amperogrammikuvaaja näyttää, kun kyseinen mittaus on tehty nesteelle, jossa kaliumferrosyanidin määrä on 20

mmol ja y-akselilla nähdään siis sähkökemiallisen reaktion voimakkuus ajan suhteen. Kuvassa oleva mittaus on tehty Sara prototyypillä. Koska kemiallinen reaktio on alussa hyvin voimakas ja tasoittuu mittauksen edetessä, käytettiin vertailuissa vain tätä ns. steady-state tilaa, jossa reaktio on tasoittunut. Laskimme virrasta 5 sekunnin keskiarvon 60–65 sekunnin väliltä. Käytimme tarkoituksella samaa ajanjaksoa kuin PrinLabissa, jotta voisimme verrata tuloksia helpommin keskenään. Kuvasta 3 on myös havaittavissa mittauksen virta-arvon tasoittuminen.

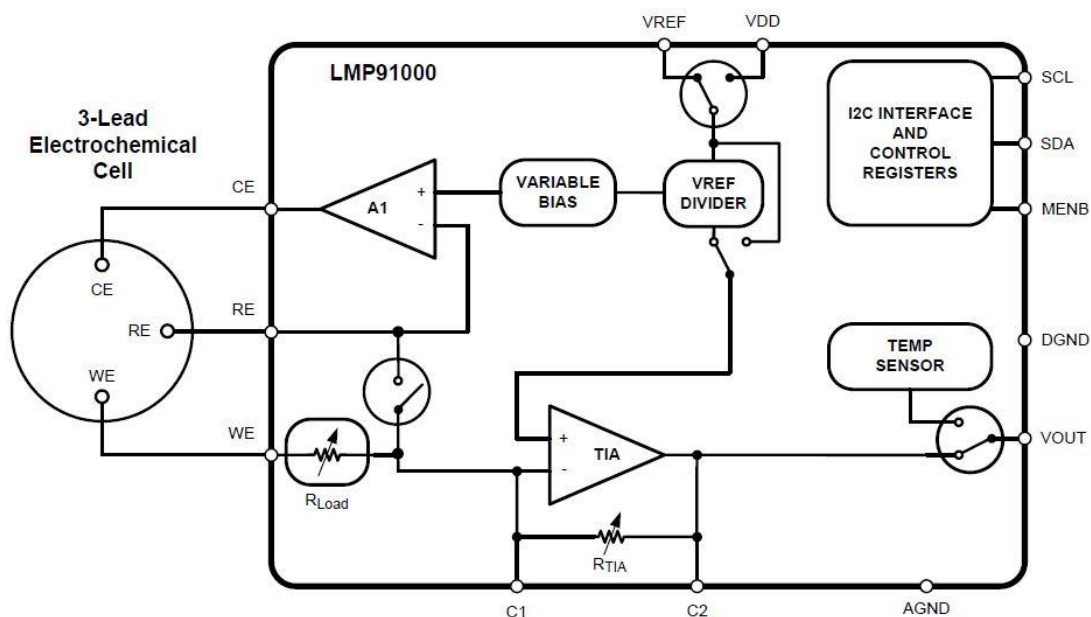


KUVA 3. Amperogrammikuvaaja esimerkki

2.3 LMP91000-piirin toiminta

Prototyypissä käytetty LMP91000-piiri pitää sisällään potentiostaattikytkennän sekä joukon muita käyttöä helpottavia ominaisuuksia ja optioita. Piiristä ei kuitenkaan testattu työn aikana muita toimintoja kuin tarvittava 3-jalkainen amperometrinen kennotoimintatila (3-Lead amperometric cell)

Kuvassa 4 näkyy LMP91000-piirin kytkentäkaavio ja siihen liitettävät ulos- ja sisäänmenot. VREF ja C1 ja C2 eivät ole kytkennässä käytössä, koska nämä ominaisuudet saadaan myös sisäisen kytkennän avulla käyttöön. Piiriin oli kytkennän aikana liitetty biosensori, joka oli kytketty CE (Counter electrode)-, RE (Reference electrode)- ja WE (Working electrode)-jalkoihin. Counter electrode on vastaelektrodi, Reference electrode on vertailuelektrodi ja Working electrode on työelektrodi. VOUT pinnin kautta saadaan mitattua sähkökemiallisen reaktion virta-arvo operaatiovahvistimen avulla, jolloin mitattava suure muuttuu jännitteeksi. SCL (Serial Clock Line), SDA (Serial Data Line) ja MENB (Module enable) ovat I²C-väylän liitännöitä. Käyttöjännite kytketään VDD-pinniin ja sen tulee olla välillä 2,7 V – 5,25 V. LMP91000-piiri soveltuu pienen koon puolesta myös kannettaviin sovelluksiin, sillä 14-pinninen WSON-tyyppinen kotelo on vain 4 x 4 mm.



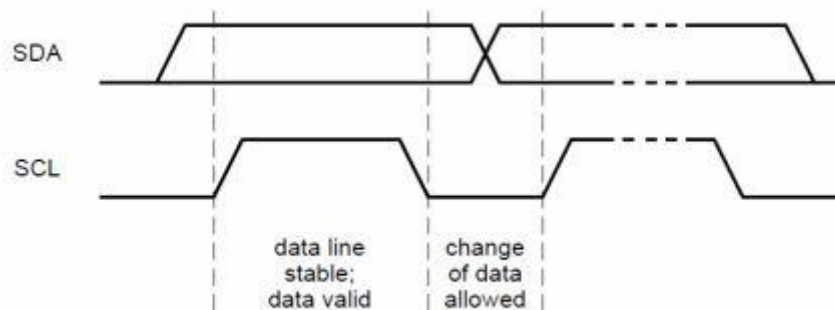
KUVA 4. LMP91000-piirin kytkentäkaavio (18,s. 12)

2.4 I²C

I²C on kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä. Tässä väylässä on data- ja kellolinja, sekä jokaisella laitteella on väylässä oma yksilöivä osoite. Laitteet toimivat väylässä isäntä-orjaperiaatteella. (8).

Väylä perustuu kahden signaalin siirtoon. Toinen on kellopulssi (SCL) ja toinen datan (SDA) siirtoa varten. Logiikkajännite on kytketty Arduinin jännitelähteeseen (5 voltia), ja kummallakin väylällä on ylösvetovastus, joka pitää signaalin "1" –tilassa. Koska I²C-väylän lähdöt ovat avokollektorityyppisiä (open drain), tulee ne liittää sen vuoksi positiiviseen jännitteeseen ylösvetovastusten avulla.(8.)

Data siirretään kellopulssien avulla, niin että kun kellopulssi saa arvon "1" sen aikana siirtyy data linjan arvo "1" tai "0". Datan täytyy olla muuttumaton tuon kellopulssin aikana. Kuvassa 5 on graafisesti esitelty datalinjan toimintaa.



KUVA 5. Datalinjan toiminta (19.)

2.5 Rekisterit

Rekistereiden avulla ohjataan piirin toimintaa. Näitä rekistereitä ohjataan I²C väylän avulla ja ne joudutaan kirjoittamaan piirille uudestaan jokaisen käynnistyksen yhteydessä, koska tiedot niissä palautuvat vakioksi kun käyttöjännite katkaistaan. Rekistereille on etukäteen määritelty käytettävät toiminnot ja niillä on omat arvot, jonka kirjoittamalla rekisteriin kyseinen toiminta aktivoituu.

Rekistereiden muistit ovat haihtuvia (SRAM), joten käyttöjännitteen katkaisun yhteydessä ne menettävät muutetut arvot ja palaavat alkuperäiseen tilaansa. Tämän vuoksi ne rekisterit joihin joudutaan tekemään muutoksia kirjoitetaan uudelleen jokaisen käytön aloituksen yhteydessä.

LMP91000 on piirin ohjaukseen varattuja rekistereitä, sekä varattuja rekistereitä, joissa on piirin toiminnan kannalta oleelliset arvot joita ei voi muuttaa. Potentiostaatin toiminta määräytyy rekistereiden mukaan, joten niiden muuttaminen on pakollista.

Tarvittavat rekisterit ovat LOCK, TIACN, REFCN, ja MODECN, niiden osoitteet näkyvät kuvassa 6.

Address	Name	Power on default	Access	Lockable?
0x00	STATUS	0x00	Read only	N
0x01	LOCK	0x01	R/W	N
0x02 through 0x09	RESERVED			
0x10	TIACN	0x03	R/W	Y
0x11	REFCN	0x20	R/W	Y
0x12	MODECN	0x00	R/W	N
0x13 through 0xFF	RESERVED			

KUVA 6. LMP91000 rekisterit (18, s. 16.)

2.5.1 Lukitus

Jokaiselle rekisterille on määritetty osoitteet. Tässä tapauksessa 0x-alkuinen merkintä tarkoittaa heksalukua, jonka avulla rekisterin osoite on ilmoitettu. Jotta piirin rekistereiden arvoja voidaan muuttaa, tulee piirin lukitus avata LOCK rekisteristä. Tämä poistaa kirjoitussuojan TIACN ja REFCN rekistereistä.

Lukitusrekisterissä on bitit 0–7, joista 1–7 on varattuja. Kun alin bitti muutetaan 1:stä arvoon 0 avautuvat TIACN- ja REFCN-rekisterit. Rekisterin vakioarvo on 1, joten tämä joudutaan tekemään jokaisen uudelleen käynnistyksen jälkeen.

2.5.2 TIACN

TIACN –rekisterin (kuva 7) avulla voidaan muuttaa transimpedanssivahvistimen vastusarvoa, tai määritellä käytettäväksi ulkoista vastusta. Sisäistä vastusta (TIA_GAIN) käytettäessä tietylle rekisterin arvolla saadaan tietty vastus käyttöön. Kun käytetään ulkoista vastusta (RLOAD), käyttäjä voi määritellä itse haluamansa vastuksen, jonka liittää osaksi kytkentää.

Kuvasta 7 nähdään millä rekisterin arvolla saadaan haluttu tulos. RLOAD valinnalla voidaan muuttaa sensorin työelektrodin kanssa sarjassa olevan vastuksen arvoa.

Bit	Name	Function
[7:5]	RESERVED	RESERVED
[4:2]	TIA_GAIN	TIA feedback resistance selection 000 External resistance (default) 001 2.75k Ω 010 3.5k Ω 011 7k Ω 100 14k Ω 101 35k Ω 110 120k Ω 111 350k Ω
[1:0]	RLOAD	R _{load} selection 00 10 Ω 01 33 Ω 10 50 Ω 11 100 Ω (default)

KUVA 7. TIACN rekisteri (18, s. 17.)

2.5.3 REFCN

REFCN –rekisterin avulla määritellä vertailujännitteen toimintaa. Vaihtoehtona on ulkoinen ja sisäinen jännitelähde. Ulkoinen valinta määrittelee vertailujännitteen olevan sen jännitteen, joka on kiinnitetty piirin VREF pinniin. Kun ulkoinen jännite on valittu, sisäinen nollakohta (INT_Z) ja Bias-jännite ovat määriteltynä prosentteina VREF pinniin kiinnitetystä jännitteestä. Toisin kuin sisäistä jännitettä käytettynä nämä ovat osuudet käyttöjännitteestä. Kuvassa 8 on REFCN rekisterin kuvaus.

Bit	Name	Function
7	REF_SOURCE	Reference voltage source selection 0 Internal (default) 1 external
[6:5]	INT_Z	Internal zero selection (Percentage of the source reference) 00 20% 01 50% (default) 10 67% 11 Internal zero circuitry bypassed (only in O ₂ ground referred measurement)
4	BIAS_SIGN	Selection of the Bias polarity 0 Negative ($V_{WE} - V_{RE} < 0V$) (default) 1 Positive ($V_{WE} - V_{RE} > 0V$)

Bit	Name	Function
[3:0]	BIAS	BIAS selection (Percentage of the source reference) 0000 0% (default) 0001 1% 0010 2% 0011 4% 0100 6% 0101 8% 0110 10% 0111 12% 1000 14% 1001 16% 1010 18% 1011 20% 1100 22% 1101 24%

KUVA 8. REFCN rekisteri (18, s. 17–18.)

2.5.4 MODECN

MODECN –rekisteri määrää piirin toimintatavan. Sara –prototyyppiä varten muutimme OP_MODE:n 3 –elektrodin amperometriseen sensoriin.

FET_SHORT jätettiin disabled-tilaan. Kuvassa 9 on rekisterikaavio, jonka perusteella halutun toiminnan binääriluku voidaan selvittää ja kirjoittaa kyseiseen rekisteriin. Kuvassa 9 on rekisterin kuvaus ja siinä näkyvät myös muut piirin toimintatilat.

Bit	Name	Function
7	FET_SHORT	Shorting FET feature 0 Disabled (default) 1 Enabled
[6:3]	RESERVED	
[2:0]	OP_MODE	Mode of Operation selection 000 Deep Sleep (default) 001 2-lead ground referred galvanic cell 010 Standby 011 3-lead amperometric cell 110 Temperature measurement (TIA OFF) 111 Temperature measurement (TIA ON)

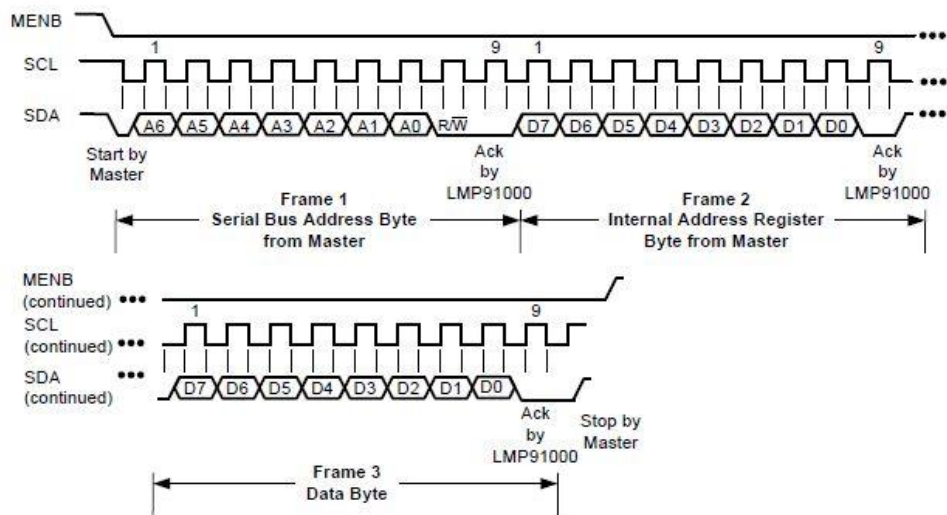
KUVA 9. MODECN-rekisteri (18, s. 18.)

Default toimintatila (OP:MODE) on "Deep Sleep", joka tarkoittaa sitä, että piirin toimintatapa pitää jokaisen käynnistyksen jälkeen muuttaa tähän rekisteriin.

2.5.5 Kommunikointi

LMP91000-piirin rekisterien kirjoittaminen tapahtuu Arduinon kautta. Ohjelmat joilla rekisterit ohjelmoidaan ja A/D-muuntimen arvot luetaan ovat liitteessä 1 - 4.

Kuvassa 10 näkyy bittitasolla, miten kommunikointi etenee LMP91000 piirin kanssa. Kuvassa mainittu "Master" on siis tässä tapauksessa Arduino. Kuvassa näkyy myös, miten SCL ja SDA vaikuttavat kommunikointiin. MENB on kytkettynä digitaaliseen maahan, jolloin sen toiminnasta ei tarvitse välittää.



KUVA 10. LMP9100-rekistereiden kirjoitus kaavio (18, s. 15.)

Kuvassa 11 on LMP9100 rekistereiden luku esitetty kaaviolla. Tässä nähdään, miten LMP91000 lähettää dataa vastaanottajalle (Master).

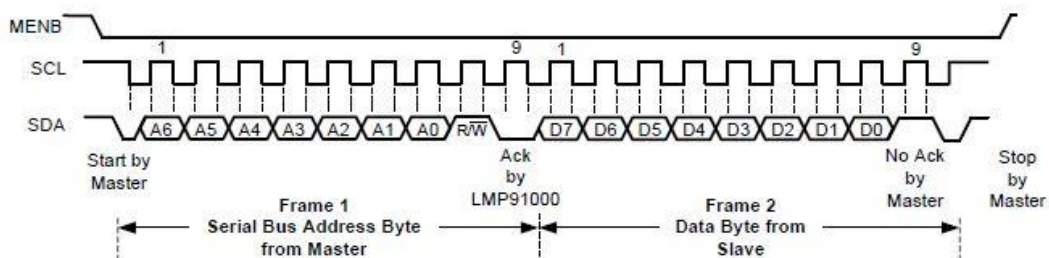


Figure 28. Register Read Transaction

KUVA 11. LMP9100 Rekistereiden luku kaavio (18, s. 16.)

3 A/D-MUUNNIN

3.1 Teoria

A/D-muunnin eli analogia-digitaalimuunnin on elektroniikan laite, joka muuntaa jatkuvaa analogista signaalia, tässä tapauksessa jännitettä, digitaalseksi lukuarvoksi. Digitaalisessa muodossa olevia arvoja on helpompi käsitellä tietokoneella. A/D-muuntimella on resoluutio, joka kertoo kuinka monella bitillä analoginen signaali muutetaan digitaalseksi. Esimerkiksi 16-bittinen muunnin käyttää muuntamiseen 65536 erilaista arvoa ($2^{16} = 65536$). (1.)

$$Q = \frac{E_{FSR}}{2^M}$$

KAAVA 3

$$E_{FSR} = V_{RefHi} - V_{RefLow}$$

KAAVA 4

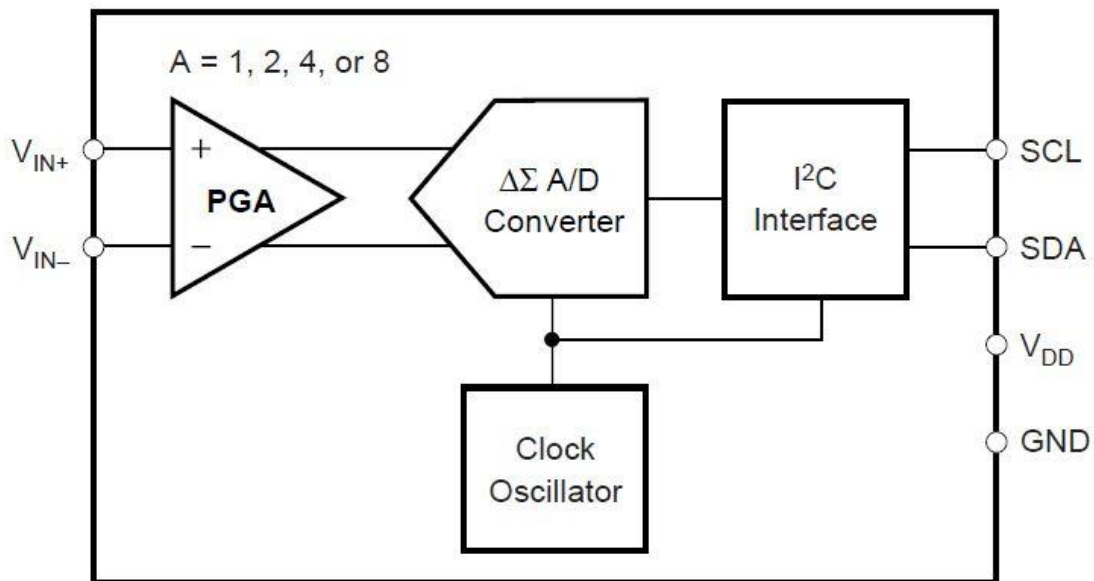
Kaava 3:n perusteella voidaan laskea A/D – muuntimen resoluutio, eli muunnokseen käytettävä jänniteresoluutio Q. M on muuntimen resoluutio bitteinä ja kaava 4:n avulla saadaan jänniteväli, jolla muunnos voi maksimissaan tapahtua. V_{RefHi} on suurin mahdollinen jännite arvo joka voidaan muuntaa, tässä tapauksessa potentiostaatilta saatava maksimi jännite, eli 5 voltia. V_{RefLow} on pienin mahdollinen jännite, joka on tässä tapauksessa 0 V. (1.)

Kaavoja 3 ja 4 käyttämällä on laskettu yhden bitin erottelukyky. $Q = \frac{5V-0V}{2^{16}} = 0,00001526$, eli 15,26 μV . Edelleen tästä voidaan laskea biosensorilla tapahtuvan reaktion virran määrä, ohmin lakia soveltaen, kun tiedetään potentiostaatin operaatiovahvistimen takaisinkytkennässä olevan vastuksen arvo. (1.)

3.2 Toiminta

A/D-muuntimen tehtävänä on tuoda lisätarkkuutta potentiostaatilta saatavaan jännitteeseen. 16-bittisen muuntajan avulla voidaan erotella toisistaan pienempiä arvoja, joka tarkoittaa suurempaa tarkkuutta. Aluksi käytimme Arduinon omaa 10-bittistä muuntajaa, mutta sen tarkkuuden rajat tulivat hyvin pian vastaan ja päätimme ottaa ulkoisen muuntajan käyttöön. Arduinon 10-bittinen muuntaja voisi riittää opiskelukäyttöön, mutta ulkoisen muuntimen pois jättäminen ei laske valmistuskuluja niin merkittävästi, että se kannattaa jättää pois.

Koska potentiostaatin ulostulosta saatava jännite on 0-5 voltin välillä, tuli muunnos tapahtua tällä välillä. Sarassa käytettiin aikaisemmin A/D muuntajaa joka toimi välillä 0-3,3 voltia (LTC2471), jolloin käytimme jännitteen jakajaa laskemaan ulostulojännitteen maksimiarvon sovetuvaksi tälle muuntajalle. Päädyimme kuitenkin yksinkertaisempaan muuntajaan, joka soveltuu paremmin potentiostaatilta saatavalle jännitteelle. Päätimme ottaa mahdollisimman yksinkertaisen laitteen, koska ainoat kriteerit muuntimelle olivat sopiva jänniteväli muunnettavalle jännitteelle, sekä tarpeeksi suuri resoluutio. Myös edellinen A/D-muunnin oli 16-bittinen (LTC2471), joten päätimme pysyä samassa 16-bitin resoluutiassa, koska katsoimme sen riittävän suureksi. Muuntimen nopeus ei ollut valintaa tehdessä tarpeellinen, koska näytteistystapahtui 10 Hz taajuudella, joka luokitellaan hitaaksi (alle 10 kHz). Mittauksissa käytetään vain yhtä kanavaa, joten muuntimeksi kelpaa hyvin edullinen perusmuunnin. ADS1100-piirissä on myös valintamahdollisuus signaalin muunnosnopeudelle (SPS, signal per second). Hitaimmalla mahdollisella saadaan tarkin tulos, jolloin muunnin käyttää kaikkia 16 bittiä muunnoksen tekemiseen. Tällöin muunnosnopeus on 8 Hz (8 SPS, samples per second). Mikäli halutaan nopeampi muunnosnopeus, hävitään muunnostarkkuudessa. Tämän vuoksi on hyvä pitää hitain mahdollinen muunnosnopeus, koska tutkittava aineen reaktion muutosnopeus on myöskin hidas (välillä 60 – 65 s). Kuvassa 12 on seitelty ADS1100-piirin kytkentäkaavio.

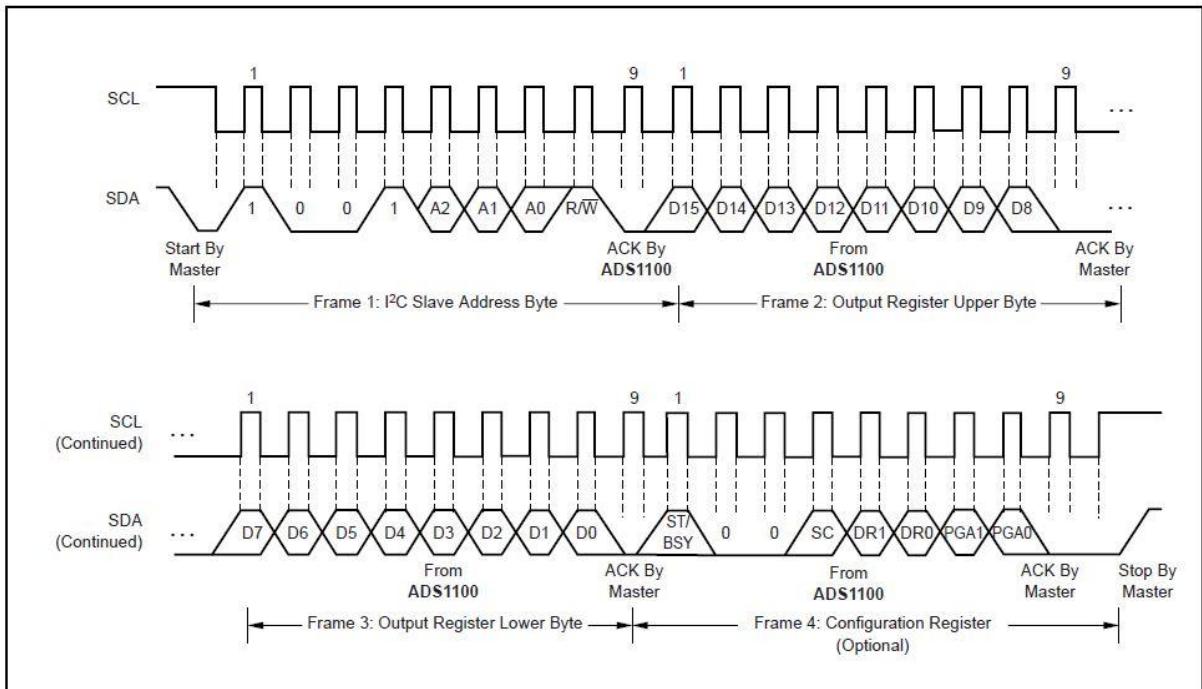


KUVA 12. ADS1100 Kytentäkaavio (20, s. 1.)

ADS1100 –piirissä on operaatiovahvistin (PGA), jolla voidaan vahvistaa muutettavan signaalin jännitettä, mutta tätä ei tarvita, joten se pidetään vakioarvossa, jolloin se ei vahvista. Halutessa sille voidaan asettaa vahvistuskertoimet (2, 4, 8). ADS1100:ssa on kaksi sisäänmenojännitettä V_{IN+} ja V_{IN-} . Muunnettava positiivinen jännite saadaan potentiostaatin ulostulosta. Negatiivinen jännite V_{IN-} toimii tässä tapauksena vertailujännitteenä, joka on kytketty maahan (0V), näiden kahden välinen jännite-ero muunnetaan digitaaliseen muotoon. Koska vertailukohtana on 0 V, kaikki potentiostaatilta saatava positiivinen jännite muunnetaan digitaaliseen muotoon. A/D-muuntimeen kytketään myös käyttöjännite V_{DD} (2,7V – 5,5V) ja maa GND. Muuntimelta saatavat arvot luetaan I²C-väylän avulla. Mikäli muuntimen toimintaparametreja halutaan muuttaa, tapahtuu sekin I²C-väylän avulla. Sara-prototyypin toimintaa varten muuntajan parametreja ei tarvitse muuttaa tehdasasetuksista poikkeaviksi.

3.3 Ohjelmointi

Kuvassa 13. on A/D-muuntimen ohjelmointia kuvastava diagrammi. Tämä on hyvin samankaltainen kuin kuvassa 9 näkyvä LMP9100 piirin ohjelmointidiagrammi. A/D-muunnin ohjelmoidaan samalla tavalla kuin potentiostaatti. Mikäli A/D-muuntimen toimintaa halutaan muuttaa, on sen rekistereiden arvoja mahdollista uudelleen ohjelmoida samalla tavalla kuin LMP9100 piirin rekistereitä. Koska tässä kytkennässä ADS1100 piiri toimii vakioarvoilla oikealla tavalla, en ota sitä käsittelyyn. ADS1100 datalehdestä löytyy kuitenkin ohjeet rekisterin arvojen muuttamiseen, mikäli sille on tarvetta



KUVA 13. ADS1100 –piirin luku diagrammi (20, s. 11.)

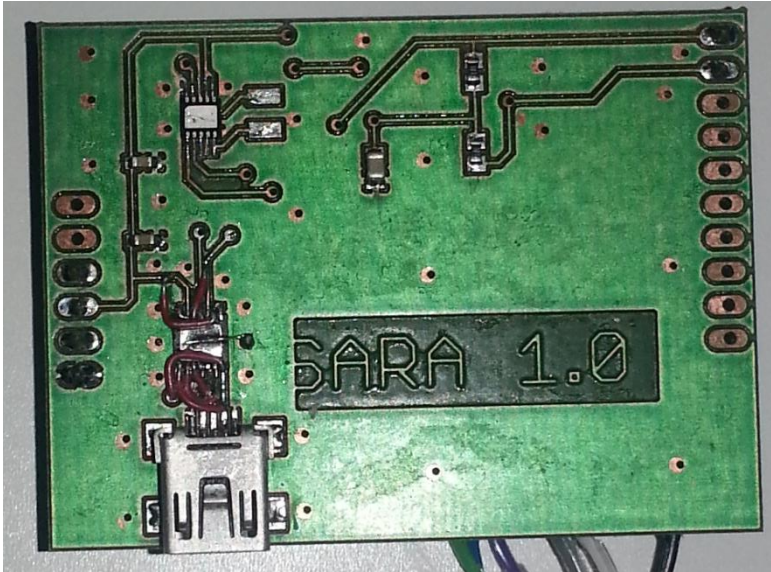
4 KYTKENTÄ JA PIIRILEVY

KytKentäkaavio on melko yksinkertainen, ja muita komponentteja LMP91000:n ja ADS1100:n lisäksi ovat kaksi ylösvetovastusta ja häiriönsuodatusta varten olevat kondensaattorit. Koska käytimme potentiostaattipiirin sisäistä vastusta, ei sille tarvinnut kytkeä ulkoista vastusta. Arduinosta saatiin käyttöjännite sekä maadoitus, kytKentäkaavio on kuvassa 15.

Eagle-ohjelmistolla suunniteltu piirilevy valmistettiin Oamk:n laitteistolla, ja siihen lisättiin tarvittavat komponentit. Piirilevyä ei kuitenkaan vielä ole saatu toimimaan. Epäilemme syyn olevan joko uunituksen aikana tapahtuneen piirien vahingoittumisen tai oikosulun syntymisen. Piirilevy on suunniteltu toimivan kytKentäkaavion pohjalta ja se on todettu toimivaksi kahdessa aikaisemmassa prototyypissä.

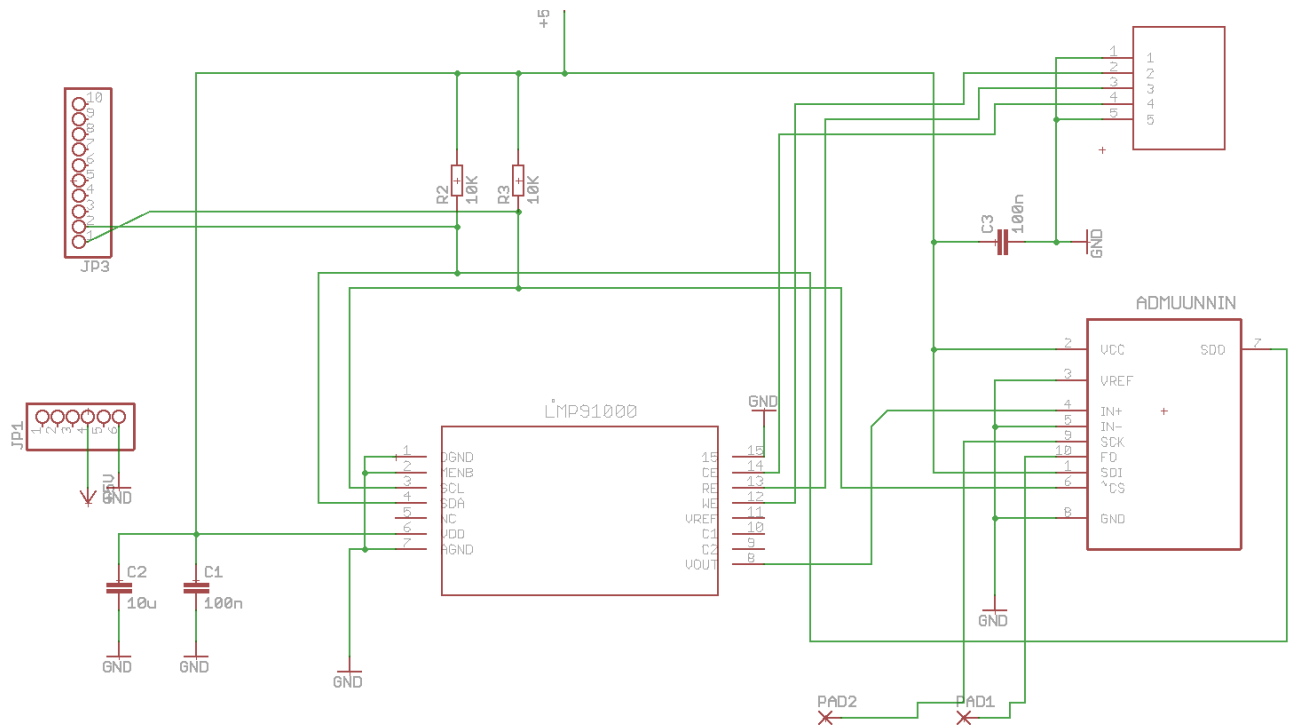
Piirilevy on suunniteltu niin, että herkät altapäinjuottuvat komponentit liitetään siihen uunitamalla, eli valmiin piirilevyn päälle juotoskohtiin lisätään juotospasta ja piirit asetetaan tämän päälle. Tämän jälkeen kokonaisuus asetetaan uuniin, jolloin pasta sulaa ja samalla muodostuu juotoskohta piirilevyn ja komponentin välille. Pastan toimii tietyssä lämpötilassa. Lämpötila on kriittinen, koska pastan sulamispiste tulee olla alhaisempi kuin piirin maksimi lämmön kesto. LMP91000 piirin lämmön kesto uunituksen aikana on suhteellisen matala, jolloin juottamisessa käytettävän pastan sulamislämpökin tulee tulla sopiva. Pastaa valitessa suosittelen käyttämään LMP9100 piirin maksimilämpökestoarvoja ohjeena (18, s. 2).

Piirilevyssä on lisäksi micro-USB-liitin, jonka avulla sensorille suunniteltu liitin kiinnitetään, sekä piirilevyn toisella puolella olevat pinnit, jotka painuvat suoraan oikeisiin Arduinon liittimiin. Myös Arduinon koodi on suunniteltu toimivaksi niin että käytetään tiettyjä pinnejä. Kuvassa 14 on huomattavissa, että sekä potentiostaatti että A/D-muunnin komponentit ovat piirilevyllä väärin päin. Tämä tehtiin sen vuoksi, koska epäilimme kytKentähäiriötä kyseisten komponenttien osalta. Yrityksistä huolimatta toimivaa kytKentää ei ole piirilevyllä saatu.



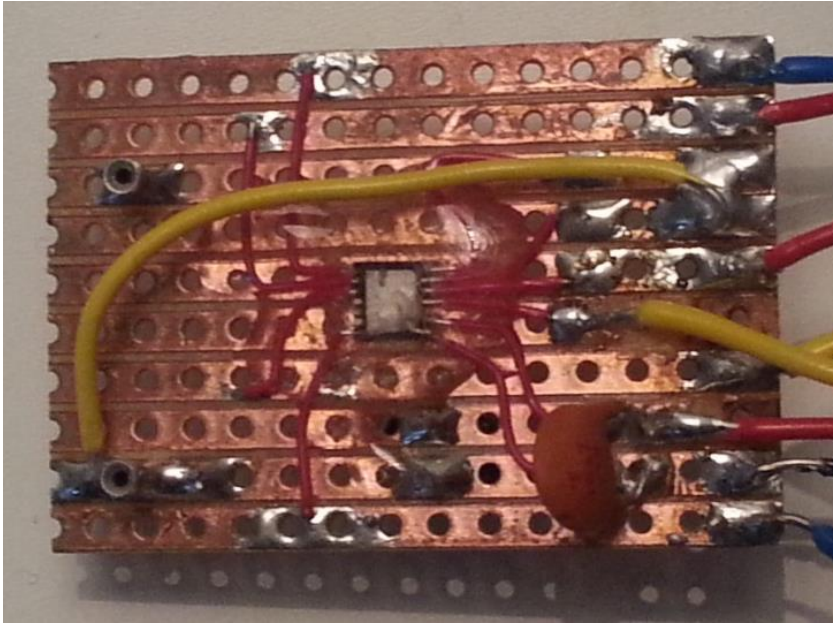
KUVA 14. Sara Piirilevy

Kytkentäkaavio näkyy kuvassa 15. Se on yksinkertainen malli toimivasta kytkennästä ja se on suunniteltu Eagle ohjelmalla, jolloin tuon mallin avulla saadaan suoraan oikeanlainen kytkentä tehtyä piirilevyn valmistusta varten. Suosittelisin kuitenkin, että piirilevyn piirrokset käydään vielä läpi ja tarkastetaan voidaanko estää uunituksen aikana mahdollisesti syntyvät oikosulut sekä vaihdetaan vanha LTC2480 muunnin yksinkertaisempaan ADS1100 piiriin.



KUVA 15. Sara-kytkentäkaavio

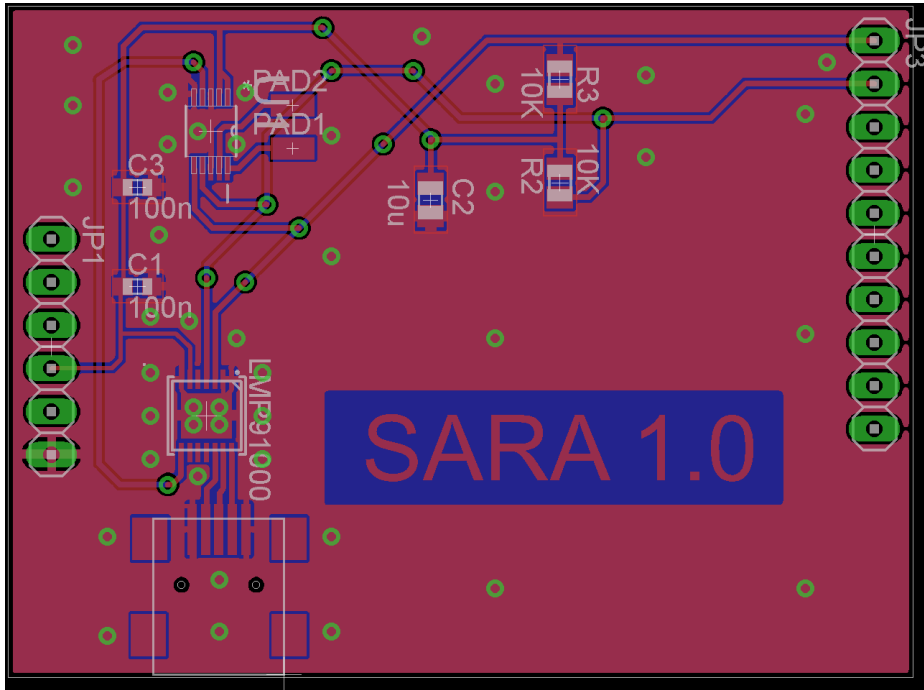
Kuvassa 15 näkyy kytkentä kokonaisuudessaan, joka kuvassa 14 olevalla piirilevyllä on. Sama kytkentä on myös kuvassa 16, jossa näkyy prototyypin toimiva kytkentä. Kuvassa 14 oleva piirilevy ei siis toimi ja siinä on käytetty aikaisempaa A/D-muunninpiiriä (LTC2480), joka on myös kuvan 14 kytkennässä.



KUVA 16. Potentiostaattikytkentä

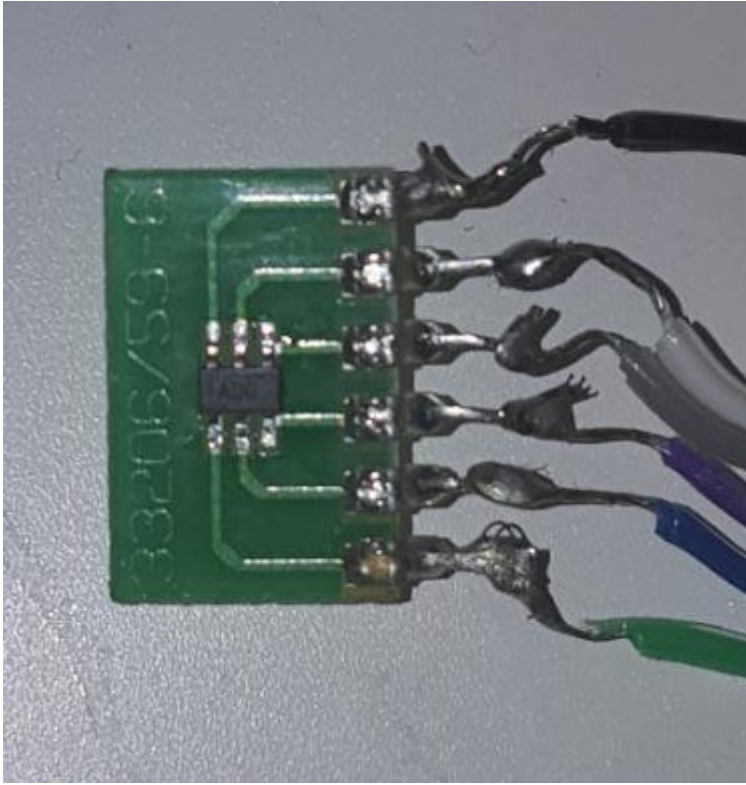
Kuvassa 15 on potentiostaatista toimiva kytkentä erillisellä testausalustalla. Tämän toimivan kytkennän pohjalta Eagle-ohjelmalla on suunniteltu kytkentäkaavio, sekä piirilevy. Johtimien avulla potentiostaattiin on liitetty sensori sekä A/D-muunnin (kuvassa 18). Myös Arduinon kytkentä on johtimien avulla toteutettu. Koska kytkentä on toteutettu huonosti suojatulla menetelmällä, ovat kaikki tällä potentiostaatilla suoritettut mittaukset vain suuntaa-antavia ja sen tarkoitus on ollut vain testata kytkennän toimintaa.

Kuvassa 17 on kuvan 15 kytkentä muutettuna todelliseen muotoon, jonka perusteella kuvan 14 piirilevy on valmistettu.



KUVA 17. Piirilevyn kytkentä

Kuvassa 18 on ADS1100-muunnin käsin juotettuna testausalustalle, josta johtimien avulla on yhteydet potentiostaattiin, sekä Arduinoon käyttöjännitettä, sekä Data –linjaa varten. Kotelorakenne ASD1100 soveltuu hyvin myös käsin juotettavaksi, joten sen vuoksi piiriä voidaan testata helposti myös erillään muusta kytkennästä.



KUVA 18. AD-muunnin

5 TESTAUS JA TULOKSET

Komponenttien toiminnan testaaminen suoritettiin aluksi testaamalla I²C-väylän avulla yhteys erikseen potentiostaattiin ja A/D-muuntimeen. Arduinon omassa Serial Monitorissa voitiin lähettää komponenteille koodi, jonka perusteella nähtiin esimerkiksi, missä osoitteessa I²C-väylässä on kytkettynä komponentti. Tämän koodin perusteella testatut komponentit vastasivat ja niiden kytkentä voitiin varmentaa. Tässä Arduinon Serial Monitorissa on myös virhetilanteiden varalta tietyt koodit, jotka kertovat, minkä vuoksi komponentti ei vastaa. Mikäli koodi lähetettiin onnistuneesti komponentille, endTransmission()-komento lukee Serial Monitorin kautta komponentilta, onnistuiko lähetys. Mikäli vastaus on 0, on lähetys mennyt onnistuneesti perille.

Ongelmatapauksessa komponentti vastaa numeron 1–4, jotka kaikki ovat virhetilanteita. Nämä virhetilanteet on tarkemmin kerrottu Arduinon Wire-kirjaston kuvauksessa (21).

Kun kaikki komponentit oli onnistuneesti saatu ohjelmoitua liitteissä 1–4 olevilla koodeilla, suoritimme prototyypillä erilaisia mittauksia, jolla pystyimme varmistamaan niiden oikean toiminnan. Koska samasta aiheesta aiemmin valmistunut Antti Portaankorvan opinnäytetyö (22.) keskittyi näihin mittauksiin, näitä tuloksia ei esitellä tässä työssä. Pääsimme kuitenkin haluttuun tulokseen ja varmistimme kaikkien piirien toiminnan.

Potentiostaatin toiminta on testattu ja mitattu ja sen tulokset ovat luettavissa Antti Portaankorvan opinnäytetyössä (22). Kytkentäkaavio on osoitettu myös toimivaksi ja sen pohjalta on mahdollista rakentaa toimiva piirilevykokonaisuus. A/D-muuntimen toiminta on testattu ja ASD1100-piiri on sopiva valinta potentiostaatin jännitteen muuntamiseksi digitaaliseksi.

Eagle-suunnitelma on kuitenkin vielä hieman kesken, koska uusinta ADS1100-piiriä ei ole liitetty vielä vanhan muuntimen tilalle sekä sen testaaminen piirilevyllä on tekemättä. Kokonaisuudessaan piirilevyn saattaminen toimintaan on tekemättä ja jää jatkokehityksen yhdeksi aiheeksi.

Oman työni tulokset näkyvät parhaiten siinä, että mittalaite, jonka eri osakomponenttien yhteensopivuus on varmennettu, saatiin valmiiksi ja prototyypillä on päästy tekemään käytännöllisiä mittauksia. Erilaisten piirien kanssa tehtiin huomattava määrä tutkimusta teorian ja käytännön osalta, jotta päästiin toimivaan kytkentään.

Yritimme myös saada piirilevyille juotettua versiota toimintaan, ja teimme sen kanssa useita tunteja työtä, vian koskaan paljastumatta. Tämä osio jäikin ainoaksi harmittavaksi takaiskuksi kahden vuoden uurastuksen aikana.

6 YHTEENVETO

Onnistuimme löytämään hyvät elektroniset komponentit mittalaitteeseen ja tämä opinnäytetyö antaa ohjeet siitä, miten nämä kaksi tärkeintä komponenttia toimivat ja miten niitä hallitaan. Rajallisten resurssien vuoksi olen tyytyväinen saavutettuun lopputulokseen, ja tämä opinnäytetyö toimii hyvänä lähtökohtana Sara-prototyypin eteenpäin kehittämisessä. Prototyypin piirilevy on suunniteltu Eagle-ohjelmalla, ja sen pohjalta lopullinen piirilevy on helppo tehdä.

Mittalaitteen kehittäminen on edennyt siihen tilanteeseen, jossa sopivat komponentit ovat löytyneet, ja niiden avulla voidaan toteuttaa yksinkertainen ja edullinen mittalaite usealle erilaiselle sensorityypille. Sara-prototyypin monimuotoisuus ja avoimuus auttaa kehittämään painettujen sensorien sovelluksia ja niiden testaamista voidaan myös helposti tehdä opiskelijavoimin. Sara ei ole täydellinen mittalaite ja sen rajoitteet varmasti ovat yksi ongelma, jota ei voida kiertää valittujen komponenttien rajoitusten vuoksi. Sen edullisuus ja saatavuus ovat etuja, joita voidaan hyödyntää.

Pääkomponentti jonka ympärille laitteisto koottiin oli Texas Instrumentsin LMP91000, joka mahdollisti helpon potentiostaattikytkennän. Tämän komponentin avulla voidaan mittalaitetta käyttää hyvin monenlaisiin mittauksiin. Sen ympärillä olevat komponentit on helppo vaihtaa tarvittaessa tukemaan haluttua toimenpidettä. Laitteelle suunnitellun piirilevyn toimintaa ei voitu kuitenkaan varmentaa, ja sen käyttöönotto tulee olemaan yksi merkittävä askel, jotta Sara-prototyyppi voidaan saattaa siihen pisteeseen, että se voidaan antaa eteenpäin testattavaksi.

Sara-prototyypin mahdollisuudet ja käyttökohteet ovat vielä kartoittamatta ja sen jatkokehityksestä ei ole tietoa. Kuitenkin työ, joka on tehty tämän prototyypin ympärille, ei varmastikaan ole mennyt hukkaan, ja toivottavasti näemme tulevaisuudessa sen käyttöä mahdollisimman laajasti. Tarvittavat elektroniikan jatkokehitystarpeet on tunnistettu tässä työssä. Piirilevyn toteutuksen jälkeen ratkaisu on helppo monistaa ja toteuttaa sen jakelu halutuille yhteistyökumppaneille. Yhteistyökumppaneiden tunnistaminen ja ratkaisun

jalkauttaminen käyttöön osana biosensorisovellusten kehittämistä kannattanee toteuttaa OAMK:lla käynnissä olevien biosensorikehitystä koskevien hankkeiden kuten PrinLabin kanssa.

Kokonaisuudessaan prototyypin kehitys onnistui hyvin. Teimme opiskelijavoimin mittalaitteen, joka toimi halutulla tavalla. Vaikka matkan varrelle oli haasteita, ja vielä on muutamia ratkaisemattomia ongelmia ennen valmista tuotetta, olen kuitenkin varma, että pienellä ponnistuksella Sara saadaan valmiiksi tuotteeksi.

LÄHTEET

1. A/D-muunnin. 2013. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/A/D-muunnin>. Hakupäivä 06.06.2015.
2. Amperometria. 2015. Wikipedia. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Amperometry>. Hakupäivä 16.04.2015.
3. Anodi. 2013. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Anodi>. Hakupäivä 12.04.2015.
4. Arduino. 2013. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Arduino>. Hakupäivä 12.04.2015.
5. Biosensori. 2013. Wikipedia. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Biosensor>. Hakupäivä 11.04.2015.
6. EERPOM. 2015. Wikipedia. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/EEPROM>. Hakupäivä 09.04.2015.
7. Elektrodipotentiaali. 2013. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Elektrodipotentiaali>. Hakupäivä 09.04.2015.
8. I²C. 2015. Wikipedia. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>. Hakupäivä 12.11.2014.
9. Kellotaajuus. 2015. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Kellotaajuus>. Hakupäivä 13.04.2015.
10. Mooli. 2015. Wikipedia. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Mooli>. Hakupäivä 22.05.2014.
11. Potentiostaatti. 2015. Wikipedia. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>. Hakupäivä 17.02.2015.
12. Pulssinleveysmodulaatio. 2015. Wikipedia. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation. Hakupäivä 11.02.2015.

13. Signaalikohina suhde. 2015. Wikipedia. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise_ratio. Hakupäivä 11.02.2015.
14. SRAM. 2015. Wikipedia. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/Static_random-access_memory. Hakupäivä 11.02.2015.
15. Transimpedanssivahvistin. 2015. Wikipedia. Saatavissa:
http://fi.wikipedia.org/wiki/Operaatiovahvistimen_kytkenät. Hakupäivä 18.02.2015.
16. Ohmin laki. 2015. Wikipedia. Saatavissa:
http://fi.wikipedia.org/wiki/Ohmin_laki. Hakupäivä 18.02.2015.
17. Nernstin yhtälö. Aalto yliopiston luentomateriaali korroosiosta Saatavissa:
https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-113.2110/luennot/S-113_2110_I9.2110_luento_9_-_korroosio_ii.pdf. Hakupäivä 12.11.2014.
18. LMP91000 datasheet. 2011. Texas Instruments. Saatavissa:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp91000.pdf>. Hakupäivä 13.11.2014.
19. I2C Bus Specification. 2015. Saatavissa: <http://i2c.info/i2c-bus-specification>. Hakupäivä 22.06.2015.
20. ADS1100 datasheet. 2003. Texas Instruments. Saatavissa:
<http://www.ti.com/lit/ds/sbas239b/sbas239b.pdf>. Hakupäivä 13.11.2014.
21. Arduino Wire Library Detailed Reference. Saatavissa:
<http://playground.arduino.cc/Main/WireLibraryDetailedReference>. Hakupäivä 06.06.2015.
22. Portaankorva, Antti. 2014 Amperometrisen biosensorimittauslaitteen mittaustarkkuuden analysointi. Oulun ammattorkorkeakoulu Saatavissa:
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/70507/Portaankorva_Antti.pdf. Hakupäivä 06.06.2015.

LIITTEET

Liite 1. Arduinon koodi Lukitus

Liite 2. Arduinon koodi Mode

Liite 3. Arduinon koodi REFCN

Liite 4. Arduinon koodi TIA_CONTROL



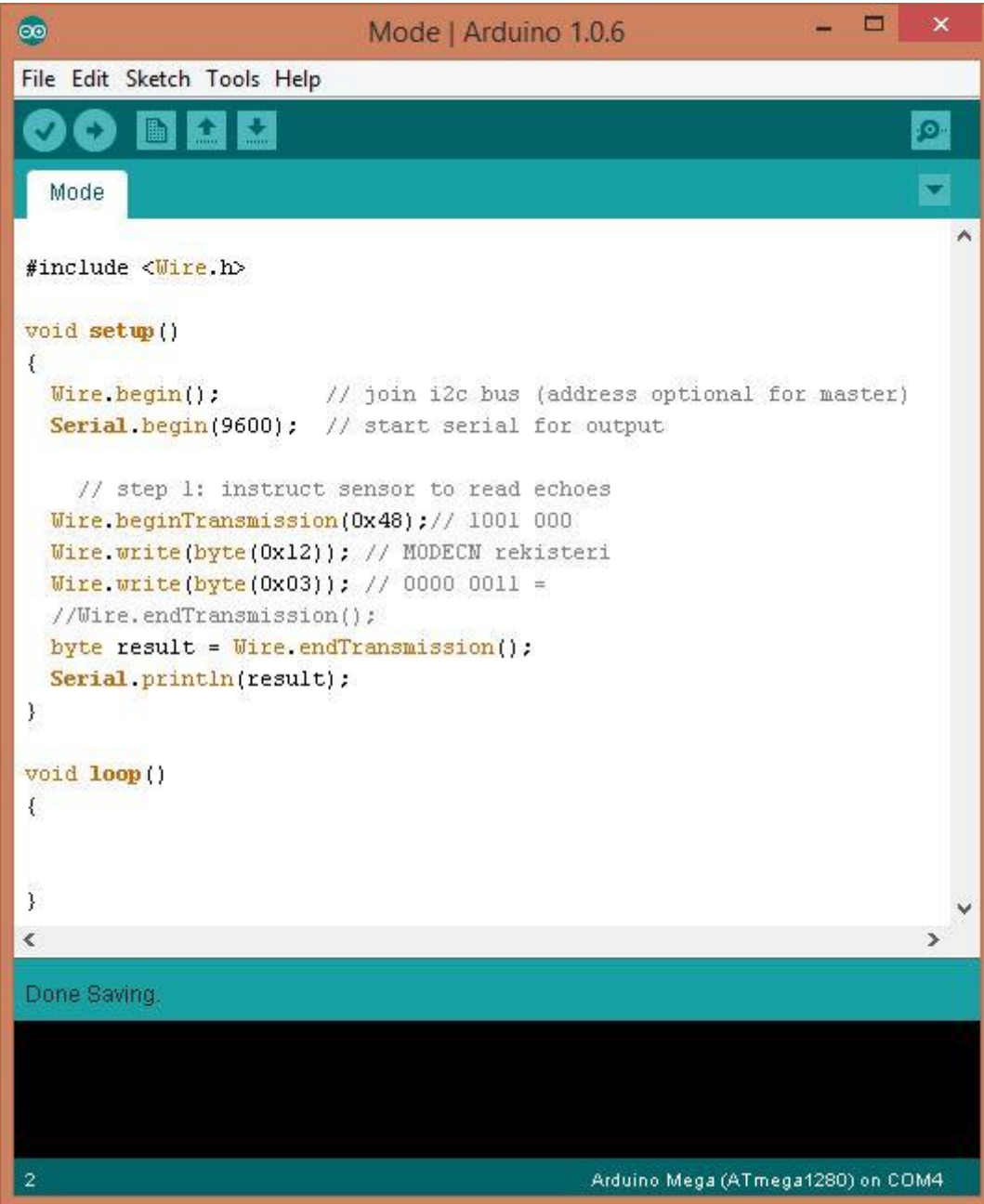
```
lukitus | Arduino 1.0.6
File Edit Sketch Tools Help
lukitus §
#include <Wire.h>

void setup()
{
  Wire.begin(); // join i2c bus (address optional for master)
  Serial.begin(9600); // start serial for output

  // step 1: instruct sensor to read echoes
  Wire.beginTransmission(0x48); // 1001 000
  Wire.write(byte(0x01)); // lukitus rekisteri
  Wire.write(byte(0x0)); // 0=write, 1=read only
  //Wire.endTransmission();
  byte result = Wire.endTransmission();
  Serial.println(result);
}

void loop()
{
}

2 Arduino Mega (ATmega1280) on COM4
```



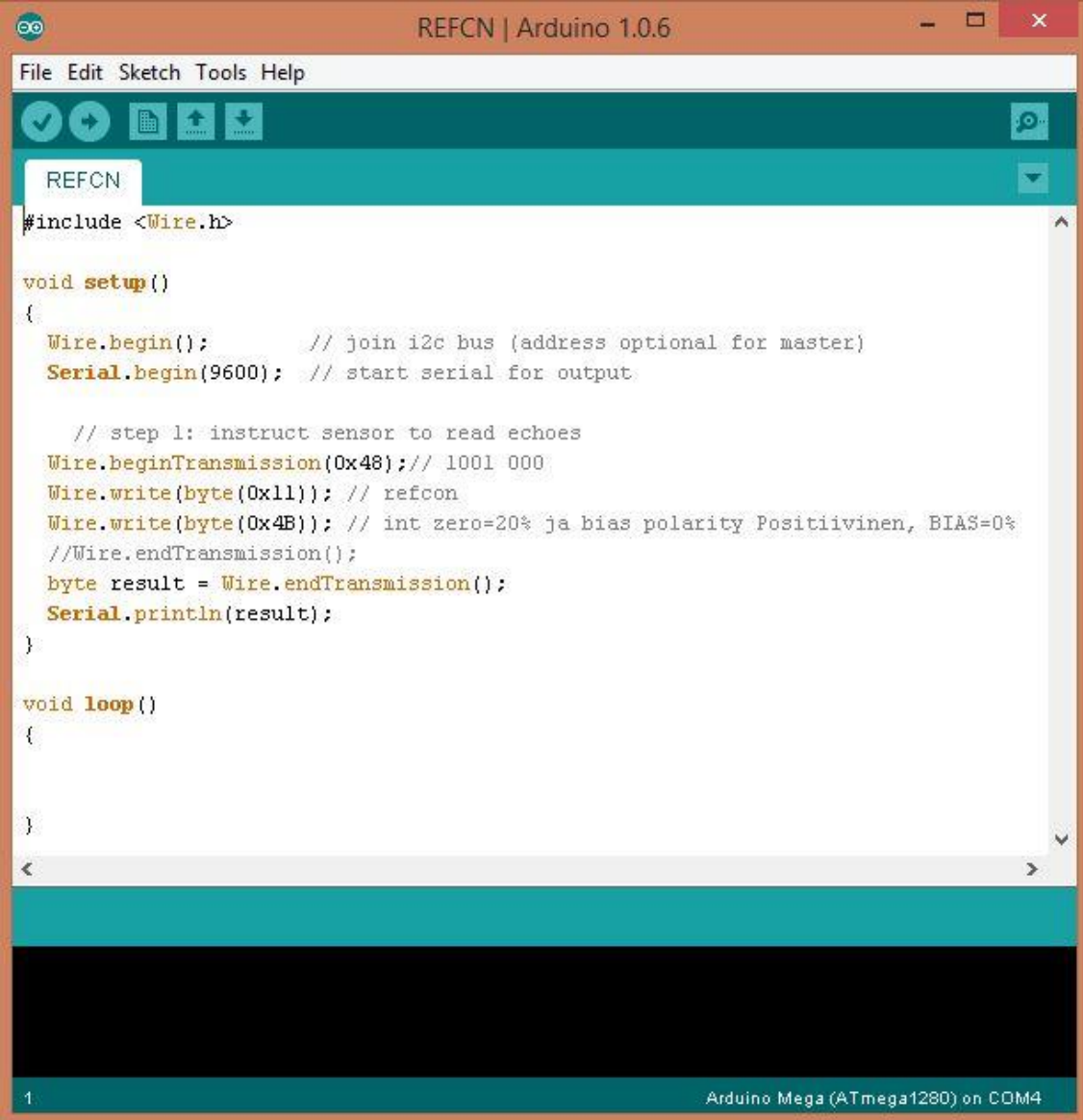
```
Mode | Arduino 1.0.6
File Edit Sketch Tools Help
Mode
#include <Wire.h>

void setup()
{
  Wire.begin();          // join i2c bus (address optional for master)
  Serial.begin(9600);    // start serial for output

  // step 1: instruct sensor to read echoes
  Wire.beginTransmission(0x48); // 1001 000
  Wire.write(byte(0x12)); // MODECN rekisteri
  Wire.write(byte(0x03)); // 0000 0011 =
  //Wire.endTransmission();
  byte result = Wire.endTransmission();
  Serial.println(result);
}

void loop()
{
}

Done Saving.
2 Arduino Mega (ATmega1280) on COM4
```

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The window title is "REFCN | Arduino 1.0.6". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". Below the menu bar is a toolbar with icons for saving, running, and other functions. The main text area contains the following C++ code:

```
#include <Wire.h>

void setup()
{
  Wire.begin();          // join i2c bus (address optional for master)
  Serial.begin(9600);    // start serial for output

  // step 1: instruct sensor to read echoes
  Wire.beginTransmission(0x48); // 1001 000
  Wire.write(byte(0x11)); // refcon
  Wire.write(byte(0x4B)); // int zero=20% ja bias polarity Positiivinen, BIAS=0%
  //Wire.endTransmission();
  byte result = Wire.endTransmission();
  Serial.println(result);
}

void loop()
{
}


```

The status bar at the bottom indicates "1" on the left and "Arduino Mega (ATmega1280) on COM4" on the right.



The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The window title is "TIA_control | Arduino 1.0.6". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". The toolbar contains icons for check, run, upload, and download. The sketch name "TIA_control" is displayed in the top right. The main editor area contains the following code:

```
#include <Wire.h>

void setup()
{
  Wire.begin();          // join i2c bus (address optional for master)
  Serial.begin(9600);   // start serial for output

  // step 1: instruct sensor to read echoes
  Wire.beginTransmission(0x48); // 1001 000
  Wire.write(byte(0x10)); // TIA control rekisteri
  Wire.write(byte(0x7)); // 00011100 = 350k ja Rload=10 Ohm
  //Wire.endTransmission();
  byte result = Wire.endTransmission();
  Serial.println(result);
}

void loop()
{
}


```

At the bottom left, the page number "2" is visible. At the bottom right, the board and port information "Arduino Mega (ATmega1280) on COM4" is displayed.

