

Timo Väisänen

**Actel Fusion -piirin suorituskyvyn selvittäminen**

Insinöörityö  
Kajaanin ammattikorkeakoulu  
Tekniikka ja liikenne  
Tietotekniikka  
Kevätlukukausi 2010



Koulutusala Tekniikka ja liikenne	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Timo Väisänen	
Työn nimi Actel Fusion piirin suorituskyvyn selvittäminen	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Sulautetut järjestelmät	Ohjaaja(t) Asko Kinnunen Toimeksiantaja Kari Huovinen / eTest3
Aika Huhtikuu 2010	Sivumäärä ja liitteet 64 + 13
<p>Insinööri­työn aiheena oli tutkia Actel Fusion -piirin suorituskykyä elektroniikkatuotteen toimintakunnon seurannassa sekä piirin soveltuvuutta ennakoivaan vikadiagnostiikkaan ja prognostiikkaan. Suorituskyvyn tutkiminen tehtiin suorittamalla analogisia mittauksia, joita varten suunniteltiin ja toteutettiin piirilevy. Mittaukset toteutettiin siten, että niitä voi käyttää muissa projekteissa. Insinööri­työn aihe saatiin Kajaanin ammattikorkeakoululla toimivan eTest3-projektin aihealueesta.</p> <p>Insinööri­työssä perehdyttiin FPGA-piireihin ja niiden ohjelmointiin käytettyyn VHDL-ohjelmointikielen. Mittaustulosten tarkentamiseksi työssä tutustuttiin myös signaalin käsittelyn metodeihin. Työn aiheen pohjalta työssä käsiteltiin myös ennakoivaa vikadiagnostiikkaa ja prognostiikkaa. Mittauksia varten tehtiin mittausspiirilevy, jonka suunnittelua varten tutustuttiin Actelin Fusion-piirin ominaisuuksiin.</p> <p>Laitteistoon kuului kannettava tietokone, Actelin Fusion Embedded Development Kit sekasignaali-FPGA-kehitysalusta ja itse suunniteltu ja toteutettu mittausspiirilevy. Tietokoneeseen oli asennettu Actelin ohjelmistot, joilla kehitysalustaa ohjelmoitiin. Työssä kehitysalusta kommunikoi tietokoneen kanssa sarjaportin kautta. FPGA-piirin ohjelmointiin käytettiin VHDL-ohjelmointikieltä ja FPGA-piirille implementoidun prosessorin ohjelmointiin C-ohjelmointikieltä.</p> <p>Mittausten perusteella huomattiin, että Fusion-piirin suorituskyky oli hyvä, vaikkakin ongelmia löytyi. Suurimmat ongelmat olivat mittaustulosten huomattava vaihtelu ja kanavakohtaisten näytteiden eroavaisuudet. Signaalinkäsittelyllä vaihtelu saatiin kuriin, mutta muut virheet säilyivät. Teoreettisesti lasketut näytteenottotajuu­det olivat samaa luokkaa kuin mitä valmistaja ilmoittaa ja parhaimmillaan voidaan mitata täyttä äänialuetta usealla kanavalla. AD-muuntimen erottelukyky on parhaimmillaan mikrovolttitasoa. Mittauksien ja teoria pohdintojen pohjalta todettiin Fusion-piirin soveltuvan hyvin elektroniikkatuotteen toimintakunnon seurantaan, kunhan piiri kalibroitiin kunnolla.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	Actel, Fusion, FPGA, VHDL, suorituskyky, analogia, prognostiikka
Säilytyspaikka	<input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School School of Engineering	Degree Programme Information Technology
Author(s) Timo Väisänen	
Title Measuring the Performance of Actel Fusion Circuits	
Optional Professional Studies Embedded Systems	Instructor(s) Mr Asko Kinnunen, Senior Lecturer
	Commissioned by Mr Kari Huovinen, Project Manager
Date April 2010	Total Number of Pages and Appendices 64 + 13
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to examine the performance of the Actel Fusion FPGA circuit when monitoring the operation condition of electronic devices. Examining the suitability of Fusion circuits in prognostics and predictive fault diagnostics were also an important part of this thesis. The results of this thesis are planned to be used in the future projects. The thesis was commissioned by Mr Kari Huovinen, project leader of the eTest3 project in the Kajaani University of Applied Sciences.</p> <p>The performance was examined by performing a series of analog measurements and examining possible faults in the results. For more accurate results a few simple signal processing methods were used. The true performance of the Fusion circuit was analyzed by measuring the results, and reasons for emerged faults and problems were sorted out. Based on the achieved results, suitability for prognostics and predictive fault diagnostics were concluded.</p> <p>For the thesis necessary hardware and software were designed and implemented. The hardware consists of a laptop with necessary programs installed, the Actel Fusion Embedded Development Kit development board and a self made printed circuit board for measurements. The Fusion FPGA circuit was programmed by the VHDL language and the used measuring software was written in the C programming language.</p> <p>As a result, it was found out that the performance was not so good in all the areas as the manufacturer argued. The major weaknesses appeared in the sample rate of the AD-converter, off sets of the analog channels and the stability of the measuring results. One way to fix these problems could have been the calibration of the device which was not done in this thesis because of the lack of time. As a conclusion, the overall performance of the Fusion circuits is good and the circuit is suitable for the real life monitoring of electronic devices.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	Actel, Fusion, FPGA, VHDL, performance, analog, prognostics
Deposited at	<input type="checkbox"/> Kaktus Database at Kajaani University of Applied Sciences <input type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

## KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT

AC	Analog Current
AD	Analog-to-Digital
AG	Analog Gate driver
ARM	Advanced RISC Machines
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
AT	Analog Temperature
AV	Analog Voltage
BGA	Ball Grid Array
DNL	Differential NonLinearity
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
ENOB	Effective Number Of Bits
ESD	Electrostatic Discharge
FET	Field-Effect Transistor
FIFO	First In, First Out
FPGA	Field-Programmable Gate Array
GPIO	General Purpose Input/Output
HDL	Hardware Description Language
IC	Integrated Circuit
ID	Identification
IDE	Integrated Design Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INL	Integral Non-Linearity
IP	Intellectual Property
LCPS	Low-Cost programming Stick
LED	Light-Emitting Diode
LSB	Least Significant Bit
LUT	Look-Up Table
LVTTL	Low Voltage Transistor-Transistor Logic
MicroBlade	Actelin yhteistyökumppani
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
MSB	Most Significant Bit
MUX	Multiplexer

OLED	Organic Light Emitting Diode
Pigeon Point	Actelin tytäryhtiö
PLL	Phase-Locked Loop
PUB	Power Up Bar
PWM	Pulse-Width Modulation
RealView	ARM-proessoreiden kehitystyökalu
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RoHS	The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment
RAM	Random Access Memory
SAR	Successive Approximation Register
SINAD	Signal-to-Noise And Distortion
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SoC	System on Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
STC	Sample Time Control
THD	Total Harmonic Distortion
TVC	Time Divider Control
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VHDL	VHSIC Hardware Description Language
VHSIC	Very-High-Speed Integrated Circuit

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 INSINÖÖRITYÖN AIHEEN TAUSTA	2
3 ENNAKOIVA VIKADIAGNOSTIIKKA JA PROGNOSTIIKKA	3
4 FPGA-PIIRIT	5
5 VHDL-OHJELMOINTIKIELI JA IP-LOHKOT	6
5.1 VHDL-ohjelmointikieli	6
5.2 IP-lohkot	7
6 SIGNAALINKÄSITTELY	9
6.1 Ylinäytteistäminen	9
6.2 Keskiarvoistaminen	10
6.3 Interpolointi	11
6.4 Desimointi	12
7 ACTEL FUSION SEKASIGNAALI-FPGA-PIIRI	13
7.1 Yleistä	13
7.2 Analogialohko	14
7.2.1 Analogiatulot ja -multiplekseri	14
7.2.2 Analogialohkon alilohkot	15
7.2.3 AD-muunnin	18
8 ACTEL FUSION EMBEDDED DEVELOPMENT KIT	25
8.1 Yleistä	25
8.2 Kehitysalustan ominaisuudet	26
9 MITTAUSPIIRILEVYN TOTEUTUS	30
9.1 Jännitteen mittauskytkentä	30
9.2 Virran mittauskytkentä	31
9.3 Lämpötilan mittauskytkentä	33
9.4 Käyttöjännitteet	35
9.5 Mittauspiirilevyn valmistaminen	36

10 MITTAUSOHJELMISTON TOTEUTUS	37
10.1 Laitteisto	37
10.2 Käytetyt ohjelmistot	38
10.2.1 Actel Libero IDE v 8.6	38
10.2.2 Actel SoftConsole IDE v 2.3	41
10.3 Mittaukset	42
10.3.1 Jännite	43
10.3.2 Virta	44
10.3.3 Lämpötila	45
11 TULOSTEN TARKASTELU	47
11.1 Jännitteen mittaukset	47
11.2 Virran mittaukset	50
11.3 Lämpötilan mittaukset	52
11.4 AD-muuntimen näytteenottotaajuudet	53
11.5 AD-muuntimen resoluutiot	57
11.6 Huomioita	58
12 JOHTOPÄÄTÖKSET	61
13 YHTEENVETO	62
LÄHTEET	63
LIITTEET	

## 1 JOHDANTO

Insinööriyön tilaajana oli Kajaanin ammattikorkeakoululla toimivan eTest3-projektin projektipäällikkö Kari Huovinen ja työn valvojana toimi lehtori Asko Kinnunen. Actel Fusion -sekasignaali-FPGA-kehitysalusta hankittiin eTest3-projektiin. Projektin tarkoituksena on tutkia sekasignaali-FPGA-piirien soveltuvuutta vaativiin olosuhteisiin tarkoitettujen elektroniikkatuotteiden toimintakunnon hallintaan, etätestaukseen ja ennakoivaan vikadiagnostiikkaan [1].

Insinööriyön tavoitteena oli tutkia Actel Fusion sekasignaali-FPGA-piirin suorituskykyä elektroniikkatuotteen toimintakunnon seurannan yhteydessä, kun mahdollisimman monta analogiatulon mittausta on yhtäaikaan käytössä. Samalla tutkittiin ja pohdittiin piirin soveltuvuutta ennakoivaan vikadiagnostiikkaan ja prognostiikkaan. Lisäksi mittauksia pyrittiin tarkentamaan erilaisilla signaalinkäsittelyn metodeilla. Mittausten pohjalta tavoitteena oli selvittää ja pohtia Fusion-piirin todellista suorituskykyä.

FPGA-piirien suosio elektroniikkatuotteiden sydäminä on kasvanut huomattavasti. Piirien suurimmista eduista ovat niiden tilansäästö ja nykyisin myös uudelleen ohjelmoitavuus. Aikaisemmin FPGA-piirien heikkous on ollut niiden suuri virrankulutus, mikä kuitenkin nykyään on saatu hyvin kuriin. FPGA-piirit on suunniteltu käyttäjän ohjelmoitaviksi yleensä VHDL-ohjelmointikielellä, joka on toisista ohjelmointikielistä poiketen laitteistonkuvauskieli.

Tässä insinööriyössä tutustuttiin hieman FPGA-piirien toimintaan ja VHDL-ohjelmointikieleen. Lisäksi työssä käsiteltiin ennakoivaa vikadiagnostiikkaa ja prognostiikkaa sekä mittausten tulosten tarkkuuden parantamiseen liittyen muutamia signaalinkäsittelyn metodeja. Kehitysalustan ominaisuuksien esittelyn lisäksi työssä keskityttiin erityisesti Fusion-piirin analogialohkon ominaisuuksiin.

Suorituskyvyn selvittäminen toteutettiin suunnittelemalla ja toteuttamalla mittauksia varten mittausspiirilävy. Mittauksia tehtiin jännitteelle, virralle ja lämpötilalle useilla eri asetuksilla. Mittausten ja teoreettisen pohdinnan pohjalta suorituskykyä, piirin soveltuvuutta elektroniikkatuotteen toimintakunnon seurantaan, prognostiikkaan ja ennakoivaan vikadiagnostiikkaan tarkkailtiin mahdollisimman monesta näkökulmasta.



## 2 INSINÖÖRITYÖN AIHEEN TAUSTA

Tämän insinööriyön aihe annettiin siis Kajaanin ammattikorkeakoululla toimivan eTest3-projektin aihealueesta. Projektissa tutkitaan sekasignaali-FPGA-piirien soveltuvuutta elektronikkatuotteen toimintakunnon hallintaan, etätestaukseen ja ennakoivaan vikadiagnostiikkaan. [1.]

Projektissa Kajaanin ammattikorkeakoulu tekee yhteistyötä Kajaanin teknologiakeskuksen, Oulun yliopiston mittalaitelaboratorion, biotekniikan laboratorion ja Center of Wireless Communication -yksikön kanssa. Projektin taustalla on kansainvälisesti toimiva Measurepolis. Measurepolis on mittaustekniikan osaamiskeskus, jonka tavoitteena on koota kansallisesti merkittävimmät mittaustekniikan alan yritykset ja laitokset yhteen luodakseen kannattavaa liiketoimintaa. Measurepolis-ohjelman tavoitteena on vahvistaa mittaustekniikan kilpailukykyä. Kilpailukykyä pyritään kohentamaan alan tutkimus-, kehitys- ja yritystoiminnan uudistuksilla, verkottamisella ja kansainvälistämisellä. [1.]

Tavoitteena Kajaanin ammattikorkeakoululla on kehittää ja syventää osaamistaan vaativiin olosuhteisiin tarkoitetuista sulautetuista järjestelmistä. Kehittämisen osa-alueisiin kuuluvat esimerkiksi SoC- ja FPGA-teknologiat sekä etätestaus ja vikadiagnostiikka. Kajaanin ammattikorkeakoulun periaatteena on uusien teknologioiden ja tietotaitojen siirtäminen myös alueen yrityksille. [1.]

Projektissa tutkitaan saatavilla olevia etätestaukseen, vikadiagnostiikkaan ja ennakoivaan vikadiagnostiikkaan sekä tuotteen toimintakunnon seuraamiseen liittyviä menetelmiä. Näillä menetelmillä pyritään selvittämään kuinka ne soveltuvat vaativiin olosuhteisiin tarkoitettujen laitteiden toteutukseen. Käytännön toteutuksena projektissa on tavoitteena valmistaa demo-laite, joka perustuu sekasignaali-FPGA-alustaan, johon on sisällytetty tarvittavat ominaisuudet. Demo-laite pyritään saamaan johonkin aitoon käyttöympäristöön testattavaksi. [1.]

Projektin pohjalta insinööriyön aiheeksi tuli siis tutkia Fusion-piirin suorituskykyä ja sen muuttumista, kun piiriä kuormitetaan. Tällä pyritään selvittämään kuinka vaativiin sovelluksiin piiriä voidaan hyödyntää.

### 3 ENNAKOIVA VIKADIAGNOSTIIKKA JA PROGNOSTIIKKA

Ennakoivan vikadiagnostiikan tavoitteena on havaita etukäteen mahdolliset elektroniikka-tuotteiden vioittumiset. Ennakoivalla havainnoinnilla voidaan ehkäistä suurempien vahinkojen syntyminen ja havainnointi pyritään suorittamaan reaaliajassa. Nykyään ennakoivaa vika-diagnostiikkaa tarvitaan kokoajan enemmän elektroniikan alalla, koska yhä enemmän toimintoja suoritetaan elektroniikan avulla. Ennakoivaan vikadiagnostiikkaan kuuluu tärkeänä osana myös prognostiikka. [2, s. 1]

Ennakoivassa vikadiagnostiikassa ja prognostiikassa tarkkaillaan jatkuvasti piirin tai jonkin muun tarkkailtavan kohteen toimintaan liittyviä tärkeitä suureita, kuten virrankulutusta tai lämpötilaa. Näillä pyritään edesauttamaan turvallisuutta laitteissa tai kulkuneuvoissa, joissa pienikin elektroniikan vikaantuminen voi aiheuttaa suuria ongelmia, esimerkiksi lentokoneessa.

#### Prognostiikka

Prognostiikalla tarkoitetaan erilaisia metodeja, joilla pyritään selvittämään elektroniikkatuotteiden tai komponenttien turvallinen käyttöikä. Tämän tiedon pohjalta voidaan suojata tuote vioittumiselta.

Prognostiikan implementoinnille määritellään kolme eri kategoriaa:

1. Kertakäyttöisten prognostiikkasolujen käyttö, kuten sulakkeet, jotka hajoavat ennen kuin itse tuote. Prognostiikkasolut on sijoitettu tarkkailtavan/suojeltavan tuotteen läheisyyteen tai jopa itse tuotteeseen. Tämä tarkoittaa, että elektroniikkaa suojaavat komponentit altistuvat itsekin samanlaisille häiriöille kuin itse tuote. Suojaavan komponentin täytyy siis kestää samat olosuhteet, mutta kuitenkin hajota ennen kuin suojattava tuote, jos jokin virhetilanne ilmenee. [2, s. 1.]
2. Tarkkaillaan tärkeitä parametrejä, joiden muutokset ennakoivat vikaantumista, ja päätellään niiden muutoksista tuotteen vikaantumisen mahdollisuus. Tarkkailemalla elektroniikkatuotteen parametreja pyritään ennakoimaan tuotteen vioittuminen. Tarkkailtavia parametreja voivat olla esimerkiksi jännite, virta tai lämpötila. Jos jos-

sakin tarkkailtavassa parametrissa tapahtuu huomattavia muutoksia ja ne ylittävät asetut rajat, joiden sisällä parametrit saavat vaihdella, katkaistaan elektroniikkatuotteelta tai komponentilta käyttöjännite. Tällä pyritään estämään suuremmat tuhot valvottavassa tuotteessa. [2, s. 1.]

3. Elektroniikkatuotetta testataan testitiloissa tuotteen käyttöolosuhteissa. Testin aikana seurataan tärkeiden parametrien muuttumista. Muutosten perusteella arvioidaan komponenttien käyttöikä eri olosuhteissa, jolloin voidaan arvioida tarvittava huoltoväli. Tällä ei kuitenkaan voida eliminoida komponenttikohtaisia valmistusvirheistä johtuvia äkillisiä vioittumisia. [2, s. 1.]

Lisäksi prognostiikalle on määritelty kuusi eri tasoa (tasot 0–5), kun sitä sovelletaan elektroniikkatuotteeseen. Näillä tasoilla pyritään etsimään ja estämään mahdolliset viat alkaen korkeimmalta tasolta (taso 5) ja menemällä mahdollisimman pitkälle kohti alinta tasoa (taso 0). [2, s. 2.]

Taso 0: Käsittää komponenttien sisäiset liitännät.

Taso 1: Käsittää diskreetit komponentit.

Taso 2: Käsittää piirilevyn ja sen sisältämät yhteydet esimerkiksi komponentteihin.

Taso 3: Käsittää koteloidun elektroniikkatuotteen ja yhteyden kotelosta sisäiseen elektroniikkaan, esimerkiksi kiintolevy.

Taso 4: Käsittää itse elektroniikkatuotteen ja sen liittimet sekä yhteydet sisäisiin elektroniikkakokonaisuuksiin, esimerkiksi kannettava tietokone.

Taso 5: Käsittää suuret elektroniikkajärjestelmät ja niiden väliset yhteydet.

## 4 FPGA-PIIRIT

FPGA-piirit ovat tehokkaimpia ja monikäyttöisimpiä ohjelmoitavia logiikkapiirejä. FPGA-piireissä yhdistetään aikaisempien PLD-piirien ohjelmoitavuus ja ASIC-piirien suunnittelu-arkkitehtuuri. FPGA-piireille voidaan ohjelmoida loogiset kytkennät sovelluskohtaisesti. Spesifioidut ASIC-piirit voivat suorittaa tietyn loogisen operaation nopeammin kuin FPGA-piirit, mutta ASIC-piirejä ei voida ohjelmoida uudelleen sovelluskohtaisesti, vaan jokaiseen sovellukseen pitää olla oma piirinsä. [3.]

FPGA-piirit voidaan jakaa kerta- ja uudelleenohjelmoitaviin. Uudelleenohjelmoitavat piirit voidaan edelleen jakaa myös sen mukaan, säilyykö ohjelmointi vielä virtakatkoksen jälkeen. Uudelleenohjelmoitavat piirit, joissa ohjelmointi ei pysy virtakatkoksen jälkeen, perustuvat yleensä pelkästään SRAM-muistiin. Tällaiset piirit pitää aina ohjelmoida uudelleen jostakin ulkoisesta lähteestä, esimerkiksi flash-muistista, kun piirille kytketään käyttöjännite. FPGA-piirit joissa ohjelmointi säilyy, perustuvat yleensä joko pelkästään flash-muistiin tai flash- ja SRAM-muistin yhdistelmään. [3.]

FPGA-piirien pääelementit ovat ohjelmoitavat loogisten elementtien matriisi (matrix of programmable logic blocks) ja reititysmatriisi (programmable routing matrix), joka koostuu liitäntälohkoista (input/outputblock). Loogiset elementit sisältävät LUT-lohkon, joka on monituloinen lohko (tulojen määrä riippuu valmistajasta), johon voidaan ohjelmoida mikä tahansa looginen toiminto. Mitä enemmän LUT-lohkoissa on tuloja, sitä monimutkaisempia logiikkatoimintoja niihin voidaan ohjelmoida. FPGA-piirin ohjelmoinnissa loogiset elementit ohjelmoidaan halutuksi ja samalla reititetään, jolloin saadaan aikaiseksi haluttu toiminto. FPGA-piirit voivat sisältää paljon muutakin tärkeitä ominaisuuksia, kuten RAM-muistia käytettäväksi piirin sisäiseen datan tallennukseen esimerkiksi FIFO:a käytettäessä. [4.]

## 5 VHDL-OHJELMOINTIKIELI JA IP-LOHKOT

FPGA-piirit on suunniteltu käyttäjän ohjelmoitaviksi, eikä niissä välttämättä ole valmistuksen jälkeen ollenkaan sisällä koodia. FPGA-piirien ohjelmointi tapahtuu yleensä VHDL-ohjelmointikielellä. VHDL-ohjelmointikieltä ei yleensä kirjoiteta koodimuodossa, koska se on hyvin monimutkainen. Niinpä VHDL-ohjelmoinnissa käytetään valmiita koodipaketteja, joita yhdistelemällä saadaan haluttu toiminnallisuus aikaiseksi. Näitä koodipaketteja kutsutaan pehmeiksi IP-lohkoiksi (IP-core) ja ne kuvaavat käytännössä diskreettien komponenttien toimintaa. [5.]

### 5.1 VHDL-ohjelmointikieli

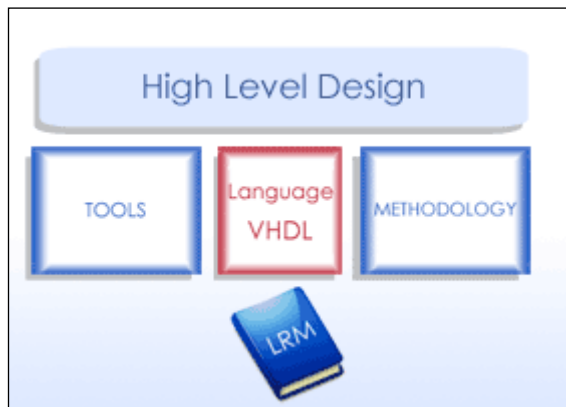
VHDL-ohjelmointikieli muistuttaa ulkoisesti mitä tahansa muuta tekstipohjaista ohjelmointikieltä ja sitä voidaan kirjoittaa millä tahansa tekstieditorilla. VHDL-ohjelmointikieli on hyvin laajasti tuettu eri kääntäjissä. VHDL kuitenkin eroaa muista siinä, että se on laitteistonkuvauskieli. VHDL-ohjelmointikielellä voidaan kuvata myös kokonaisen elektronisen järjestelmän toimintaa. Yleensä VHDL-kielellä kuitenkin kuvataan yksittäisten IC-piirien tai laajemman elektronisen kytkennän toimintaa koodimuodossa. Piirien toimintaa voidaan kuvata joko rakenne- tai käyttäytymiskuvauksena. Näistä koodikielellä kuvatuista komponenteista voidaan tehdä fyysisiä kytkentöjä vastaavat kytkennät yhdelle FPGA-piirille. [6.]

VHDL-ohjelmointikielen kehitys alkoi vuonna 1981. Uutta ohjelmointikieltä kehitti Yhdysvaltain puolustusministeriö. VHDL-kielen suunnittelun lähtökohtana oli, että sen piti toimia samalla tavalla millä tahansa simulaattorilla eikä sen suunnittelu saanut riippua tietystä teknologiasta tai suunnittelumetodeista. [7.]

Ensimmäinen julkinen versio VHDL:stä ilmestyi 1985, jota ennen VHDL-kieltä kehittivät yhteistyössä Intermetrics, IBM ja Texas Instruments kahden vuoden ajan. Ensimmäisen ker- ran VHDL hyväksyttiin IEEE:n standardiksi vuonna 1987 (IEEE 1076-1987). Koska VHDL on IEEE-standardoitu, niin kehittäjien pitää viiden vuoden välein, tai aikaisemmin, tarkistaa että kieli on edelleen yhteensopiva markkinoilla olevien elektroniikkatuotteiden kanssa. Vuonna 1993 tehdyn tarkistuksen perusteella julkaistiin vuonna 1994 uusi päivitetty versio standardista (IEEE 1076-1993), mikä on edelleen kaikkein laajimmin tuettu versio.

Tämän jälkeen standardiin on tehty joitakin pieniä muutoksia, joiden tiimoilta on julkaistu uudet versiot (IEEE 1076-2000, Edition ja IEEE 1076-2002). Viimeisin standardin päivitys on vuodelta 2009 (IEEE 1076-2008). [7.]

VHDL-ohjelmointikieli ei sido käyttäjää käyttämään jotain tiettyä ohjelmointi metodia tai teknologiaa. VHDL-ohjelmoinnissa käyttäjä valitsee haluamansa työkalut ja metodit, vain koodauskieli pysyy vakiona (kuva 1). [7.]



Kuva 1. Lohkot korkean tason suunnitteluun. [5.]

## 5.2 IP-lohkot

IP nimitystä käytetään laitteistolohkoista, jotka on suunniteltu uudelleenkäytettävyyttä ajatellen. IP-lohkot sisältävät tuotteen toiminnan ja rakenteen kuvaksen sekä lohkon liittyvät asiakirjat sekä liitetiedostot. Asiakirjoilla ja liitetiedostoilla esitellään lohkon integroinnin ja testausten vaatimat tiedot ja toimenpiteet. Lisäksi asiakirjoilla ja liitteillä esitellään IP-lohkon ominaisuudet ja todistetaan lohkon toimivan määritelmien mukaisesti. [8.]

IP-lohkot jaetaan kolmeen eri ryhmään: kovat (hard), kiinteät (firm) ja pehmeät lohkot (soft). Kuitenkin yleensä IP-lohkot jaetaan karkeasti kahteen ryhmään, koviin ja pehmeisiin. [8.]

Pehmeät (soft) lohkot toimitetaan käyttäjälle syntetisoituvana HDL-kuvauksena. Käyttäjä voi itse päättää käytettävän toteutusteknologian, mikä antaa joustavuutta suunnitteluprosessiin. Pehmeiden IP-lohkojen mukana annetaan käyttäjälle arviot niiden ominaisuuksista. Ominaisuuksia ei kuitenkaan voida määrittellä kovin tarkkaan, koska lopulliset toiminnallisuudet ovat yleensä tiedossa vasta kun lohko on toteutettu piirille. [8.]

Kovat (hard) IP-lohkot puolestaan toimitetaan käyttäjälle täysin valmiina piirikuviosuunnitteluna. Kovissa IP-lohkoissa transistorit on valmiiksi määritelty ja reititetty tietyn toteutusteknologian mukaisesti. Tämä aiheuttaa sen, että kovien IP-lohkojen käyttäjät joutuvat käyttämään tiettyä valmiiksi määriteltyä toteutustekniikkaa. Kovien IP-lohkojen hyvä puoli on, että lohkon ominaisuuksista tiedetään tarkat tiedot. Käyttäjät tietävät kovista lohkoista yleiset sekä rajapinnan ominaisuudet, mutta yleensä lohkon sisäisestä rakenteesta ei ole tietoa. [8.]

Kiinteät (firm) IP-lohkot ovat pehmeiden ja kovien lohkojen välimuoto. Kiinteissä IP-lohkoissa ei ole täysin valmista piirikuviosuunnitelmaa. Kuitenkin se sisältää joitakin tietoja fyysisistä ominaisuuksista. [8.]

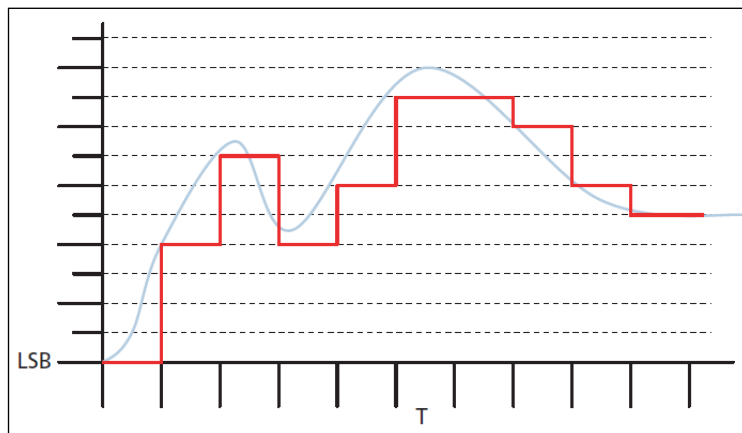
Tässä insinööriyössä käytettävät IP-lohkot ovat malliltaan pehmeitä ja sisältävät siten HDL-kielisen kuvauksen piirien toiminnasta.

## 6 SIGNAALINKÄSITTELY

Monesti AD-muunninten tekemää muunnosta käytetään sellaisenaan hyväksi. Kuitenkin on olemassa metodeja, joilla voidaan tarkentaa AD-muunninten tekemiä muunnoksia tai jopa kasvattaa näennäisesti AD-muuntimen resoluutiota. Tässä insinööriyössä pyritään hyödyntämään näitä suoritetuissa mittauksissa.

### 6.1 Ylinäytteistäminen

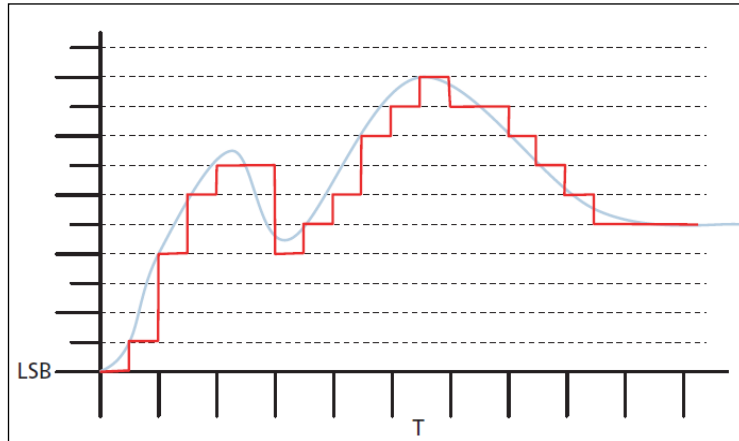
Ylinäytteistäminen on helpoin ja yleisin tapa tarkentaa AD-muuntimen tuloksia. Ylinäytteistämällä tarkoitetaan yksinkertaisesti näytteenottotaajuuden kasvattamista. Periaatteessa signaali voidaan rekonstruoida, jos näytteenottotaajuus on kaksinkertainen tutkittavan signaalin suurimpaan taajuuteen nähden (Nyquistin taajuus). Kuitenkaan kaksinkertaisella näytteenottotaajuudella ei välttämättä saada tarkinta mahdollista muunnosta aikaiseksi (kuva 2). [9.]



Kuva 2. Signaali ja AD-muunnos. [9.]

Ylinäytteistämällä saadaan aikaan tarkempi muunnos (kuva 3). Ylinäytteistämällä ei saada suoraan suurempaa resoluutiota, vaan sillä saadaan tarkemmin seurattua tutkittavan signaalin vaihtelua ja samalla voidaan paremmin hyödyntää AD-muuntimen suorituskykyä. [9.]





Kuva 3. Signaali ja ylinäytteistetty AD-muunnos. [9.]

Kuitenkaan tietyn rajan jälkeen näytteenottotaajuuden nostaminen ei enää tarkenna tulosta, vaan lopulta tullaan tilanteeseen, jossa samoja näytteitä tulee vain enemmän peräkkäin. Tällöin AD-muuntimen suorituskyky menee hukkaan, eli ylinäytteistämisesäkin pitää olla tarkkana mikä on sopiva näytteenottotaajuus. Yleensä ylinäytteistyksessä käytetään nelinkertaista näytteenottotaajuutta Nyquistin taajuuteen verrattuna. [9.]

## 6.2 Keskiarvoistaminen

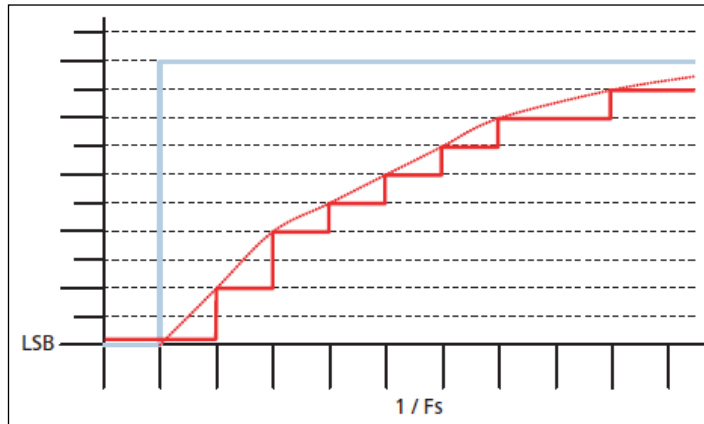
Keskiarvoistaminen vastaa käytännössä alipäästösuodatusta, mutta digitaalisessa muodossa. Keskiarvoistamisella pyritään parantamaan AD-muuntimen resoluutiota tasoittamalla sisään tulevaa signaalia. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että keskiarvoistamisella eliminoidaan suurimmat epäsäännölliset kohinapiikit signaalista, jolloin SNR paranee ja efektiivisten bittien määrä kasvaa. Keskiarvoistamisessa ideana on ottaa edellinen arvo muistiin, jota avuksi käyttäen lasketaan seuraava arvo. Yleensä keskiarvoistamisessa käytetään kaavoja (1) ja (2). [9.]

$$S(t) = S(t-1) - \frac{S(t-1)}{N} + U_{IN} \quad (1)$$

$$A(t) = \frac{S(t)}{N} \quad (2)$$

Kaavoissa (1) ja (2)  $S$  on laskurekisteri,  $N$  on käytetyn keskiarvoistamisen ikkunan pituus ja  $A$  on keskiarvoistamisen tulos [9].

Mitä suurempi keskiarvoistamisessa oleva  $N$  on, sitä hitaammin tulos seuraa tutkittavaa signaalia, eli häiriöpiikit suodattuvat paremmin pois. Jos tutkittavana signaalina olisi tasajännite, olisi keskiarvoistamisen seurauksena kuvan 4 kaltainen vaste. [9.]

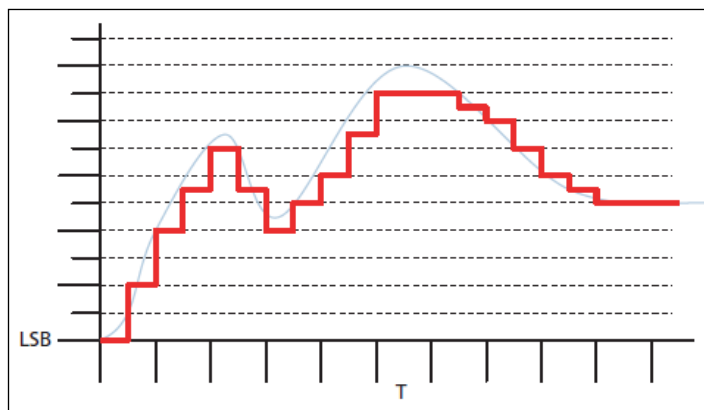


Kuva 4. Keskiarvoistetun signaalin askelvaste ( $N=4$ ). [9.]

### 6.3 Interpolointi

Interpolointia käyttämällä voidaan saada aritmeettisilla operaatioilla aikaiseksi parempi näytteenottotaajuus ja resoluutio. Periaatteessa interpoloinnissa tehdään aikaisempien jo tunnettujen näytteiden pohjalta matemaattisesti uusia näytteitä. [9.]

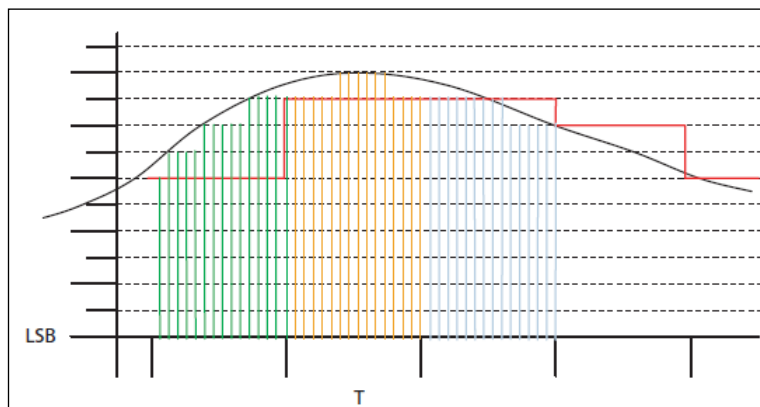
Kuvassa 5 on esitetty ehkä yleisin interpolointitapa, jossa kahdesta peräkkäisestä näytteestä lasketaan keskiarvo ja luodaan uusi näyte. Tällöin resoluutio kasvaa yhdellä bitillä ja näytteenottotaajuus kaksinkertaistuu. [9.]



Kuva 5. Interpoloitu signaali. [9.]

## 6.4 Desimointi

Desimoinnilla voidaan myös parantaa AD-muuntimen näytteenottotaajuutta ja resoluutiota, desimointi perustuu tutkittavan signaalin ylinäytteistämiseen. Desimoinnissa tutkittava signaali ylinäytteistetään, esimerkiksi 16-kertaisella näytteenottotaajuudella, kuten kuvassa 6 on tehty. Saaduista näytteistä voidaan tarvittaessa muodostaa haluttu näytteenottotaajuus erilaisilla laskutoimituksilla. Ylinäytteistämiseen käytetty näytteenottotaajuus voidaan palauttaa entiseksi tai pienentää sitä vain hieman. [9.]



Kuva 6. Ylinäytteistetty signaali. [9.]

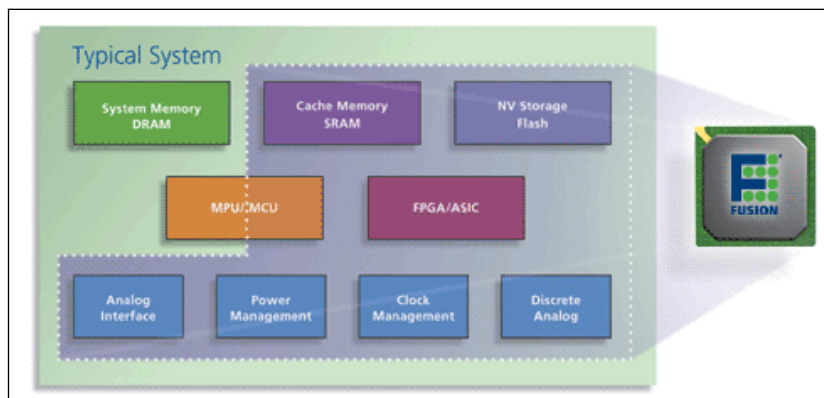
Esimerkiksi lasketaan yhteen normaalin näytteenottotaajuuden jaksonajalta otetut ylinäytteistetetyt näytteet. Eli lasketaan yhteen kuusitoista 12-bittistä näytettä, joista saadaan yhteensä yksi 16-bittinen (desimoitu) luku, joka jaetaan kuudellatoista, eli saadaan aikaiseksi keskiarvo. Tämän jälkeen on kolme eri vaihtoehtoa miten käsitellä keskiarvoa. 16 bitistä voidaan säilyttää yksi tai useampi bitti efektiivisenä bittinä 12 bitin lisäksi, lyhentää lukua käyttämällä vain kahtatoista ylintä bittiä tai lisätä ylimpään kahdentoista bitin muodostamaan lukuun kolmannen bitin painoarvo. Kaikilla näillä metodeilla päästään tarkempaan arvoon kuin alkuperäisellä tavalla olisi päästy ja näytteenottotaajuus palautuu entiseen, ennen ylinäytteistämistä olleeseen taajuuteen. [9.]

## 7 ACTEL FUSION SEKASIGNAALI-FPGA-PIIRI

### 7.1 Yleistä

Fusion on Actelin ja samalla myös maailman ensimmäinen sekasignaali-FPGA-piiri. Aikaisemmin sekasignaalijärjestelmät ovat vaatineet kalliita ja tilaa vieviä diskreettejä komponentteja ja kytkentöjä tai tiettyjä toimintoja varten spesifioituja IC-piirejä. Yhdelle FPGA-piirille voidaan hyvin vapaasti suunnitella ja toteuttaa laajoja kytkentöjä sekä monipuolisia toiminnallisuuksia. Lisäksi kytkentöjä voidaan vielä helposti muuttaa tuotannon myöhemmissä vaiheissa. Fusion-piireissä sekasignaaleiden käytön mahdollistaminen on entisestään vähentänyt tarvittavien ulkopuolisten komponenttien määrää. [10, s. 15.]

Fusion-piiri perustuu ProASIC3:een ja ProASIC3E flash-FPGA-arkkitehtuuriin. Fusion-piiri on suunniteltu helposti ja joustavasti uudelleen ohjelmoitavaksi, tilaa säästäväksi ja kuitenkin samalla mahdollisimman tehokkaaksi. Tämän mahdollistavat samaan piiriin sisällytetyt FPGA-piiri, flash- ja SRAM-muistit, virran ja kellonhallinnat sekä analogiaosat (kuva 7). [10, s. 15.]



Kuva 7. Fusion-piiriin integroidut osa-alueet. [11.]

Fusion-piirit jaotellaan niiden FPGA-ydinten tiheyden perusteella, eli kuinka paljon järjestelmäportteja (System Gates) piirille mahtuu. Fusion-piirejä on saatavilla neljää eri kokoa, joihin mahtuu 90 000, 250 000, 600 000 tai 1 500 000 järjestelmäporttia. Kaikki piirit sisältävät perusominaisuudet, kuten 2 megabitistä 8 megabittiin flash-muistia, 12-bittisen AD-muuntimen, suuria virtoja kestävät ulostulot, kelloa varten RC- ja kideoskillaattorit, jotka on yhdistetty sisäänrakennettuihin vaihelukittuihin silmukoihin (PLL). Sisäänrakennetuilla kel-

loilla ohjataan FPGA:ta ja muita piirillä olevia resursseja. Lisäksi Actelilla on erikseen valittavissa Fusion-piiri tyyppi, jossa on valinnaisena Cortex-M1-prosessorituki. [10, s. 16.]

Fusion-piirien tuotenimet koostuvat prosessorituen ja järjestelmäporttien määrän koodeista. Fusion-piirin tuotenimi on AFS ja järjestelmäporttien määrä, esimerkiksi 1 500 000 portille AFS1500. Cortex-M1-prosessoria tukeva laite saa lisäkoodin M1, eli M1AFS1500. Lisäksi Actelilla on valittavissa Fusion-piirille tuet Pigeon Pointin ja MicroBladen tuotteille, joiden lisäkoodit ovat P1 ja U1. [11.]

Actel Fusion-piirin FPGA-ytimen logiikkamatriisin elementit sisältävät kolmituloiset LUT-lohkot. LUT-lohkot voidaan ohjelmoida miksi tahansa kolmituloiseksi logiikaksi, D-kiikkuksi tai tasoaktiiviseksi latch-kykimeksi. [11.]

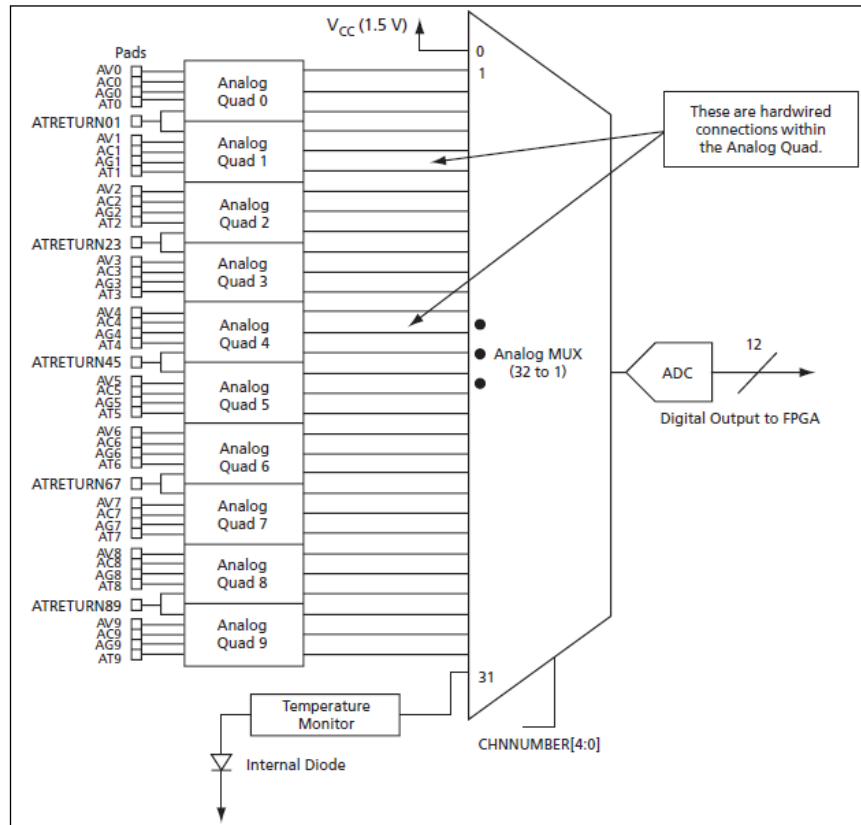
Fusion-piirin ympärille Actelilla on tarjolla kolme erilaista kehitysalustaa: Starter kit, Embedded development kit ja Advanced development kit. Tässä työssä käytettiin Embedded development kit -kehitysalustaa. [11.]

## 7.2 Analogialohko

### 7.2.1 Analogiatulot ja -multiplekseri

Yksi Fusion-piirin tärkeimmistä osa-alueista on sen analogialohko (kuva 8), joka tekee piirisarjasta erityisen. Fusion-piirin analogialohko koostuu kymmenestä analogialohkon nelikanavaisesta alilohkosta (Analog Quad). Jokaisessa alilohkossa on kolme tuloa ja yksi lähtö. Analogista lähtöä käytetään ohjaamaan Fusion-piirin ulkopuolista MOSFET- tai FET-transistoria. Kaiken kaikkiaan Fusion-piiri sisältää kolmekymmentä analogista tuloa ja kymmenen transistoreiden ohjauslähtöä. [10, s. 11.]

Analogialohko sisältää integroidun analogiamultiplekserin (kuva 8), jolla ohjataan analogisia tuloja AD-muuntimelle. Analogiamultiplekseri on kooltaan 32:1, eli multiplekseri sisältää 32 kanavaa, joista vain yksi ohjataan eteenpäin. Multiplekserin kanavista kolmekymmentä paikkaa vievät käyttäjän ohjelmoitavissa olevat analogiset kanavat (kanavat 1–30). Lisäksi kaksi paikkaa vievät Fusion-piirin sisäinen lämpötila-anturi (kanava 31) sekä FPGA-piirin 1,5 voltin käyttöjännite (kanava 0). Multiplekseriä ohjataan 5-bittisellä ohjausluvulla. [10, s. 127.]

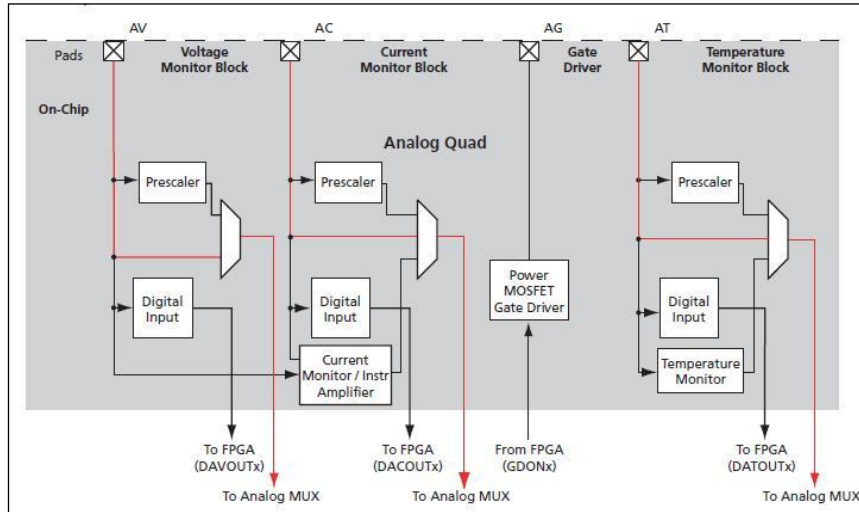


Kuva 8. Analogialohko. [12, s. 18.]

### 7.2.2 Analogialohkon alilohkot

Analogialohko sisältää nelikanavaisen alilohkon (kuva 9), jonka tarkoituksena on esivalmistella analogisia signaaleja, ennen kuin ne lähetetään AD-muuntimelle. Alilohkot on jaettu neljään osaan, joista jokaisella on oma tarkoituksensa. Alilohko sisältää kanavat AV, AC, AG ja AT, joista AV-, AC- ja AT-kanavat ovat lähes identtiset keskenään. Analogiatuloja voi myös käyttää LVTTIL-tasoisena digitaalisena sisääntulona. [10, s. 111–112.]

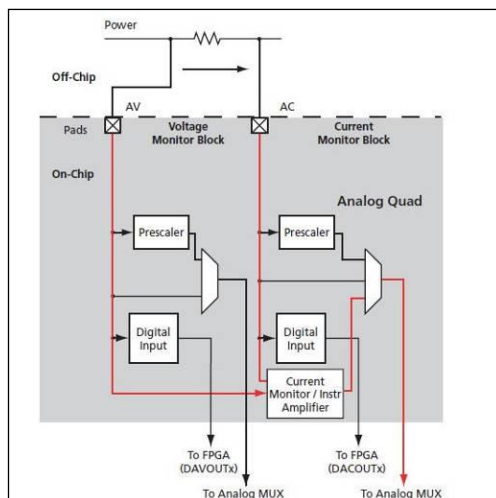
Alilohko sisältää yhden tavun kokoisen rekisterin, jolla voidaan määrittellä alilohkon asetukset. Alilohkoille voidaan määrittellä esimerkiksi kanavakohtaisesti polariteetti, esiskaalaimen käyttö ja skaalaimen skaalauksen jänniteväli (vahvistus). [13, s. 11.]



Kuva 9. Alilohkon rakenne. [12, s.19.]

AV-kanava on tarkoitettu jännitteen tarkkailuun. Jännitteen mittauskanava voidaan ohjelmoida ottamaan vastaan sisään tulevat jännitteet maksimissaan -12 voltista 0 volttiin tai 0 voltista 12 volttiin. [10, s. 111.]

AC-kanava on puolestaan tarkoitettu virran mittaamiseen. AC-kanava on muuten identtinen AV-kanavan kanssa, mutta se sisältää virran mittaamista varten oman virran mittaushlokon. Virta-lohkon jännitevälit ovat samat kuin jännite-lohkokolla. Virran mittaus itsessään perustuu jännitteen mittaamiseen AV- ja AC-kanavan väliin kytketyn pienen ulkoisen vastuksen (shunttivistus) yli (kuva 10). Tämä jännite vahvistetaan virranmittauslohkossa kymmenkertaiseksi ja ohjataan analogia-MUXin kautta AD-muuntimelle. [10, s. 116.]

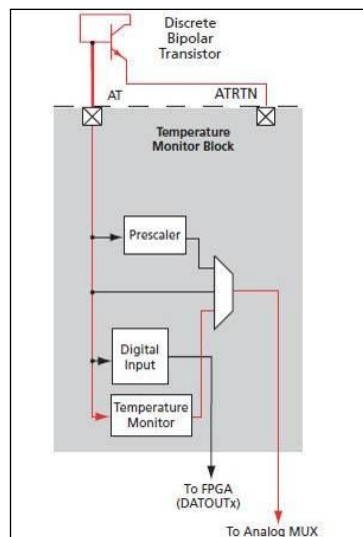


Kuva 10. Virranmittauksen periaatekytkentä. [12, s. 22.]

Virran mittaukseen valittava vastus pitää valita tarkkaan sovelluskohtaisesti, koska vastuksen yli jäävä jännite kerrotaan virran mittauslohkossa kymmenellä. Virran mittauksessa käytetään oletuksena AD-muuntimelle 2,56 voltin referenssiä, jota suurempaa ei saa jännitteestä tulla. Esimerkiksi käytettäessä yhden ohmin vastusta, jonka läpi kulkee yhden ampeerin virta, niin vastuksen yli jää yhden voltin jännite. Kun saatu jännite kerrotaan kymmenellä, AD-muuntimelle menee jo kymmenen voltia. Koska virran mittaus on unipolaarinen, mitattavan vastuksen yli olevan jännitteen pitää olla positiivinen. Virran mittauslohkon maksimitarkkuus on  $\pm 2$  millivoltia. Tarkkuus riippuu hieman mitattavasta jännitteestä. [10, s. 118.]

AG-kanavan tarkoituksena on FET:ien hilan (gate) ohjaaminen. Kanavalla on tarkoitus ohjata ulkoista FET:ä, jolla voidaan tehdä erilaisia jännitteen tai virran ohjaussovelluksia, kuten PWM-signaalia. [10, s. 112.]

AT-kanava on tarkoitettu lämpötilan tarkkailuun. Kanava on lähes identtinen AV-kanavan kanssa, mutta se ei kuitenkaan pysty käsittelemään negatiivista jännitettä ja maksimitulojännite on 16 voltia. AT-kanavaa voidaan käyttää lämpötilan tarkkailuun ulkoista puolijohdekytkentää käyttäen (kuva 11). Ulkoista kytkentää varten puolijohde täytyy kytkeä AT- ja ATRTN-kanaviin. Lämpötilan mittaus lohkoissa on nollakohtavirhettä (offset)  $+5$  °C [10, s. 125]. [10, s. 112.]



Kuva 11. Lämpötilan mittauskytkentä. [12, s. 24.]

Jännitettä mittaavissa tuloissa (AV, AC ja AT) on käytettävissä analogiamultiplekseri (MUX), jolla voidaan ohjata mitattava jännite AD-muuntimelle joko suoraan tai esiskaalaimen (pres-

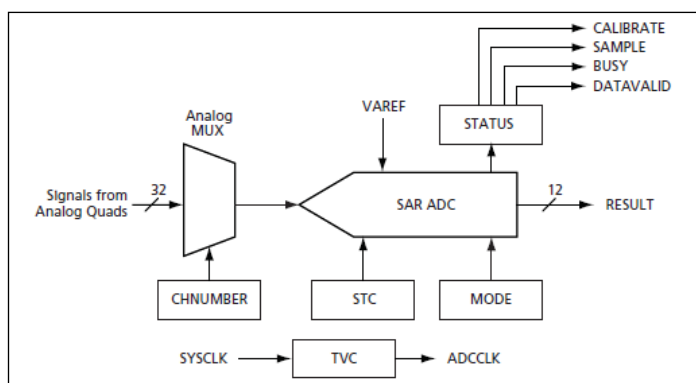


caler) kautta. Esiskaalain skaalaa nimensä mukaisesti mitatun jännitteen AD-muuntimelle sopivaksi, jolloin päästään aina parhaimpaan tarkkuuteen. Esiskaalaimelle on valittavana useita eri jännitevälisiä, joka käytännössä tarkoittaa vahvistusta, jotta mitattava jännite saadaan skaalattua mahdollisimman lähelle AD-muuntimen sisääntulon jänniteväliä. [12, s. 20.]

Esiskaalainten valittaville jänniteväleille on määritelty kiinteät vahvistuskertoimet. Suurin jänniteväli on 0 voltista 16 volttiin (vahvistuskerroin 0,15625) ja pienin 0 voltista 0,125 volttiin (vahvistuskerroin 20). Vaikka AV- ja AC-kanavien hyväksymä maksimimittausjännite on 12 volttia ja AT-kanavan 16 volttia, käytetään niille samaa suurinta esiskaalaimen jänniteväliä (0 voltista 12 volttiin). [10, s.148.]

### 7.2.3 AD-muunnin

Analogialohkon AD-muunnin (kuva 12) tukee 8, 10 ja 12 bitin resoluutioita. 12 bitin resoluutiolla teoreettinen maksiminäytteenottotaajuus on 500 000 näytettä sekunnissa. Resoluution ollessa 8 bittiä teoreettinen maksiminäytteenottotaajuus on 600 000 näytettä sekunnissa. AD-muunnin on tyypiltään SAR-muunnin, jonka kellotaajuus voidaan määrittellä väliltä 0,5 Hz – 10 MHz [10, s. 130]. Muuntimessa ei esiinny puuttuvaa koodia, maksimissaan INL-virhe on 1,80 LSB:tä ja DNL virhe 2,48 LSB:tä resoluution ollessa 12 bittiä. [10, s. 126.] [10, s. 144] [11.]



Kuva 12. Fusion-piirin AD-muunnin. [10, s. 129.]

SAR-tyyppinen AD-muunnin toimii siten, että se vertailee analogiatulosta saamaansa analogista jännitettä sisäisesti vertailujännitteeseen. Jännitettä kasvatetaan bitti kerrallaan MSB:stä LSB:hen varaamalla ja purkamalla sisäisiä kondensaattoreita. Kondensaattoreiden maksimi-

varausjännitteet puolittuvat aina kun siirrytään seuraavaa bittiin. Jos bitin muutoksen aikaansaama summautuva jännite on suurempi kuin vertailtavan tulon jännite, muunnin muuttaa kyseisen bitin ”0”-tilaan ja siirtyy seuraavaksi merkittävimpään bittiin. Kuitenkin jos summautuva jännite on pienempi, jättää muunnin bitin ”1”-tilaan. Kun vastaava jännite on löytynyt, AD-muunnin lähettää saamansa bittikombinaation lähtöön. Muuntimen huono puoli on se, että muunnettavan jännitteen on oltava vakio vertailun ajan. [13, s. 2.] [14, s. 4.]

Referenssijännitteenä AD-muunnin käyttää sisäistä 2,56 voltin jännitettä, jonka tarkkuus on  $\pm 23$  millivolttia [10, s. 144]. Referenssijännitteen voi myös syöttää ulkoisesti VAREF-nastaan, mutta jännitteen pitää olla hyvin tarkka ja stabiili. Referenssijännite voi olla maksimissaan 3,3 voltia. Kuitenkin yleensä käytetään sisäistä 2,56 voltin referenssijännitettä, jolloin AD-muuntimen jännitealue on 0 voltista 2,56 volttiin. Kaikkia suurempia tai pienempiä tutkittavia jännitteitä pitää vahvistaa tai vaimentaa analogialohkon alilohkoissa olevilla esiskaalaimilla AD-muuntimen jännitealueeseen sopivaksi. Jos esiskaalainta ei haluta käyttää, täytyy sisään tulevan jännitteen olla korkeintaan referenssijännitteen suuruinen. AD-muuntimen resoluutio riippuu käytetystä referenssijännitteestä ja valitusta bittimäärästä. LSB-bitin jännitearvo saadaan laskettua kaavasta 3. [10, s. 548.] [13, s. 1.]

$$U_{RES} = \frac{U_{REF}}{2^N} \quad (3)$$

AD-muuntimessa on automaattinen kalibrointi. Kalibrointi tehdään aina Fusion-piirin käynnistyksen yhteydessä sekä jokaisen AD-muuntimen tekemän muunnoksen jälkeen. Tällä dynaamisella kalibroinnilla pyritään ehkäisemään lämpötilan aiheuttamat muutokset AD-muuntimen toimintaan. [10, s. 129.]

Taulukossa 1 on esitetty AD-muuntimen tärkeimpiä suorituskykyyn liittyviä ominaisuuksia kuten signaalikohinasuhde (SNR), harmoninen särö (THD), efektiivisten bittien määrä (ENOB) ja signaalin, kohinan ja särön tehojen suhde kohinan ja särön tehoon (SINAD).

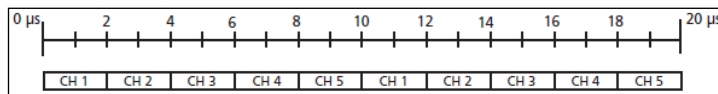
Taulukko 1. AD-muuntimen ominaisuuksia. [10, s. 145.]

	SNR	SINAD	THD	ENOB
12 bittiä	62,9 dB	64,2 dB	-77,9 dBc	10,4 bittiä
10 bittiä	60,0 dB	59,8 dB	-78,3 dBc	9,6 bittiä
8 bittiä	49,5 dB	49,5 dB	-74,4 dBc	7,9 bittiä

Taulukosta 1 nähdään että AD-muuntimella ei päästä todellisuudessa 12 bitin resoluutioon, vaan tarkkuus jää lähes 10 bitin tilaa vastaavaksi. Kuitenkin SNR ja SINAD ovat huomattavasti paremmat 12 bitillä kuin 10 bitillä, joten jos tarvitaan laajempaa signaalin tehoskaalaa, tässä suhteessa 12 bitin muunnin on paljon parempi. Harmoninen särö on kuitenkin 12 bitin muuntimella hieman suurempi kuin 10 bitin muunnoksella.

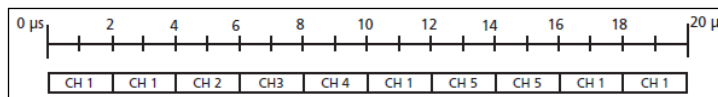
Fusion-piirin analogialohko on suunniteltu hyvin käyttäjäystävälliseksi. Käyttäjä voi tarvittaessa määrittellä AD-muuntimen kellotaajuuden ja näytteenottotaajuuden itse. Lisäksi näytteenottotaajuus ja näytteiden määrä voidaan määrittellä kanavakohtaisesti, jos käytetyssä järjestelmässä tarvitaan tarkempia tuloksia jostakin kriittisestä kanavasta. Koska analogialohkoon ei ole tehty sisäistä kanavien näytteistysjärjestystä, niin näytteet voidaan ottaa missä järjestyksessä tahansa ohjaamalla analogiamultiplekseriä 5-bittisellä ohjausluvulla. [13, s. 7–8.]

Kuvassa 13 on esitetty näytteenotto vakio muunnosajalla ja tasavertaisesti kanavien kesken. Tällaisella toteutuksella saadaan jokaiselle kanavalle sama näytteenottotaajuus ja tarkkuus. [13, s. 8.]



Kuva 13. Näytteenotto tasavertaisesti. [13, s. 8.]

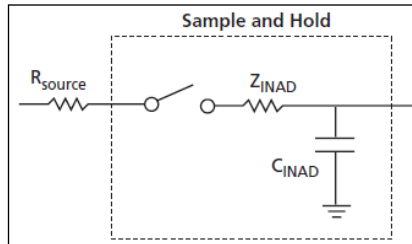
Kuvassa 14 on puolestaan esitetty tilanne, jossa näytteenoton muunnosaika on edelleen vakio. Kuitenkin näytteenotto on painotettu tietylle kanavalle. Tällaisella toteutuksella saadaan tietylle kanavalle suurempi näytteenottotaajuus kuin muille kanaville. [13, s. 8.]



Kuva 14. Näytteenotto jossa on tasavertainen muunnosaika ja kanavapainotus. [13, s. 8.]

Näytteenotossa voidaan joissakin tapauksissa tarvita tietylle kanavalle suurempi muunnosaika kuin toisille. Tämä johtuu siitä että jännitteen muunnoksessa käytettävien kondensaattoreiden varautuminen hidastuu, jos kanavaa syöttävän lähteen impedanssi ( $R_{\text{SOURCE}}$ ) on suuri (kuva 15). Tällöin AD-muuntimen tarvitsema varautumisaika ( $t_{\text{sample}}$ ) kasvaa, eivätkä kondensaattorit varaudu kokonaan ennen kuin AD-muunnin tekee jännitevertailut ja muunnokset. Tämän varautumisajan kanssa ongelmia tulee etenkin silloin, kun ei käytetä analogialohkojen

esiskaalaimia. Kun skaalain on käytössä, oletuksena käytetään 10 mikrosekunnin varautumis-aikaa. [13, s. 7–10.]

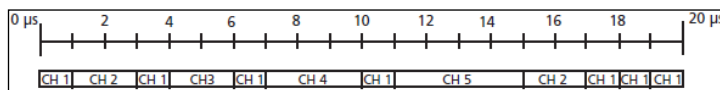


Kuva 15. Muunnoslohko. [13, s. 9.]

Tarvittava muunnosaika voidaan laskea kaavasta 4, jossa  $R$  on sisäisen ja ulkoisen impedanssin summa ( $R_{SOURCE}$  ja  $Z_{INAD}$ ),  $C$  on AD-muuntimen varattavien kondensaattoreiden kapasitanssi ( $C_{INAD}$ ),  $V_{IN}$  on AD-muuntimen maksimisisäntulojännite, eli käytetty referenssi-jännite ja  $LSB$  on käytetystä AD-muuntimen resoluutiosta riippuva yhden bitin jännitearvo. Sisäinen impedanssi on  $2\text{ k}\Omega$ :a ja kondensaattorit ovat  $18\text{ pF}$ :n suuruisia [10, s. 144]. [13, s. 10.]

$$t_{sample} = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{V_{IN}}{0,5 \cdot LSB}\right) \quad (4)$$

Kuvassa 16 on esitetty tilanne, jossa kanavilla on eri muunnosajat. Lisäksi kanavien näytteenotto on painotettu tietyille kanavalle. Tällä saadaan aikaiseksi eri näytteenottotaajuuudet kanavien välillä sekä eri muunnosajat, jos kanavien ulkoiset impedanssit poikkeavat toisistaan. [13, s. 9.]



Kuva 16. Näytteenotto jossa muunnosaika ja kanava on painotettu. [13, s. 9.]

AD-muuntimen kellotaajuus riippuu käytetystä järjestelmän kellotaajuudesta. Muuntimen kellotaajuus saadaan laskettua käyttämällä kaavaa 5. Kuitenkin AD-muuntimen maksimikellotaajuus on rajattu maksimissaan  $10\text{ MHz}$ :iin. [13, s. 4.]

$$f_{ADC\_CLK} = \frac{f_{SYS\_CLK}}{4 \cdot (TVC\_reg + 1)} \quad (5)$$

Kaavassa 5 oleva TVC\_reg-rekisteri saa arvoja väliltä 0–255. Tällä rekisterillä estetään automaattisesti arvoa kasvattamalla AD-muuntimen kellotaajuuden nousu yli 10 MHz:n. Kaavan järjestelmän kellotaajuuden jakajasta johtuen täyttä AD-muuntimen kellotaajuutta ei välttämättä saavuteta kaikilla kellotaajuuksilla. Esimerkiksi kellotaajuuden ollessa 40 MHz on AD-muuntimen kellotaajuus 10 MHz ja jos järjestelmän kellotaajuus on 50 MHz jää AD-muuntimen kellotaajuus 6,25 MHz:iin jakajasta johtuen. [13, s. 4.]

Näytteenottotaajuus voidaan määrittellä joko koko järjestelmän näytteenottotaajuutena (kaava 6) tai kanavakohtaisena (kaava 7), jos halutaan tietää kanavakohtainen näytteenottotaajuus. [13, s. 8.]

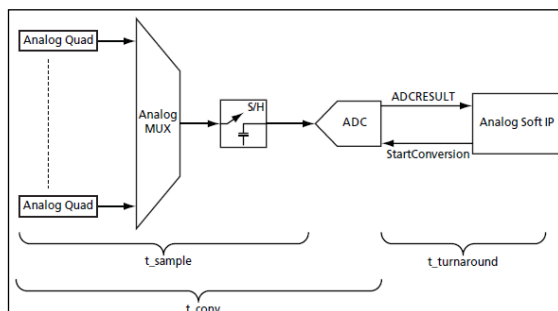
$$f_{SYS\_sample\_rate} = \frac{N_{TOT\_samples}}{t_{TOT\_all\_samples}} \quad (6)$$

Kaavassa 6  $N_{TOT\_samples}$  on kaikkien näytteiden määrä yhteensä ja  $t_{TOT\_all\_samples}$  näytteiden aika yhteensä.

$$f_{CHAN\_sample\_rate} = \frac{N_{TOT\_samples\_for\_channel}}{N_{TOT\_samples}} \cdot f_{SYS\_sample\_rate} \quad (7)$$

$N_{TOT\_samples\_for\_channel}$  on jonkin kanavan näytteiden määrä ja  $N_{TOT\_samples}$  on kaikkien näytteiden määrä yhteensä sekä  $f_{SYS\_sample\_rate}$  on järjestelmän näytteenottotaajuus, joka saadaan kaavasta 5 tai 8.

AD-muuntimen näytteenottotaajuus määräytyy muuntimen muunnosajasta (Conversion Time) ja näytteen käsittelyajasta (Turnaround Time) (kuva 17), eli ajasta joka menee kun analogia-IP-lohko käsittelee näytteen ja antaa uuden muunnoskäskyn muuntimelle. [13, s. 4.]



Kuva 17. AD-muuntimen muunnosaika. [13, s. 4.]

Näytteenottotaajuus saadaan laskettua käyttämällä kaavaa 8.

$$SampleRate = \frac{1}{t_{Conversion} + t_{Turnaround}} Hz \quad (8)$$

Näytteen käsittelyaika ( $t_{Turnaround}$ ) vie keskimäärin kymmenen järjestelmän kellotaajuuden jaksoa (kaava 9).

$$t_{Turnaround} = 10 \cdot t_{SYS\_CLK} \quad (9)$$

Kellotaajuuksien jaksonajat saadaan laskettua käyttämällä kaavaa 10.

$$t_{period} = \frac{1}{f_{CLK}} \quad (10)$$

AD-muuntimen muunnokseen kuluva aika ( $t_{Conversion}$ ) saadaan laskettua käyttämällä kaavoja 11–16. [9, s. 4–5]

$$t_{conversion} = t_{sync\_read} + t_{sample} + t_{distrib} + t_{post\_cal} + t_{sync\_write} \quad (11)$$

$t_{conversion}$  on AD-muuntimen muunnoksen tekemiseen kuluva aika.

$$t_{sync\_read} = t_{SYS\_CLK} \quad (12)$$

$t_{sync\_read}$  on aika mikä kuluu MUX:n tulon ohjaamiseen AD-muuntimelle.

$$t_{sample} = (2 + STC) \cdot t_{ADC\_CLK} \quad (13)$$

$t_{sample}$  on aika jonka analogisen sisääntulosignaalin täytyy ladata kondensaattoreita. STC saa arvoja väliltä 0–255 ja sillä pidennetään pitoaikaa.

$$t_{distrib} = resolution \cdot t_{ADC\_CLK} \quad (14)$$

$t_{distrib}$  on muuntimen varattujen kondensaattoreiden läpikäymiseen kuluva aika.

$$t_{post\_cal} = 2 \cdot t_{ADC\_CLK} \quad (15)$$

$t_{post\_cal}$  on AD-muuntimen jälkikalibrointiin kuluva aika.

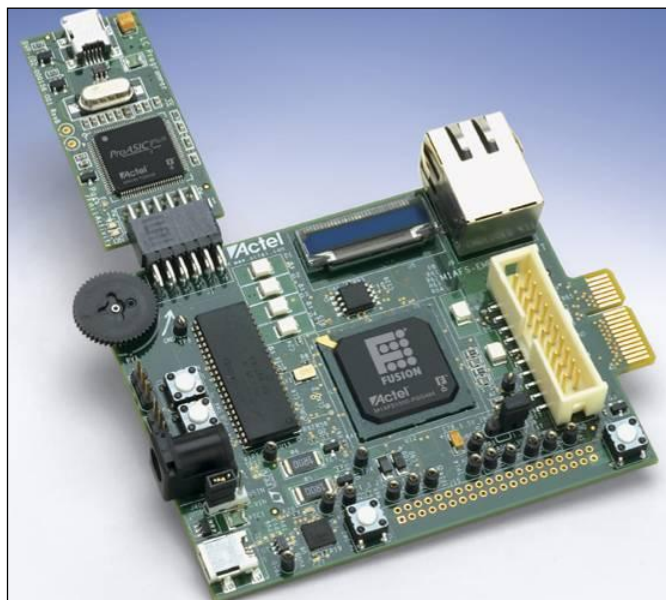
$$t_{sync\_write} = t_{SYS\_CLK} \quad (16)$$

$t_{sync\_write}$  on ulostulevan datan lähettämiseen kuluva aika.

## 8 ACTEL FUSION EMBEDDED DEVELOPMENT KIT

### 8.1 Yleistä

Tässä työssä käytetty Fusion-kehitysalusta on Embedded Development Kit (kuva 18). Alusta sisältää 484-pinnisen BGA-koteloidun sekasignaali-FPGA-Fusion-piirin, johon mahtuu 1 500 000 järjestelmäporttia. Kehitysalusta tukee myös ARM Cortex-M1 -prosessoria, jota voidaan käyttää piirille tehtävissä kytkennöissä. Kehitysalustan tarkka mallimerkintä on Actel Fusion M1AFS1500 Embedded Development Kit.

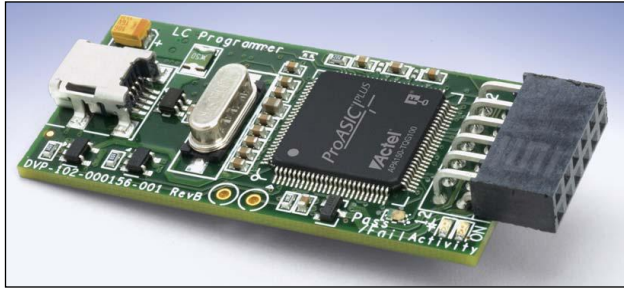


Kuva 18. Actel Fusion Embedded Development Kit. [12, s. 5.]

Embedded Development Kit on suunniteltu alhaisia kustannuksia silmällä pitäen. Alustalle on valittu vain tärkeimmät ominaisuudet, joilla kuitenkin voidaan näyttää Fusion-piirin ominaisuuksia ja suorituskykyä. [12, s. 7]

Kehitysalustaa ohjelmoidaan LCPS-FlashPro3-ohjelmointimoduulilla (kuva 19), jota ohjataan USB-kaapelin kautta tietokoneella. LCPS-ohjelmointikortti perustuu perinteisiin FlashPro3-ohjelmointilaitteisiin ja on siten täysin yhteensopiva muiden mallien ohjelmointityökaluihin. Ohjelmointimoduulin suunnitteluperiaatteina ovat olleet myös alhaiset kustannukset, kuten kehitysalustassa. [12, s. 44.]





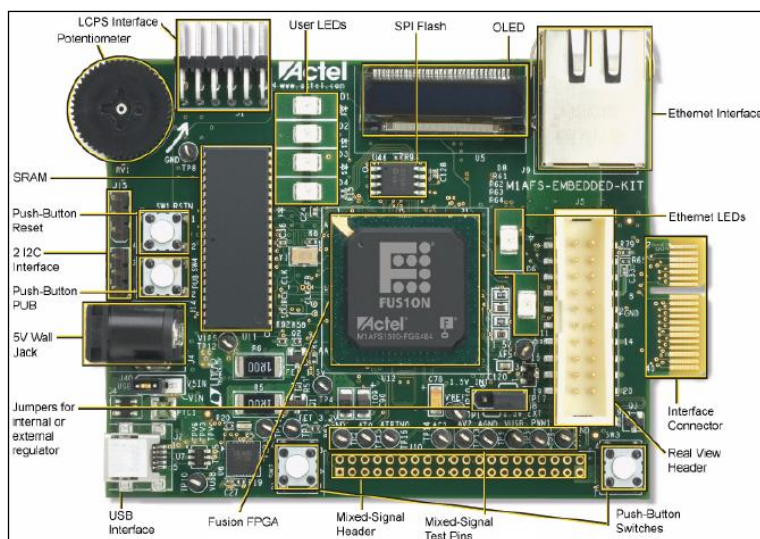
Kuva 19. LCPS-ohjelmointikortti. [12, s. 44.]

Embedded Development Kit on RoHS-direktiivin mukainen laite [15]. Myös LCPS-ohjelmointikortti on suunniteltu direktiivin mukaiseksi [12, s. 44].

RoHS-direktiivin mukaisuus tarkoittaa, että tuotteessa on käytetty hyvin vähän tai ei ollenkaan tiettyjä direktiivin rajoittamia vaarallisia aineita, kuten lyijyä tai elohopeaa. Vaarallisten aineiden vähentämisellä pyritään suojelemaan ihmisten terveyttä ja vähentämään ympäristöä myrkyttävien elektroniikkajätteiden määrää. Direktiivi on tullut voimaan 1.7.2006, ja se koskee Euroopan talousalueen markkinoille tuotuja sähkö- ja elektroniikkalaitteita. [16.]

## 8.2 Kehitysalustan ominaisuudet

Kuvassa 20 on esitetty kehitysalustan ominaisuuksia ja lisälaitteita, joista käydään läpi työssä tarvittavat osa-alueet.



Kuva 20. Actel Fusion Embedded Development Kit -kehitysalustan ominaisuudet. [12, s. 7.]

## Käyttöliittymän komponentit

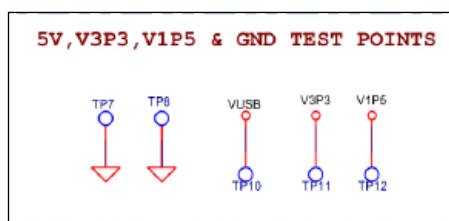
Kehitysalusta sisältää yhteensä neljä painiketta, joista kaksi on käyttäjän ohjelmoitavissa olevaa painiketta sekä RESET- ja PUB-painikkeet. PUB-painike on kytketty Fusion-piirin digitaaliseen PUB-sisääntuloon. PUB-painiketta voidaan käyttää esimerkiksi alustan herättämiseen unitilasta. Alustalla on myös neljä käyttäjän ohjelmoitavissa olevaa LED:ä sekä kaksi verkkotoimintaa ilmaisevaa LED:iä nopeudelle ja aktiivisuudelle [12, s. 38].

Demo-ohjelmien analogiamittausten demonstroimista varten alustalla on valmiina 5 k $\Omega$ :n potentiometri, jolla voidaan muuttaa portaattomasti mitattavaa jännitettä ja virtaa. Potentiometri on myös käyttäjän ohjelmoitavissa omiin sovelluksiinsa. [15.]

## Käyttöjännitteet

Kehitysalustalla on kaksi eri vaihtoehtoa käyttöjännitteelle. Käyttöjännitteen voi ottaa joko ulkoisesta 5 V:n muuntajasta tai USB-liittimen kautta tietokoneelta [15]. Koska kehitysalustalla ei ole automatiikkaa, joka vaihtaisi käyttöjännitteen automaattisesti, niin käyttöjännite valitaan käsin jumpperilla [12, s. 29].

Kehitysalustan 5 voltin käyttöjännitteestä tehdään kolme eri sisäistä jännitettä: 10 voltia, 3,3 voltia ja 1,5 voltia. Jännitteistä 10 voltia on tarkoitettu OLED-näytölle, 3,3 voltin jännite on yleinen käyttöjännite sekä I/O-linjojen ”1”-tilan jännite ja 1,5 voltin jännitettä puolestaan käyttävät FPGA-ydin ja ohjelmointityökalut. Lisäksi tarvittaessa saadaan kortille syötettävä 5 V:n käyttöjännite otettua ulos, käytettäväksi omiin kytkentöihin, USB-liittimen käyttöjännitteen testipinnistä TP10 (kuva 21). [12, s. 29.]



Kuva 21. Käyttöjännitteiden testipinnit. [17, s. 2.]

1,5 voltin jännitteelle on alustalla kaksi eri vaihtoehtoista regulaattoria, sisäinen ja ulkoinen, joista voidaan jumpperilla valita haluttu regulaattori. Sisäistä regulaattoria käytettäessä pitää regulaattorin käyttö ottaa huomioon kytkentää suunnitellessa. [12, s. 11.]

## Muistit

Kehitysalustalla on Fusion-piirin sisäisten muistien lisäksi 2 MB SPI-flash-muistia. Muisti koostuu yhdestä flash-muistilohkosta, jossa on nimensä mukaisesti SPI-väylätuki. SPI-väylä on täysin kaksisuuntainen (full duplex) ja nopeampi kuin I<sup>2</sup>C-väylä. Muistia voidaan helposti ohjata sulautetulla prosessorilla ja SPI-väylän ohjausta varten suunnitellulla IP-lohkolla. [12, s. 43]

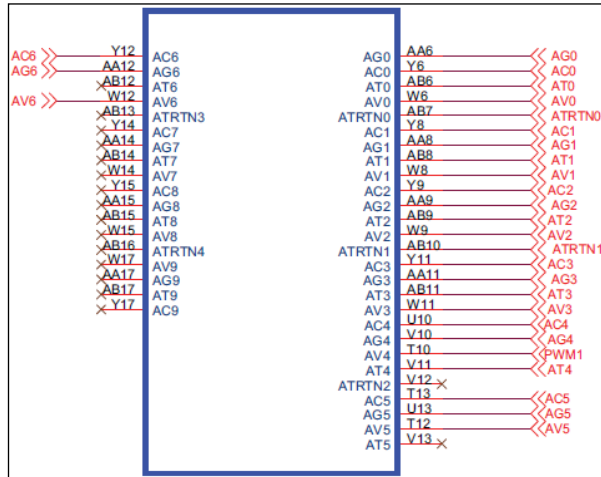
SRAM-muisti on rakennettu kahdesta komponentista, ja sen koko on yhteensä 512 kB. Molemmilla komponenteilla on omat 16-bittiset dataväylät, jotka on kytketty siten, että dataväylä on kokonaisuudessaan 32-bittinen. SRAM on tarkoitettu järjestelmän laajennusmuistiksi sisäisten muistien lisäksi. Muistiin pääsee helposti käsiksi sulautetuilla prosessoreilla ja muistien ohjaukseen tarkoitetuilla IP-lohkoilla. [12, s. 42.]

## USB-liittimet

Tilan säästämisen vuoksi kehitysalustalle ei ole laitettu normaalia sarjaporttia vaan USB-liitin, jossa on integroitu USB to UART -kontrolleri sarjayhteyttä varten. USB-liitin on myös ESD-suojattu, eli se on suojattu staattiselta sähköltä. Tämän liittimen avulla mikä tahansa normaali UART-kontrolleri voidaan liittää Fusion-piiriin. Fusion-piirin UART-kontrolleri tukee synkronista ja asynkronista yhteyttä. Normaalisti liitintä käytetään yhdistettäessä kehitysalusta tietokoneeseen esimerkiksi Hyperterminal-ohjelman avulla. USB to UART -yhteyttä varten tietokoneeseen täytyy asentaa ajurit, koska yleensä tietokoneet eivät alkuperäisillä ajureilla osaa ohjata USB:n kautta sarjayhteyttä. [12, s. 40.]

## Sekasignaali-liitin

Vaikka kehitysalusta sisältää suurimman ja tehokkaimman Fusion-piirin mitä Actelilla on tarjota, ei sen kaikkia mahdollisia käytettävissä olevia analogiatuloja ole otettu käyttöön (kuva 22). Käyttöön otetuista analogiatuloista on lisäksi osa jo valmiiksi käytössä. Analogiatuloja on otettu käyttöön alustan toimintakuntoon liittyvien suureiden mittaamista varten. Käyttöjännitteistä 1,5 voltin ja 3,3 voltin virran ja jännitteiden mittaukset on kytketty analogiakanaviin AV0 ja AC0 (3,3 V) sekä AV1 ja AC1 (1,5 V). Lisäksi alustalla oleva potentiometri on kytketty analogiakanavaan AC4 ja alustan sisältämä lämpötila-anturi kanavaan AT2. [12, s. 21–23.]

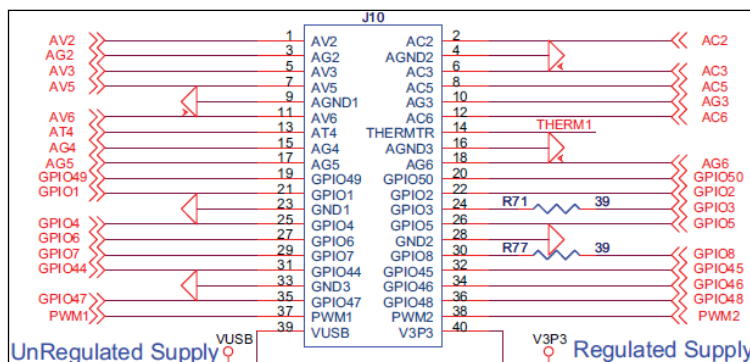


Kuva 22. Kehitysalustan analogiatulot. [12, s. 15.]

Sekasignaali-liittimeen on tuotu vapaana olevat analogiatulot ja -lähdöt, digitaalisia tuloja sekä PWM-piirien lähdöt (kuva 23).

Käyttäjän käytettävissä olevat analogiatulot (kuva 23):

- jännite: AV2, AV3, AV5 ja AV6
- virta: AC2, AC3, AC5 ja AC6
- lämpötila: AT4
- MOSFET:n hilan ohjaimet: AG2, AG3, AG4, AG5 ja AG6



Kuva 23. Kehitysalustan sekasignaali-liitin. [12, s. 26.]

Kehitysalustalla on siis käyttäjän käytettävissä vain neljätoista analogikanavaa analogialohkon 32 kanavasta. Näistä kanavista yhdeksää (AV-, AC- ja AT-kanavat) voi käyttää jännitteen mittaukseen, neljää (AC-kanavat) virran mittaukseen ja yhtä (AT-kanava) lämpötilan mittaukseen.

## 9 MITTAUSPIIRILEVYN TOTEUTUS

Työssä tutkittiin kehitysalustan suorituskykyä elektroniikkatuotteen toimintakunnon seurannan yhteydessä. Käytännössä tämä toteutettiin siten, että suunniteltiin ja toteutettiin piirikortti, jossa on virran, jännitteen ja lämpötilan mittaus mahdollisuudet. Tämä piirikortti toimi elektroniikkatuotteena, jonka toimintakuntoa tarkkailtiin.

### 9.1 Jännitteen mittauskytkentä

Jännitteen mittaus voitiin suorittaa analogialohkon alilohkojen AV-, AT- ja AC-kanavilla. Työssä käytetyssä kehitysalustassa oli vapaana yhdeksän ulkoista tuloa jännitteen mittaukseen. Lisäksi voitiin samaan aikaan mitata valmiiksi varatuilla tuloilla kortin käyttöjännitteitä, sekä potentiometrin jännitettä.

Käyttöjännitteeksi valittiin kehitysalustalta saatava 3,3 voltia. Jännitteen jako tehtiin 1 k $\Omega$ :n vastuksilla, joita laitettiin sarjaan kymmenen kappaletta. Tällöin jokaisessa mittapisteessä on aina kymmenesosa käyttöjännitettä pienempi jännite. Lisäksi vastussarjan eteen laitettiin 5 k $\Omega$ :n potentiometri, jolla voidaan haluttaessa säätää arvoja. Potentiometri on normaalitapauksissa yleensä säädetty minimiin. Jokainen mittapiste yhdistettiin kytkentärimaan, josta jännite saatiin helposti kytkettyä kehitysalustalle johdolla.

Koko kytkennän läpi menevä maksimivirta saadaan Ohmin laista (kaava 17) ratkaisemalla virta  $I$ , kun potentiometri on nollassa.

Ohmin laki:

$$U = R \cdot I \tag{17}$$

Kytkenän läpi menevä kokonaisvirta:

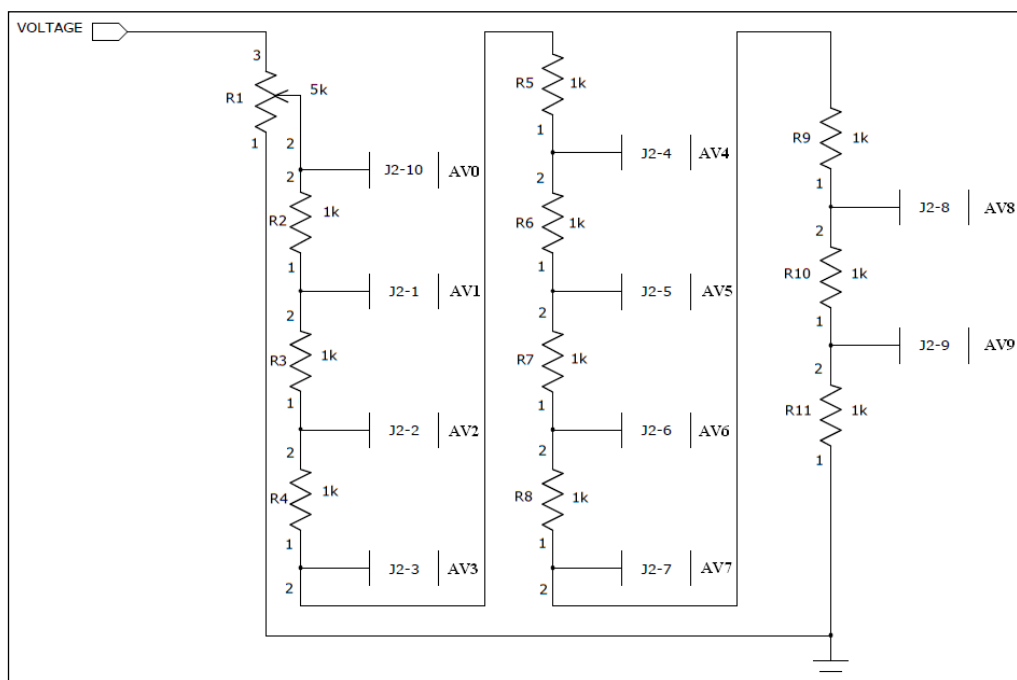
$$U_{Vcc} = R_{KOK} I \Rightarrow I = \frac{U_{Vcc}}{R_{KOK}} = \frac{3,3 V}{10 k\Omega} = 0,33 mA$$

Kun tiedetään kokonaisvirta, niin voidaan laskea yhden vastuksen ylijäävä jännite ratkaisemalla Ohmin laista (kaava 17) jännite  $U$ .

$$U_{V_{cc}} = R_{1k} I = 1000\Omega \cdot 0,33mA = 0,33V$$

Eli jokaiseen vastukseen jää teoriassa 0,33 voltin jännite, jolloin on helppo tarkastaa mittauksia tehdessä, että tekeekö koodi muunnokset oikein.

Kuvassa 24 on esitetty PADS:lla suunniteltu jännitteen mittauskytkennän Logic-kuva. Kuvassa oleva VOLTAGE on kytkennän käyttöjännite, joka kytkeytyy käsivalintaiseen käyttöjännitteen valintaan. Vastusten välistä lähtevät AV-liittimet (AV0 - AV9) ovat kytkentöjä liittinrimaan, josta jännitteet kytketään kehitysalustalle.



Kuva 24. Jännitteen mittauskytkentä.

## 9.2 Virran mittauskytkentä

Virran mittaukseen tarvitaan jokaisesta analogialohkon alilohkosta kaksi tuloa AV ja AC. Näiden kahden tulon väliin asetetaan noin yhden ohmin vastus, shunttivistus, jonka yli olevaa jännitettä piiri tarkkailee. Kehitysalustalla on jo valmiina kaksi erillistä sisäistä virranmittausta käytössä. Ulkoisia mittauksia työssä käytetylle kehitysalustalle saatiin neljä, joten yhteensä virran mittauksia saatiin kerralla kuusi.

Suunnittelun aluksi täytyi selvittää, paljonko kehitysalusta pystyy antamaan virtaa käytettävällä käyttöjännitteellä, jotta virrat voitiin mitoittaa sopiviksi. Kehitysalustan käyttöoppaasta nähdään että alustalta saa maksimissaan yhden ampeerin virran 3,3 V:n käyttöjännitteellä [13, s.29]. Suunnittelussa ehdottomaksi maksimivirraksi otettiin 500 milliampeeria, etteivät komponentit tai kehitysalusta varmasti menisi rikki mittausten yhteydessä. Virroiksi valittiin kiinteät ja mahdollisimman tasalukuiset arvot, jotta mittauksista nähtäisiin helposti menevätkö ne oikein. Virta-arvoiksi valittiin 1 mA, 5 mA, 10 mA, 50 mA ja 100 mA. Yhteensä maksimivirraksi näistä tuli 166 milliampeeria, jolloin ei ollut vaaraa, että kehitysalusta vioittuisi mittauksissa. Lisäksi 100 milliampeerin virralle laitettiin 10 k $\Omega$ :n potentiometri, jolla virran arvoa voitaisiin tarvittaessa kätevästi muuttaa portaattomasti. Kuitenkin potentiometri on normaalityypisissä säädettyinä maksimiin, jotta kehitysalusta ei turhaan kuormittuisi. Virrat saatiin aikaiseksi yksinkertaisesti valitsemalla sopiva virranrajoitusvastus. Vastuksen mitoittamisessa käytettiin Ohmin lakia (kaava 17), josta esimerkkinä on laskettu yhden milliampeerin virran vastus. Virtojen vaatimat vastukset on esitetty taulukossa 2.

$$U = R \cdot I \Rightarrow R = \frac{U}{I}$$

$$I = 1 \text{ mA:}$$

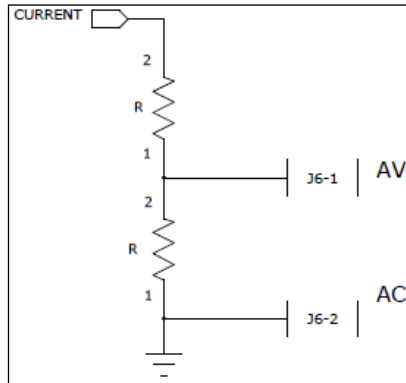
$$R = \frac{U_{vcc}}{I} = \frac{3,3V}{1mA} = 3300 \Omega$$

Taulukko 2. Virtojen vaatimat vastusarvot.

Virta (mA)	Vastus ( $\Omega$ )
1	3300
5	660
10	330
50	66
100	33

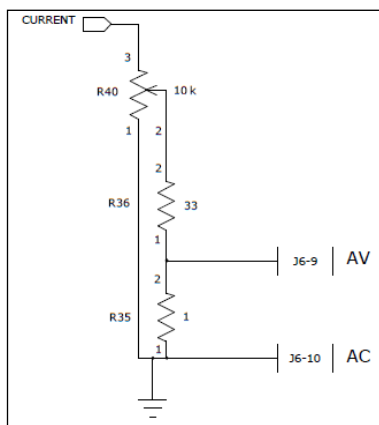
Kuvissa 25 ja 26 on esitetty PADS:lla suunnitellut kytkentöjen Logic-kuvat. Koska virtaa mitataan jännitteen avulla, täytyi kytkentöihin laittaa niin sanottu shunttivastus. Mittaamalla vastuksen yli oleva jännite, voidaan laskea virran suuruus. Actel suosittelee käytettäväksi vastuksena yhden ohmin vastusta, kun virran suuruus on 50 milliampeerista 100 milliampeeriin [10, s. 119]. Nämä vastukset laitettiin sarjaan virranrajoitusvastusten kanssa. Vastusten todellinen arvo oli 1,1  $\Omega$ :a. Vastussarjoja tuli piirilevyille yhteensä viisi kappaletta, jotka olivat keskenään rinnakkain kytkettyinä. Mittauksia varten shunttivastuksen molemmiin puoliin yhdis-

tettiin johdin kytkentärimaan, josta jännite saadaan kytkettyä kehitysalustalle johdolla. Kuvissa 25 ja 26 olevat CURRENT-linjat ovat kytkentöjen käyttöjännitteet, jotka kytkeytyvät käsi- valintaiseen käyttöjännitteeseen valintaan.



Kuva 25. Virran mittauskytkentä.

Kuvassa 26 on esitetty suurimman virran (100 mA) kytkentä, jossa on lisäksi 10 k $\Omega$ :n potentiometri.



Kuva 26. Mittauskytkentä 100 milliampeerin virralle.

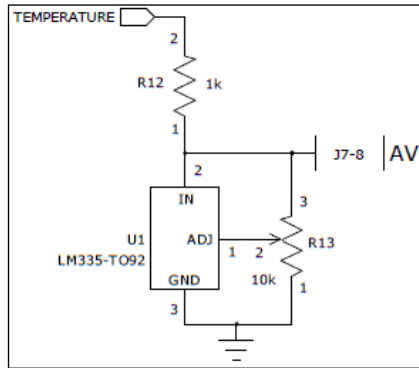
### 9.3 Lämpötilan mittauskytkentä

Työssä käytetyllä kehitysalustalla oli lämpötilan mittaukseen tarkoitettuja kanavia (AT) otettu käyttöön vain yksi, jolloin työhön olisi saatu vain yksi ulkupuolinen mittaus kahden sisäisen mittauksen lisäksi.





Kuvassa 28 on esitetty PADS:lla suunniteltu kytkennän Logic-kuva. Kuvassa oleva TEMPERATURE on kytkennän käyttöjännite, joka kytkeytyy käsivalintaiseen käyttöjännitteeseen valintaan.

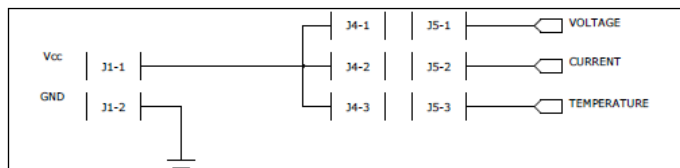


Kuva 28. Lämpötilan mittauskytkentä.

#### 9.4 Käyttöjännitteet

Koska mittausalusta sisältää kolme eri kytkentäkokonaisuutta, haluttiin, että jokaiseen saataisiin käyttöjännite tarvittaessa yksitellen. Tällä ehkäistiin virran kulutusta kasvamasta liian suureksi, jos kaikki kytkennät olisivat yhtäaikaan kytkettyinä. Koska jännitteen ja virran mittaukset on suunniteltu 3,3 voltin käyttöjännitteelle sekä lämpötilan mittaus 5,0 voltin käyttöjännitteelle, niin valittavalla käyttöjännitteellä saadaan jokaiselle mittauskytkennälle oikea käyttöjännite.

Kuvassa 29 on esitetty PADS:lla suunniteltu kytkennän Logic-kuva. Käyttöjännitteen valinta päätettiin toteuttaa yksikertaisella jumpperikytkennällä, jossa sisään tulee tietty jännite kerrallaan joka ohjataan jumpperilla oikeaan kytkentään. Kuvassa olevat VOLTAGE, CURRENT ja TEMPERATURE kytkeytyvät kunkin mittauskytkennän käyttöjännitteeseen.



Kuva 29. Käyttöjännitteet.

## 9.5 Mittauspiirilevyn valmistaminen

Kytkeköiden suunnittelut toteutettiin Mentor Graphicsin PADS 2005 -ohjelmistolla. Sähköiset kytkennät suunniteltiin PADS Logic -ohjelmalla ja fyysiset kytkennät toteutettiin PADS Layout- sekä PADS Router -ohjelmilla.

Mittauspiirilevyn jokainen osa-alue haluttiin selkeästi omaksi osakseen levyille ja mahdollisimman selkeästi jäsennellyksi, jolloin oikeiden jännitteiden mittaaminen olisi helppoa. Piirilevyn kooksi valittiin 10 cm x 10 cm, jolloin komponentit saatiin sijoiteltua suhteellisen helposti ja väljästi. Lopulta päädyttiin sijoittamaan jännitteen piirilevyn oikeaan laitaan, virran mittaus keskelle alas ja lämpötilan mittaukset levyn vasempaan laitaan ja ylälaitaan. Tavoitteena oli myös piirilevyn yksinkertaisuuden saavuttamiseksi saada levy suunniteltua yksipuoleiseksi. Piirilevyn PADS Logicilla tehdyt kytkennät ovat kokonaisuudessaan esitetty liitteissä 1/1–1/3 ja niiden pohjalta tehdyt Layout-kytkennät liitteessä 1/4. Layout-kuvassa huomioitava, että kyseessä on näkymä piirilevyn alapuolelta (bottom view).

Piirilevy päätettiin toteuttaa perinteisesti jyrsimällä. Piirilevy jyrsittiin Kajaanin AMK:lta löytyvällä Bungard BEL CCD versio 4.00 jyrsinlaitteistolla (kuva 30). Jyrsimen vaatimat Gerber- ja Excellon-tiedostot tehtiin PADS 2005 -ohjelmiston Layout-ohjelmalla. Jyrsintä varten tehdyt tiedostot avattiin ja muokattiin MDA electronicsin IsoCAM-ohjelmalla. Jyrsintä ohjattiin MDA electronicsin RoutePro 2000 versio 220.040205 -ohjelmalla. Liitteessä 2 on esitetty kuvat valmiista piirilevystä.



Kuva 30. Bungard BEL piirilevyn jyrsintälaitteisto.

## 10 MITTAUSOHJELMISTON TOTEUTUS

### 10.1 Laitteisto

Työn teossa käytettiin kannettavaa tietokonetta, johon oli asennettu Actelin Libero IDE v 8.6 ja SoftConsole IDE v2.3 -ohjelmistot. Käyttöjärjestelmänä koneessa oli Windows XP Professional SP 3. Koneeseen kytkettiin kahdella USB-kaapelilla Actelin M1AFS1500 Embedded Development Kit -kehitysalusta. Toisella USB:llä ohjataan LCPS-ohjelmointikorttia ja toisella hoidetaan sarjaliikenne kehitysalustan ja tietokoneen välillä. Lisäksi kehitysalustaan kytkettiin, mitattavasta suuresta riippuen erilaisella kytkennällä, itse valmistettu mittauspiirilevy. Mittauksissa apuna käytettiin Fluke 45 DUAL DISPLAY MULTIMETER -monitoimimittaria, jonka tarkkuus oli 10 mikrovolttia, ja lämpötilan mittaukseen perusyleismittaria, jossa oli lämpötila-anturi. (kuva 31.)



Kuva 31. Mittauslaitteisto.

## 10.2 Käytetyt ohjelmistot

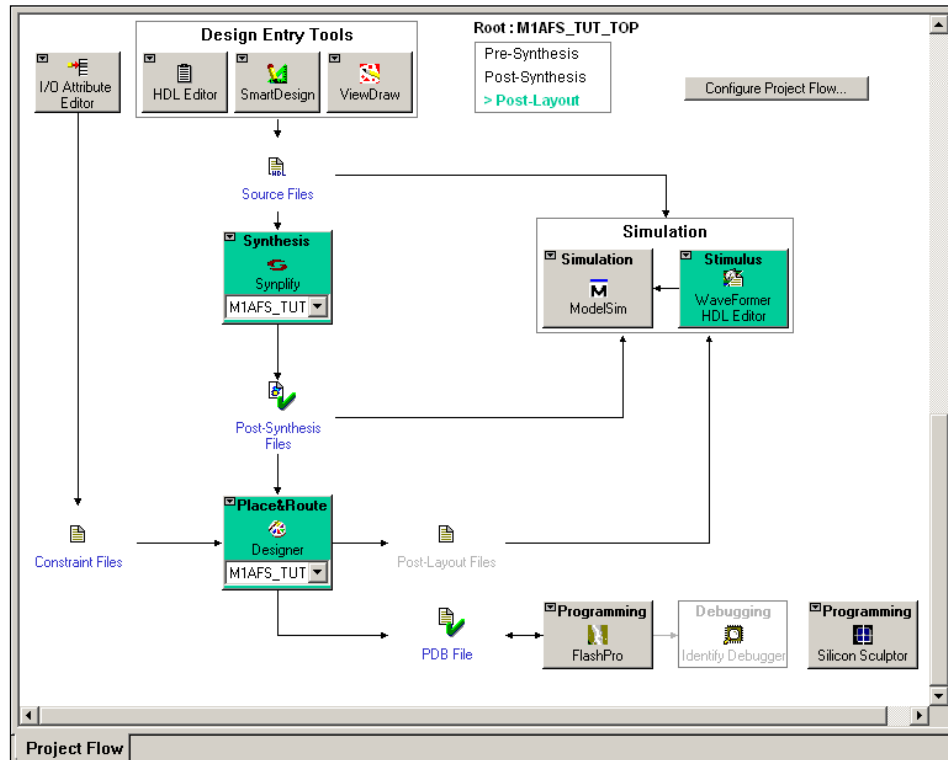
Tässä työssä käytettiin kytkentöjen suunnitteluun Actelin Libero IDE v 8.6 -ohjelmistoa ja C-kielisen koodin kirjoittamiseen sekä ajamiseen SoftConsole IDE v 2.3 -ohjelmistoa. Ohjelmistot ovat ladattavissa Actelin kotisivuilta. Lataaminen vaatii kirjautumisen sivustoille ja ohjelmiston käyttäminen lisensoinnin. Yhden vuoden lisenssi on kohdennettu tietyille koneelle ja vaatii koneen kiintolevyn ID-numeron.

### 10.2.1 Actel Libero IDE v 8.6

Actel Libero IDE on suunniteltu Actelin omien tuotteiden ohjelmoimista varten. Ohjelmalla voidaan suunnitella kytkentöjä VHDL-kielillä joko suoraan koodaamalla tekstimuodossa tai graafisen käyttöliittymän kautta. Libero IDE sisältää toiminnot kytkennän suunnittelusta aina ohjelmointiin kehitysalustalle. Ohjelmisto sisältää myös useita apuohjelmia kytkentöjen tarkempaan suunnitteluun ja testaukseen. Tässä työssä kytkennät tehtiin graafisella käyttöliittymällä, koska tarvittu kytkentä oli sen verran monimutkainen, että tekstimuodossa kirjoittaminen olisi ollut suorastaan mahdotonta.

Projektin luomisessa ja kytkennän pohjana käytettiin Actelin Fusion-piirille tarkoitettua Cortex-M1 -prosessoriin pohjautuvaa esimerkkiprojektia, ARM Cortex-M1 Embedded processor Hardware Development Tutorial [19].

Kuvassa 32 on esitetty Libero IDE:n projektin kulun ikkuna (Project Flow), joka avautuu kun uusi projekti luodaan. Kuvassa näkyvistä nuolista nähdään miten projekti etenee. Projekti aloitettiin tekemällä kytkentä graafisella käyttöliittymällä (Design Entry Tools / Smart-Design). Kytkennästä saadut tiedostot syntetisoitiin (Synthesis / Synplify), joka tekee VHDL-koodista loogisilla porteilla vastaavan kytkennän. Suunnittelutyökalulla (Place&Route / Designer) määriteltiin tehdyn kytkennän I/O:t fyysisiin Fusion-piirin pinneihin, kuitenkin ne olivat jo valmiiksi määritelty esimerkkiprojektin mukana tulleissa tiedostoissa. Lisäksi suunnittelutyökalulla sijoitettiin tehty kytkentä FPGA-piirille sekä lopuksi tehtiin ohjelmointi tiedostot. Tämän jälkeen valmis kytkentä ohjelmoitiin FPGA-piirille (Programming / FlashPro).



Kuva 32. Actel Libero IDE v 8.6 projektin kulku.

Työssä käytetyt IP-lohkot, niiden versio numerot ja IP-lohkokokoelman nimi, jonka alta kyseinen lohko löytyy Libero IDE:n IP-lohkokatalogista:

- Cortex M1, versio 2.7.103, Processors
- CoreAHB2APB, versio 1.1.101, Bus Interfaces
- CoreAHBLite, versio 2.0.140, Bus Interfaces
- CoreMemCtrl, versio 2.0.105, Peripherals
- CoreAhbNvm, versio 1.3.135, Peripherals
- CoreAhbSram, versio 1.3.103, Peripherals
- CoreAPB, versio 1.1.101, Bus Interfaces
- COREAI, versio 3.0.119, Peripherals
- CoreUARTapb, versio 4.0.120, Peripherals
- CoreGPIO, versio 1.2.103, Peripherals
- Oscillator RC, versio 2.1, Fusion Peripherals
- PLL - static, versio 2.1, Clock & Management
- AND2, versio 1.0, Actel Macros

Kytkenän kellosignaali generoitiin 100 MHz:n RC-oskillaattorilla, josta jaettiin haluttu taajuus (20 MHz) vaihelukitulla silmukalla (PLL) [19.].

Työssä tarvittiin kaksi eri väylää, koska osa IP-lohkoista toimi vain toisessa väylässä. Nämä väylät olivat CoreAPB ja CoreAHBLite sekä lisäksi tarvittiin IP-lohko CoreAHB2APB, joka yhdisti väylät. [19.]

Fusion-piirin sisäisistä muisteista CoreAHBNVM-IP-lohkolla saatiin käyttöön haihtumaton (Nonvolatile Memory) Flash-muisti ja CoreAhbSram-IP-lohkolla SRAM-muisti. Lisäksi tarvittiin käyttöön Fusion-piirin ulkoinen SRAM-muisti joka saatiin käyttöön CoreMemCtrl-IP-lohkolla. [19.]

Työssä käytetyn analogialohkon käyttöönotto tapahtui CoreAI-IP-lohkolla. Tämä IP-lohko on ainoa, johon työssä tarvitsi jälkepäin tehdä muutoksi eri mittauksia varten. Lohkossa määriteltiin tarvittavat analogiakanavat käyttöön ja niiden oikea toimintamuoto.

Sarjaliikennettä varten tarvittiin CoreUARTapb-IP-lohko, jota käytettiin mittaustietojen lähettämiseen tietokoneelle.

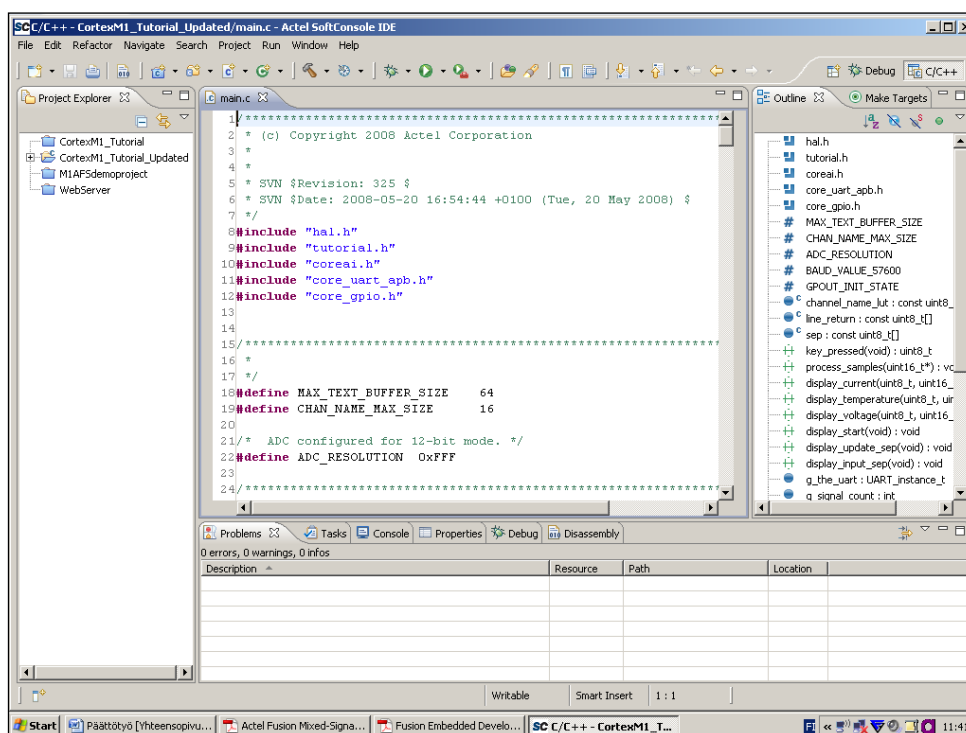
CoreGPIO-IP-lohkolla otettiin käyttöön yleiskäyttöiset (General Purpose) I/O-linjat, joita tässä työssä käytettiin ilmoittamaan koodin toimimisesta LED:eillä.

AND2-IP-lohkoa tarvitaan RESET:n toiminnassa. NSYSRESET-linjan pitää olla pidettynä niin kauan kunnes PLL antaa LOCK-signaalin, nämä kaksi signaalia yhdistettiin AND2-IP-lohkolla prosessori-IP-lohkon NSYSRESET-nastaan. [19.]

Valmis SmartDesignilla tehty kytkentä on esitetty liitteessä 3.

### 10.2.2 Actel SoftConsole IDE v 2.3

Actel SoftConsole IDE v2.3 -ohjelmisto (kuva 33) on tarkoitettu esimerkiksi C-kielisen koodin kirjoittamiseen kehitysalustalle implementoidulle prosessorille. Ohjelma perustuu ilmaiseen Eclipse-ohjelmistoon.



Kuva 33. Actel SoftConsole IDE v2.3.

Projektin luomisessa ja koodin kirjoittamisessa käytettiin pohjana Actelin Cortex-M1 prosessoriin pohjautuvaa esimerkkiprojektia, ARM Cortex-M1 Embedded Processor Software Development Tutorial [20].

Eri mittauksia varten esimerkkiohjeen mukaiseen koodiin piti tehdä muutoksia kahteen eri tiedostoon. Muutetut tiedostot olivat Main.c ja coreai\_cfg.h. Coreai\_cfg.h on analogialohkon ohjaukseen liittyvä tiedosto, jossa valittiin jokaiselle analogiakanavalle vastaava esiskaalaimen jänniteväli, kuin Libero IDE:ssä oli määriteltä CoreAI-IP-lohkoon. Lisäksi jokainen käytetty kanava piti ottaa käyttöön (SAMPLED/UNSAMPLED) main.c-tiedostossa olevasta analogiakanavien listauksesta. Main.c-tiedostossa tehtiin myös tarvittavat muutokset mittauskoodeihin.



### 10.3 Mittaukset

Mittaukset suoritettiin kolmelle eri suurelle. Mitattavat suureet olivat jännite, virta ja lämpötila. Mittaukset toistettiin, kun koodiin lisättiin signaalinkäsittelyä. Lisäksi mittaukset tehtiin eri asetuksilla yhdelle kanavalle sekä siten että kaikki kanavat olivat käytössä.

Eri suureiden mittauksia varten piti suurekohtaisesti määrittellä Libero IDE:llä tehdystä kytkennästä analogia-IP-lohkosta tarvittavien kanavien esiskaalainten oikea toimintamuoto. Vastaavat muutokset tehtiin myös SoftConsole IDE:ssä C-kieliseen koodiin.

Sarjaporttikommunikointia varten sarjaportin asetukset olivat seuraavat:

- Baudinopeus 57400
- 8 databittiä, 1 pysäytysbitti ja ei pariteettibittiä
- Flow control pois päältä

Työssä käytettiin HyperTerminal-ohjelmaa tietokoneen ja kehitysalustan kommunikointiin.

Mittaukset toistettiin jokaiselle suurelle useita kertoja, kun pyrittiin määrittelemään Fusion-piirin suorituskykyä. Mittauksia pyrittiin tarkentamaan muuttamalla mitattavaa jänniteväliä ja lisäämällä signaalinkäsittelyä. Tavoitteena oli saada selville mittaustarkkuuden minimi ja maksimi, mitattavien kanavien nollatasojen virheet sekä tulosten stabiilius.

C-kielisen ohjelman toimintaperiaate oli, että se odotti kunnes käyttäjä painoi näppäimistöltä jotakin näppäintä. Tämän jälkeen ohjelma siirtyi eteenpäin ja suoritti mittauskohtaiset toimenpiteet ja lähetti lopuksi tulokset sarjaportin kautta tietokoneelle.

Mittauskoodin pohjana käytettyyn esimerkkikoodiin tehtiin useita muutoksia. Sarjaporttiin tulostaminen tehtiin omaan aliohjelmaan (liite 4/6). Näytteiden käsittelyyn lisättiin kanava-kohtainen käsittely, johon sisällytettiin myös keskiarvoistamisen vaatimat koodit. Tehdyt pääohjelman muutokset on esitetty liitteessä 4/1.

### 10.3.1 Jännite

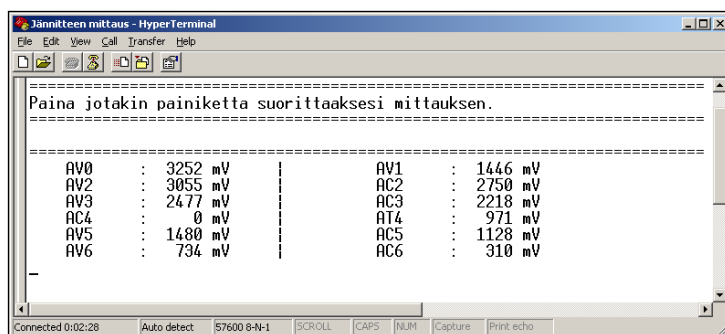
Jännitteen mittausten alussa tarkastettiin yleismittarilla, että säätöpotentiometri on varmasti minimissä, jolloin vastussarjan yli on koko käyttöjännite. Näin tekemällä voitiin helpommin vertailla ohjelman tuottamaa tulosta oikeaan arvoon. Mittausten yhteydessä kunkin vastuksen yli oleva oikea jännitearvo tarkastettiin yleismittarilla.

Jännitteiden mittauksia varten otettiin käyttöön seuraavat kanavat:

- AC2, AC3, AC4, AC5 ja AC6
- AV0, AV1, AV2, AV3, AV5 ja AV6
- AT4

Ensimmäisissä mittauksissa kaikille kanaville määriteltiin jänniteväliksi 0 voltista - 4 volttiin. Kanavista AC4, AV0 ja AV1 ovat kiinteästi määriteltäviä kehitysalustan sisäisiä mittauksia. Kanavista AV0 mittaa 3,3 voltin käyttöjännitettä, AV1 mittaa 1,5 voltin käyttöjännitettä ja AC4 potentiometrin jännitettä.

Jännitteen mittauksen C-kielisen koodin (liite 4/2) toimintaperiaatteena oli että käyttäjän napin painamisen jälkeen käynnistettiin AD-muunnin ja tallennettiin tulos muuttujaan (raw value). AD-muuntimelta saadusta tuloksesta laskettiin vastaava jännite arvo. Laskennassa tarvittiin mitattavan jännitealueen suurin arvo (full scale), AD-muuntimen antama arvo ja käytetty resoluutio. Laskennan jälkeen tarkastettiin, onko keskiarvoistaminen otettu käyttöön. Lopuksi lähetettiin sarjaportin kautta mitattavan kanavan nimi ja saatu tulos tietokoneelle (kuva 34).



Kuva 34. Jännitteen mittauksen tulokset.

Mittaustulosten tarkentamiseksi muutettiin mittausten jänniteväliä kanavakohtaisesti mahdollisimman lähelle kanavan mittaamaa jännitettä ja lisättiin mittauskoodiin signaalinkäsittelyn metodeista keskiarvoistaminen.

### 10.3.2 Virta

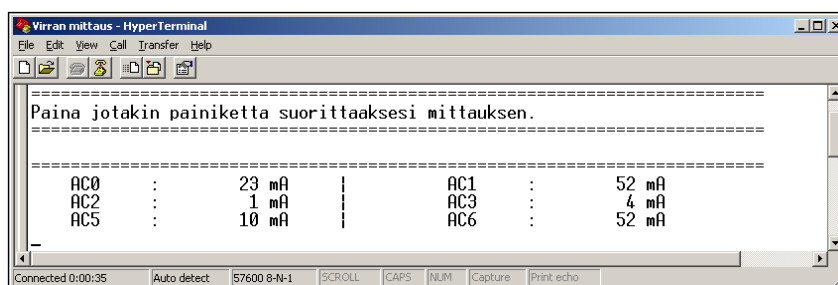
Ennen käyttöjännitteen kytkemistä tarkistettiin että maksimivirran kanavan potentiometri on käännetty maksimiasentoon. Tällöin käyttöjännite jäi lähes kokonaan potentiometrin yli ja virta kanavassa lähellä nolaa. Tällä vältyttiin turhasta komponenttien pitkäaikaiselta rasituksesta.

Mittauksia varten otettiin käyttöön seuraavat kanavat:

- AC0, AC1, AC2, AC3, AC5 ja AC6

Kanavista AC0 ja AC1 ovat kiinteästi määritellyjä kehitysalustan sisäisiä mittauksia. Kanava AC0 mittaa 3,3 voltin käyttöjännitteen virtaa ja AC1 1,5 voltin käyttöjännitteen virtaa. Ensimmäisessä mittauksessa käyttöön otetuille kanaville määriteltiin toimintamuodoksi virran mittaus (Current Monitor).

Virran mittauksen C-kielisen koodin (liite 4/3) toimintaperiaatteena oli että käyttäjän napin painamisen jälkeen käynnistettiin AD-muunnin ja tallennettiin tulos muuttujaan (raw value). AD-muuntimelta saadusta tuloksesta laskettiin vastaava jännitearvo, josta puolestaan laskettiin virta-arvo. Laskennassa tarvittiin AD-muuntimen antama arvo ja käytetty resoluutio sekä mitattavan jännitealueen suurin arvo, mikä virran mittauksella oli 2560 millivolttia. Laskennan jälkeen tarkastettiin, onko keskiarvoistaminen otettu käyttöön. Lopuksi sarjaportin kautta lähetettiin mitattavan kanavan nimi ja saatu tulos tietokoneelle (kuva 35).

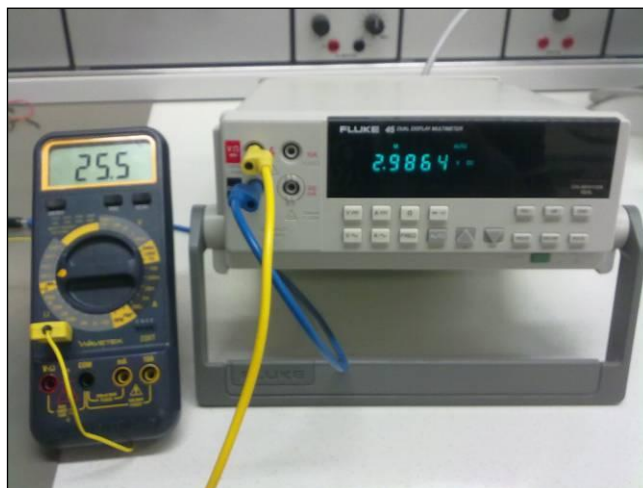


Kuva 35. Virran mittauksen tulokset.

Virran mittausten tulosten tarkentamiseksi muutettiin kanavien toimintamuoto jännitteen mittaukselle ja mittausväliksi 0 voltista 0,125 volttiin. Tällä saatiin paremmin AD-muuntimen koko jännitealue käyttöön. Lisäksi mittauskoodiin lisättiin signaalinkäsittelyn metodeista keskiarvoistaminen.

### 10.3.3 Lämpötila

Lämpötilan mittauksessa ensimmäinen vaihe oli antureiden kalibrointi. Kalibrointi tehtiin siten että lähdön jännite säädettiin tarkkuuspottiometrillä 2,982 volttiin kun lämpötila oli +25 °C (kuva 36). Kalibroinnin aikana huoneenlämpötila oli +25,5 °C, joten kalibrointi piti tehdä 5 millivolttia korkeammalle jännitteelle.



Kuva 36. Lämpötila-anturin kalibrointi.

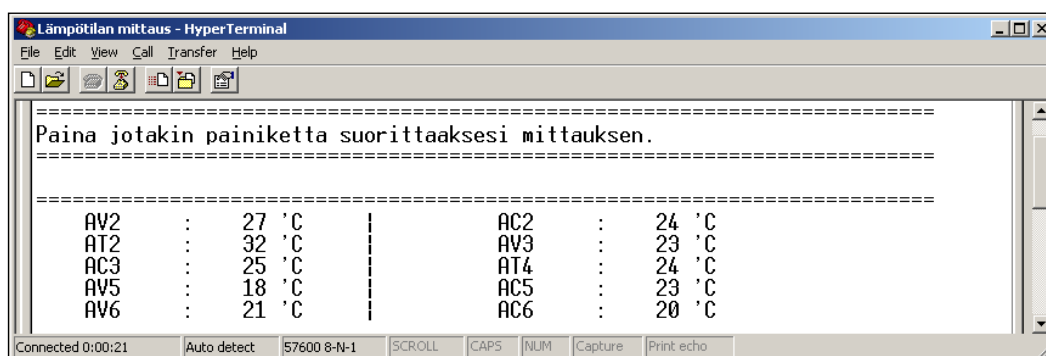
Mittauksia varten otettiin käyttöön seuraavat kanavat:

- AC2, AC3, AC5 ja AC6
- AV2, AV3, AV5 ja AV6
- AT2 ja AT4

Ensimmäisissä mittauksissa kanaville, AT2:sta lukuun ottamatta, määriteltiin toimintamuodoksi jännitteen mittaus ja jännite väliksi 0 voltista 4 volttiin. Vaikka lämpötilan mittauksille käyttöjännitteeksi tulikin 5 volttia, niin jännitealueen ylärajana riittää valittu 4 volttia, koska lämpötila-anturilta saataisiin ulos 4 volttia vasta kun lämpötila olisi noussut yli 100 °C:ta.

AT2-kanavassa on kehitysalustan sisäinen lämpötilan mittaus ja sille määriteltiin toimintamuodoksi lämpötilan mittaus (TEMPERATURE\_MONITOR). Koska AT2-kanavalle oli määritelty eri toimintamuoto, käyttää se eri aliohjelman näytteen käsittelyyn. Aliohjelman koodi on esitetty liitteessä 4/4.

Ulkoisen lämpötilan mittauksen C-kielisen koodin (liite 4/5) toimintaperiaatteena oli että käyttäjän napin painamisen jälkeen käynnistettiin AD-muunnin ja tallennettiin tulos muuttujaan. AD-muuntimelta saadusta tuloksesta (raw value) laskettiin vastaava jännitearvo. Jännitearvosta vähennettiin lämpötila-anturin jännite nollassa asteessa. Laskennassa tarvittiin AD-muuntimen antama arvo, käytetty resoluutio ja anturin jännitearvo nollassa asteessa. Lisäksi tarvittiin vertailu, jos lämpötila oli negatiivinen. Laskennan jälkeen tarkastettiin, onko keskiarvoistaminen otettu käyttöön. Lopuksi sarjaportin kautta lähetettiin mitattavan kanavan nimi ja saatu tulos tietokoneelle (kuva 37).



Kuva 37. Lämpötilan mittauksen tulokset.

Lämpötila-anturin jännite nollassa asteessa saatiin kertomalla anturin jännitteen muutos (10 millivolttia) astetta kohti 25 asteella ja vähentämällä se kalibroidusta 25 asteen lämpötilan jännitteestä. Eli anturin jännitteeksi nollassa asteessa saatiin  $2982 \text{ mV} - 250 \text{ mV} = 2732 \text{ mV}$ .

Lämpötilan mittausten tulosten tarkentamiseksi koodiin lisättiin signaalinkäsittelyn metodeista keskiarvoistaminen. Jänniteväliä ei tässä tapauksessa pystytty muuttamaan, koska seuraava tarkempi väli olisi ollut 0 voltista 2 volttiin. Lisäksi työssä käytetyt LM335-komponentit ovat sen verran epätarkkoja, ettei tarkentamisesta olisi juuri hyötyä.

## 11 TULOSTEN TARKASTELO

Työssä suoritettiin mittauksia jännitteelle, virralle ja lämpötilalle. Mittauksista pyrittiin saamaan selville mittausten tarkkuus ja paikkansapitävyys sekä mahdolliset virheet. Lisäksi tutkittiin teoreettisesti AD-muuntimen näytteenottotaajuuksia ja resoluutioita. Mittauksiin yhdistettiin esitellyistä signaalinkäsittelyn metodeista keskiarvoistaminen. Mittausten yhteydessä tarkkailtiin myös referenssi- ja käyttöjännitteitä sekä laskettiin mittaustulosten keskihajonta.

### 11.1 Jännitteen mittaukset

Mittaukset suoritettiin siten, että kaikki mahdolliset kanavat olivat käytössä yhtäaikaan ja myös siten että vain yksi kanava oli käytössä kerrallaan. Yhden kanavan mittauksissa mitattiin kolmella eri kanavalla. Mittaukset suoritettiin siten, että kaikissa kanavissa oli aluksi mitattavaksi jänniteväliksi valittu nolasta voltista neljään volttiin. Tämän jälkeen kanavakohtaisesti määriteltiin tarkin mahdollinen väli mitattavalle jännitteelle. Nämä mittaukset vielä toistettiin, kun keskiarvoistaminen otettiin käyttöön. Saadut tulokset on esitetty taulukoissa 3–6.

Taulukosta 3 nähdään että mittaustulokset eivät täysin ole yhteneviä yleismittarilla mitattuun todelliseen arvoon nähden (erotus). Lisäksi mittaustulokset vaihtelevat jokseenkin saman verran kaikissa kanavissa mittauskertojen välillä, paitsi AT4-kanavassa, jossa keskihajonta on suurempi kuin muissa. AT4-kanavassa on myös käyttöjännite (offset), kun kanava ei ole kytketty. Kun kanavan kytkee mittausspiirilevyyn, nostaa se hieman piirilevyn jännitteitä (todellinen arvo). Kuitenkin kanavan offset-arvo on kohdallaan piirilevylle kytkettynä. Käyttö- ja referenssijännite eivät muuttuneet merkittävästi, vaikka käytössä olisi yksi tai useampi kanava. Yksittäisissä mittauksissa samalle jännitteelle eri kanavilla ilmenee kanavakohtaisia eroja.

Taulukko 3. Jännitteen mittausten tulokset, kun keskiarvoistaminen ei ollut käytössä ja kaikkien kanavien esiskaalain oli määritelty välille 0 voltista 4 volttiin.

Ei keskiarvoistamista	Kanava	Mittaus 1 (mV)	Mittaus 2 (mV)	Mittaus 3 (mV)	Mittaus 4 (mV)	Mittaus 5 (mV)	Keskiarvo (mV)	Todellinen arvo (mV)	Erotus (mV)	Keskihajonta (mV)	Offset (mV)	Referenssi-jännite (V)	Käyttöjännite (V)
Kanavia käytössä: 1	AV2	1656	1655	1659	1658	1660	1657,6	1646,8	10,8	2,07	0	2,5755	3,304
Kanavia käytössä: 1	AT4	1690	1674	1690	1678	1690	1684,4	1693,6	-9,2	7,80	0 (3240)	2,5752	3,304
Kanavia käytössä: 1	AV6	1613	1609	1612	1610	1615	1611,8	1646,8	-35,0	2,39	0	2,5755	3,304
Kanavia käytössä: 12	AV0	3254	3255	3255	3254	3252	3254,0	3304,0	-50,0	1,22	-	2,5793	3,303
	AV1	1440	1443	1443	1440	1438	1440,8	1503,2	-62,4	2,17	-	2,5793	3,303
	AV2	323	324	323	326	323	323,8	328,0	-4,2	1,30	0	2,5793	3,303
	AV3	956	960	957	958	958	957,8	984,8	-27,0	1,48	0	2,5793	3,303
	AV5	1565	1567	1567	1564	1565	1565,6	1646,0	-80,4	1,34	0	2,5793	3,303
	AV6	2280	2277	2281	2282	2277	2279,4	2314,8	-35,4	2,30	0	2,5793	3,303
	AC2	620	622	624	626	620	622,4	657,0	-34,6	2,61	0	2,5793	3,303
	AC3	1299	1296	1301	1298	1303	1299,4	1314,7	-15,3	2,70	0	2,5793	3,303
	AC4	3268	3269	3272	3271	3269	3269,8	3303,0	-33,2	1,64	0	2,5793	3,303
	AC5	1949	1953	1951	1948	1948	1949,8	1978,6	-28,8	2,17	0	2,5793	3,303
	AC6	2598	2601	2599	2600	2600	2599,6	2649,4	-49,8	1,14	0	2,5793	3,303
	AT4	2969	2969	2973	2973	2989	2974,6	2989,5	-14,9	8,29	0	2,5793	3,303

Taulukosta 4 nähdään että keskiarvoistamisen käyttäminen pienensi keskihajontaa paljon verrattuna taulukon 3 arvoihin. AT4-kanavassa tapahtuu edelleen suurin mittausarvojen vaihtelu. Kuitenkaan mitatut arvot eivät ole vielä yhteneviä todelliseen arvoon verrattuna, eli keskiarvoistaminen ei poista tätä virhettä.

Taulukko 4. Jännitteen mittausten tulokset, kun keskiarvoistaminen oli käytössä ja kaikkien kanavien esiskaalain oli määritelty välille 0 voltista 4 volttiin.

Keskiarvoistaminen käytössä	Kanava	Mittaus 1 (mV)	Mittaus 2 (mV)	Mittaus 3 (mV)	Mittaus 4 (mV)	Mittaus 5 (mV)	Keskiarvo (mV)	Todellinen arvo (mV)	Erotus (mV)	Keskihajonta (mV)	Offset (mV)	Referenssi-jännite (V)	Käyttöjännite (V)
Kanavia käytössä: 1	AV2	1661	1661	1660	1660	1661	1660,6	1647,0	13,6	0,55	0	2,5754	3,304
Kanavia käytössä: 1	AT4	1679	1680	1676	1677	1678	1678,0	1693,6	-15,6	1,58	0 (3240)	2,5757	3,303
Kanavia käytössä: 1	AV6	1611	1612	1612	1612	1612	1611,8	1646,9	-35,1	0,45	0	2,5754	3,304
Kanavia käytössä: 12	AV0	3254	3254	3254	3253	3253	3253,6	3304,0	-50,4	0,55	-	2,5793	3,303
	AV1	1441	1442	1442	1442	1441	1441,6	1503,2	-61,6	0,55	-	2,5793	3,303
	AV2	322	322	322	322	322	322,0	328,0	-6,0	0,00	0	2,5793	3,303
	AV3	961	961	960	960	960	960,4	984,8	-24,4	0,55	0	2,5793	3,303
	AV5	1564	1564	1563	1564	1565	1564,0	1646,0	-82,0	0,71	0	2,5793	3,303
	AV6	2280	2279	2279	2279	2279	2279,2	2314,8	-35,6	0,45	0	2,5793	3,303
	AC2	622	623	622	623	623	622,6	657,0	-34,4	0,55	0	2,5793	3,303
	AC3	1302	1301	1301	1301	1301	1301,2	1314,7	-13,5	0,45	0	2,5793	3,303
	AC4	3273	3272	3273	3273	3273	3272,8	3303,0	-30,2	0,45	0	2,5793	3,303
	AC5	1948	1948	1949	1949	1949	1948,6	1978,6	-30,0	0,55	0	2,5793	3,303
	AC6	2597	2597	2597	2598	2598	2597,4	2649,4	-52,0	0,55	0	2,5793	3,303
	AT4	2979	2977	2978	2978	2978	2978,0	2989,5	-11,5	0,71	0	2,5793	3,303

Taulukosta 5 nähdään että esiskaalaimen jännitevälien kanavakohtainen määrittäminen näyttäisi hieman vaikuttavan keskihajontaan. Arvot vaikuttaisivat vaihtelevan sitä vähemmän mitä pienempi mitattava jänniteväli on. AT4-kanavan suurin keskihajonta voi osittain johtua suurimmasta jännitevälistä.

Taulukko 5. Jännitteen mittausten tulokset, kun keskiarvoistaminen ei ollut käytössä ja kanavien esiskaalaimet oli määritelty kanavakohtaisesti.

Ei keskiarvoistamista	Kanava	Mittaus 1 (mV)	Mittaus 2 (mV)	Mittaus 3 (mV)	Mittaus 4 (mV)	Mittaus 5 (mV)	Keskiarvo (mV)	Todellinen arvo (mV)	Erotus (mV)	Keskihajonta (mV)	Offset (mV)	Referenssi-jännite (V)	Käyttöjännite (V)
Kanavia käytössä: 1	AV2	312,0	311,0	310,0	312,0	311,0	311,2	330,1	-18,9	0,84	0	2,5752	3,304
Kanavia käytössä: 1	AT4	563,0	563,0	547,0	567,0	571,0	562,2	570,7(330,1)	-8,5	9,12	0(3240)	2,5754	3,303
Kanavia käytössä: 1	AV6	291,0	287,0	286,0	287,0	289,0	288,0	329,8	-41,8	2,00	0	2,5753	3,303
Kanavia käytössä: 12													
(0-4V)	AV0	3254	3253	3253	3254	3251	3253,0	3304,0	-51,0	1,22	-	2,5789	3,304
(0-2V)	AV1	1444	1443	1442	1441	1444	1442,8	1503,1	-60,3	1,30	-	2,5789	3,304
(0-0,5V)	AV2	306	306	306	306	305	305,8	329,3	-23,5	0,45	0	2,5789	3,304
(0-1V)	AV3	962	961	963	962	962	962,0	987,5	-25,5	0,71	0	2,5789	3,304
(0-2V)	AV5	1562	1562	1561	1561	1560	1561,2	1646,7	-85,5	0,84	0	2,5789	3,304
(0-4V)	AV6	2281	2278	2282	2283	2279	2280,6	2314,7	-34,1	2,07	0	2,5789	3,304
(0-1V)	AC2	634	633	633	633	633	633,2	658,0	-24,8	0,45	0	2,5789	3,304
(0-2V)	AC3	1299	1299	1300	1298	1299	1299,0	1317,0	-18,0	0,71	0	2,5789	3,304
(0-4V)	AC4	3269	3270	3271	3271	3268	3269,8	3304,0	-34,2	1,30	0	2,5789	3,304
(0-2V)	AC5	1952	1948	1951	1948	1950	1949,8	1980,3	-30,5	1,79	0	2,5789	3,304
(0-4V)	AC6	2598	2602	2598	2601	2597	2599,2	2650,8	-51,6	2,17	0	2,5789	3,304
(0-16V)	AT4	2997	2977	2977	2973	2981	2981,0	2989,9	-8,9	9,38	0	2,5789	3,304

Taulukosta 6 nähdään että keskiarvoistamisen käyttöönotolla on sama vaikutus kuin aikaisemminkin, eli keskihajonta pienenee huomattavasti. AT4-kanavassa on edelleen suurin hajonta.

Taulukko 6. Jännitteen mittausten tulokset, kun keskiarvoistaminen oli käytössä ja kanavien esiskaalaimet oli määritelty kanavakohtaisesti.

Keskiarvoistaminen käytössä	Kanava	Mittaus 1 (mV)	Mittaus 2 (mV)	Mittaus 3 (mV)	Mittaus 4 (mV)	Mittaus 5 (mV)	Keskiarvo (mV)	Todellinen arvo (mV)	Erotus (mV)	Keskihajonta (mV)	Offset (mV)	Referenssi-jännite (V)	Käyttöjännite (V)
Kanavia käytössä: 1	AV2	311	311	311	311	311	311,0	330,1	-19,1	0,00	0	2,5754	3,304
Kanavia käytössä: 1	AT4	553	553	554	555	556	554,2	571,0(330,1)	-16,8	1,30	0(3196)	2,5754	3,303
Kanavia käytössä: 1	AV6	287	287	287	287	287	287,0	329,7	-42,7	0,00	0	2,5754	3,303
Kanavia käytössä: 12													
(0-4V)	AV0	3254	3255	3254	3253	3254	3254,0	3304,0	-50,0	0,71	-	2,5786	3,304
(0-2V)	AV1	1442	1442	1443	1442	1442	1442,2	1503,1	-60,9	0,45	-	2,5786	3,304
(0-0,5V)	AV2	306	306	306	306	306	306,0	329,3	-23,3	0,00	0	2,5786	3,304
(0-1V)	AV3	962	962	962	962	961	961,8	987,5	-25,7	0,45	0	2,5786	3,304
(0-2V)	AV5	1562	1562	1562	1561	1562	1561,8	1646,7	-84,9	0,45	0	2,5786	3,304
(0-4V)	AV6	2282	2282	2281	2281	2281	2281,4	2314,7	-33,3	0,55	0	2,5786	3,304
(0-1V)	AC2	633	634	633	634	633	633,4	658,0	-24,6	0,55	0	2,5786	3,304
(0-2V)	AC3	1298	1299	1298	1298	1298	1298,2	1317,0	-18,8	0,45	0	2,5786	3,304
(0-4V)	AC4	3271	3271	3271	3271	3271	3271,0	3304,0	-33,0	0,00	0	2,5786	3,304
(0-2V)	AC5	1950	1950	1950	1951	1950	1950,2	1980,3	-30,1	0,45	0	2,5786	3,304
(0-4V)	AC6	2600	2600	2600	2600	2601	2600,2	2650,8	-50,6	0,45	0	2,5786	3,304
(0-16V)	AT4	2977	2978	2977	2977	2976	2977,0	2989,9	-12,9	0,71	0	2,5786	3,304

Jännitteen mittauksissa esiintyi systemaattisesti samat virheet kaikissa mittauksissa. Mitatut arvot eivät olleet yhteneviä todellisiin arvoihin. Eroa todellisiin arvoihin oli yleensä kymmeniä millivolteja. Muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta todellinen arvo oli suurempi kuin mitattu arvo, mikä näkyy negatiivisena erotuksena. Lisäksi mittaustulokset vaihtelivat useita millivolteja mittausten välillä, mikä näkyy suurena keskihajontana. Kanavien välillä samalla jännitteellä oli mittaustuloksissa suuria eroja, vaikka offsetit olivat oikein. Suurimmat ongelmat eri kanavissa esiintyivät AT4-kanavassa. Käyttö- ja referenssi-jännitteissä ei mittauksissa tapahtunut vakavia muutoksia. Keskiarvoistamista käyttämällä mittaustulosten vaihtelu saatiin hyvin vähäiseksi.



## 11.2 Virran mittaukset

Virralle suoritettiin mittaukset kahdella eri analogia-IP-lohkon asetuksilla, joissa toisessa kanavat oli määritelty virran mittaukselle ja toisessa kanavakohtaisesti jännitteen mittaukselle. Molemmilla tavoilla mitattiin siten että käytössä oli kaikki kanavat ja yksi kanava kerrallaan. Yhden kanavan mittaukset suoritettiin kahdelle eri kanavalle. Lisäksi mittaukset toistettiin, kun keskiarvoistaminen otettiin käyttöön. Saadut tulokset on esitetty taulukoissa 7–10. Taulukoissa esitetyt todelliset arvot on laskettu yleismittarilla mitatusta jännitteestä ja vastuksen arvosta käyttämällä kaavaa 17.

$$U = RI \Rightarrow I = \frac{U}{R}$$

Laskuissa mittauspiirilevyiltä mitattuihin arvoihin vastusarvona (R) on käytetty 1,1 ohmia, koska käytetyt vastukset mitattiin ennen niiden kiinnittämistä. AC0- ja AC1-kanaville puolestaan käytettiin tasan yhtä ohmia, koska nämä kanavat mittasivat kehitysalustan virtoja ja niissä oli yhden ohmin vastus.

Taulukosta 7 nähdään että mittauksissa tulokset vaihtelevat jonkin verran, kun esiskaalain asetuksena käytetään virran mittausta. Virran mittauksissakin referenssi- ja käyttöjännitteet pysyvät lähes vakiona.

Taulukko 7. Virran mittausten tulokset, kun keskiarvoistaminen ei ollut käytössä ja kanavien esiskaalaimet oli määritelty virranmittaukselle.

Ei keskiarvoistamista	Kanava	Mittaus 1 (mA)	Mittaus 2 (mA)	Mittaus 3 (mA)	Mittaus 4 (mA)	Mittaus 5 (mA)	Keskiarvo (mA)	Todellinen arvo (mA)	Erotus (mA)	Offset (mA)	Keskihajonta (mA)	Referenssi-jännite (V)	Käyttöjännite (V)
Kanavia käytössä: 1	AC2	50,0	50,0	53,0	51,0	49,0	50,6	48,13	2,5	0	1,52	2,5753	3,293
Kanavia käytössä: 1	AC6	50,0	50,0	52,0	49,0	52,0	50,6	47,40	3,2	0	1,34	2,5751	3,293
Kanavia käytössä: 6	AC0	25,0	23,0	24,0	24,0	23,0	23,8	23,66	0,1	0	1,41	2,5795	3,282
	AC1	54,0	52,0	54,0	52,0	52,0	52,8	49,99	2,8	0	1,41	2,5795	3,282
	AC2	52,0	49,0	50,0	51,0	50,0	50,4	48,19	2,2	0	1,41	2,5795	3,282
	AC3	13,0	9,0	11,0	9,0	12,0	10,8	10,01	0,8	0	0,71	2,5795	3,282
	AC5	6,0	4,0	4,0	5,0	4,0	4,6	5,11	-0,5	0	1,41	2,5795	3,282
	AC6	3,0	0,0	1,0	3,0	2,0	1,8	1,01	0,8	0	0,71	2,5795	3,282

Taulukosta 8 nähdään että keskiarvoistamisen käyttöönotto pienentää keskihajontaa. AC2-kanavassa on hieman muita kanavia suurempi hajonta.

Taulukko 8. Virran mittausten tulokset, kun keskiarvoistaminen oli käytössä ja kanavien esiskaalaimet oli määritelty virranmittaukselle.

Keskiarvoistaminen käytössä	Kanava	Mittaus 1 (mA)	Mittaus 2 (mA)	Mittaus 3 (mA)	Mittaus 4 (mA)	Mittaus 5 (mA)	Keskiarvo (mA)	Todellinen arvo (mA)	Erotus (mA)	Offset (mA)	Keskihajonta (mA)	Referenssi-jännite (V)	Käyttöjännite (V)
Kanavia käytössä: 1	AC2	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	47,94	2,1	0	0,00	2,5751	3,285
Kanavia käytössä: 1	AC6	51,0	51,0	51,0	51,0	51,0	51,0	48,10	2,9	0	0,00	2,575	3,296
Kanavia käytössä: 6	AC0	22,0	23,0	23,0	23,0	24,0	23,0	23,19	-0,2	0	0,71	2,5787	3,281
	AC1	49,0	49,0	50,0	50,0	51,0	49,8	50,11	-0,3	0	0,84	2,5787	3,281
	AC2	46,0	47,0	48,0	48,0	49,0	47,6	48,01	-0,4	0	1,14	2,5787	3,281
	AC3	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	9,97	0,0	0	0,00	2,5787	3,281
	AC5	5,0	5,0	5,0	6,0	4,0	5,0	5,08	-0,1	0	0,71	2,5787	3,281
	AC6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,00	0,0	0	0,00	2,5787	3,281

Taulukossa 9 esiskaalaimen asetukseksi on valittu jännitteen mittaus. Keskihajonta jää paljon pienemmäksi kuin taulukossa 7, jopa ilman keskiarvoistamista. Näillä asetuksilla tarkkuudesakin päästään tarkempiin mittauksiin, kuin virran mittauksen asetuksilla.

Taulukko 9. Virran mittausten tulokset, kun keskiarvoistaminen ei ollut käytössä ja kanavien esiskaalaimet oli jännitteen mittaukselle 0 voltista 0,125 volttiin.

Ei keskiarvoistamista	Kanava	Mittaus 1 (mA)	Mittaus 2 (mA)	Mittaus 3 (mA)	Mittaus 4 (mA)	Mittaus 5 (mA)	Keskiarvo (mA)	Todellinen arvo (mA)	Erotus (mA)	Offset (mA)	Keskihajonta (mA)	Referenssi-jännite (V)	Käyttöjännite (V)
Kanavia käytössä: 1	AC2	44,63	44,51	44,80	44,74	44,94	44,72	43,59	1,1	0	0,18	2,5626	3,278
Kanavia käytössä: 1	AC3	45,02	45,22	44,94	45,27	45,13	45,11	43,63	1,5	0	0,14	2,5625	3,285
Kanavia käytössä: 4	AC2	1,60	1,40	1,40	1,40	1,46	1,45	0,91	0,5	0	0,09	2,5626	3,228
	AC3	5,92	5,75	5,83	6,03	5,80	5,88	5,63	0,3	0	0,11	2,5626	3,228
	AC5	9,27	9,21	9,10	9,30	9,21	9,22	9,08	0,1	0	0,08	2,5626	3,228
	AC6	42,40	42,31	42,54	42,54	42,60	42,48	43,82	-1,3	0	0,12	2,5626	3,228

Taulukosta 10 nähdään että keskiarvoistamisella ja jännitteen mittauksella päästään paljon pienempään keskihajontaan kuin virranmittauksen asetuksilla.

Taulukko 10. Virran mittausten tulokset, kun keskiarvoistaminen oli käytössä ja kanavien esiskaalaimet oli jännitteen mittaukselle 0 voltista 0,125 volttiin.

Keskiarvoistaminen käytössä	Kanava	Mittaus 1 (mA)	Mittaus 2 (mA)	Mittaus 3 (mA)	Mittaus 4 (mA)	Mittaus 5 (mA)	Keskiarvo (mA)	Todellinen arvo (mA)	Erotus (mA)	Offset (mA)	Keskihajonta (mA)	Referenssi-jännite (V)	Käyttöjännite (V)
Kanavia käytössä: 1	AC2	45,11	45,12	45,15	45,2	45,11	45,14	43,84	1,3	0	0,04	2,5622	3,301
Kanavia käytössä: 1	AC3	45,39	45,41	45,43	45,45	45,46	45,43	43,78	1,6	0	0,03	2,5624	3,297
Kanavia käytössä: 4	AC2	44,88	44,89	44,85	44,85	44,84	44,86	43,58	1,3	0	0,02	2,5624	3,249
	AC3	10,68	10,70	10,66	10,63	10,60	10,65	9,06	1,6	0	0,04	2,5624	3,249
	AC5	4,55	4,55	4,54	4,50	4,49	4,53	4,62	-0,1	0	0,03	2,5624	3,249
	AC6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90	-0,9	0	0,00	2,5624	3,249

Virran mittauksissa mitatut arvot olivat lähes yhteneviä todellisiin arvoihin, kun käytettiin virran mittauksen asetuksia esiskaalaimelle. Kun taas käytettiin jännitteen mittauksia, eroa oli maksimissaan noin 3 milliampeeria. Todellinen arvo oli enimmäkseen pienempi kuin mitattu arvo, mikä näkyy positiivisena erotuksena. Mittaustulokset vaihtelivat useita milliampeereja mittausten välillä, kun käytettiin virran mittauksia. Kun siirryttiin käyttämään tarkempaa jännitteen mittauksia, mittaustulosten vaihtelu pieneni sadan mikroampeerin suuruusluokkaan. Samaa virtaa mitattaessa kanavien välillä mittaustuloksissa oli muutaman milliampeerin ero-

ja. Käyttö- ja referenssijännitteissä ei mittauksissa tapahtunut vakavia muutoksia. Keskiarvoistamista käyttämällä mittaustulosten vaihtelu saatiin hyvin vähäiseksi. Ja kun virran mitta-  
us vaihdettiin jännitteen mittaukseksi, vaihtelu pieneni entisestään.

### 11.3 Lämpötilan mittaukset

Lämpötilan mittaukset suoritettiin siten että käytössä oli yksi kanava kerrallaan ja kaikki kanavat yhtäaikaan. Lisäksi mittaukset toistettiin, kun keskiarvoistaminen otettiin käyttöön. Yhden kanavan mittaukset suoritettiin kolmelle eri kanavalle. Esiskaalaimet oli määritelty jännitteen mittaukselle nolasta voltista neljään volttiin, paitsi kanava AT2, joka oli määritelty lämpötilan mittaukseen (temperature monitor). Saadut tulokset on esitetty taulukoissa 11 ja 12.

Taulukosta 11 nähdään että näissäkin mittauksissa saadut arvot vaihtelevat mittausten välillä. Varsinkin kehitysalustan lämpötila-anturin tulos (AT2-kanava) vaihtelee todella paljon, eikä keskiarvokaan ole lähellä todellista arvoa. Muiden kanavien kohdalla lämpötila-arvot vaihtelevat todella paljon, vaikka todellinen lämpötila onkin lähes sama. Keskihajonnat pysyivät hyvin pieninä, lukuun ottamatta AT2-kanavaa. Myös lämpötilan vaatima eri käyttöjännite pysyi lähes vakiona eri mittauksissa.

Taulukko 11. Lämpötilan mittausten tulokset, kun keskiarvoistaminen ei ollut käytössä ja kanavien esiskaalaimet oli jännitteen mittaukselle 0 voltista 4 volttiin, paitsi kanavalle AT2, jolla oli lämpötilan mitta-  
us (temperature monitor).

Ei keskiarvoistamista	Kanava	Mittaus 1 (°C)	Mittaus 2 (°C)	Mittaus 3 (°C)	Mittaus 4 (°C)	Mittaus 5 (°C)	Keskiarvo (°C)	Todellinen arvo (°C (V))	Erotus (°C)	Keskiha- jonta (°C)	Referenssi jännite (V)	Käyttöjännite (V)
Kanavia käytössä: 1	AT2	35,0	41,0	32,0	36,0	29,0	34,6	27,8	6,8	4,51	2,5757	4,873
Kanavia käytössä: 1	AV2	29,0	29,0	29,0	28,0	28,0	28,6	26,3 (2,9956)	2,3	0,55	2,5757	4,873
Kanavia käytössä: 1	AV5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	26,6 (2,9981)	-6,6	0,00	2,5757	4,873
Kanavia käytössä :10	AV2	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	26,7 (2,9993)	2,3	0,00	2,5791	4,852
	AV3	25,0	25,0	26,0	25,0	25,0	25,2	26,6 (2,9984)	-1,4	0,45	2,5791	4,852
	AV5	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	26,5 (2,9975)	-7,5	0,00	2,5791	4,852
	AV6	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	26,6 (2,9982)	-3,6	0,00	2,5791	4,852
	AC2	27,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,2	27,0 (3,0028)	-0,8	0,45	2,5791	4,852
	AC3	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	26,7 (2,9998)	0,3	0,00	2,5791	4,852
	AC5	25,0	25,0	25,0	24,0	25,0	24,8	26,7 (2,9992)	-1,9	0,45	2,5791	4,852
	AC6	21,0	21,0	21,0	22,0	21,0	21,2	26,7 (2,9994)	-5,5	0,45	2,5791	4,852
	AT2	35,0	27,0	13,0	34,0	34,0	28,6	28,3	0,3	9,29	2,5791	4,852
	AT4	24,0	25,0	24,0	25,0	26,0	24,8	26,9 (3,0015)	-2,1	0,84	2,5791	4,852

Taulukosta 12 nähdään että keskiarvoistamisen käyttöönotolla saatiin myös AT2-kanavan tulosten vaihtelua vähennettyä. Muissa kanavissa keskiarvoistamisen vaikutusta ei juuri huomaa, koska tulokset olivat hyvin vakaat ilman sitä.

Taulukko 12. Lämpötilan mittausten tulokset, kun keskiarvoistaminen oli käytössä ja kanavien esiskaalaimet oli jännitteen mittaukselle 0 voltista 4 volttiin, paitsi kanavalle AT2, jolla oli lämpötilan mittaus (temperature monitor).

Keskiarvoistaminen käytössä	Kanava	Mittaus 1 (°C)	Mittaus 2 (°C)	Mittaus 3 (°C)	Mittaus 4 (°C)	Mittaus 5 (°C)	Keskiarvo (°C)	Todellinen arvo (°C (V))	Erotus (°C)	Keskihajonta (°C)	Referenssi jännite (V)	Käyttöjännite (V)
Kanavia käytössä: 1	AT2	33,0	34,0	34,0	35,0	34,0	34,0	28,8	5,2	0,71	2,5762	4,881
Kanavia käytössä: 1	AV2	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	26,6 (2,9980)	2,4	0,00	2,5757	4,881
Kanavia käytössä: 1	AV5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	26,6 (2,9980)	-6,6	0,00	2,5757	4,881
Kanavia käytössä: 10	AV2	28,0	29,0	29,0	29,0	29,0	28,8	26,6 (2,9980)	2,2	0,45	2,5791	4,850
	AV3	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	26,5 (2,9970)	-1,5	0,00	2,5791	4,850
	AV5	19,0	18,0	18,0	19,0	18,0	18,4	26,2 (2,9942)	-7,8	0,55	2,5791	4,850
	AV6	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	26,2 (2,9943)	-3,2	0,00	2,5791	4,850
	AC2	25,0	26,0	26,0	26,0	26,0	25,8	26,6 (2,9982)	-0,8	0,45	2,5791	4,850
	AC3	26,0	27,0	27,0	27,0	26,0	26,6	26,5 (2,9974)	0,1	0,55	2,5791	4,850
	AC5	23,0	24,0	24,0	24,0	24,0	23,8	26,2 (2,9941)	-2,4	0,45	2,5791	4,850
	AC6	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	26,1 (2,9930)	-5,1	0,00	2,5791	4,850
	AT2	32,0	33,0	31,0	31,0	32,0	31,8	28,0	3,8	0,84	2,5791	4,850
	AT4	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	26,1 (2,9935)	-1,1	0,00	2,5791	4,850

Lämpötilan mittauksissa mittausarvot eivät vaihdelleet kovinkaan paljoa, lukuun ottamatta AT2-kanavaa, vaikka keskiarvoistaminen ei ollut käytössä. Keskiarvoistamisella kuitenkin saatiin vähennetty AT2-kanavan mittaustulosten vaihtelut. Lisäksi mitattujen arvojen yhteneväisyys todelliseen arvoon vaihteli kanavakohtaisesti, jopa 8 °C. Tähän ei vaikuttanut käytettyjen kanavien määrä, vaan virhe oli kanavakohtainen. Käyttö- ja referenssi jännitteet pysyivät lähes vakioina kaikissa mittauksissa.

#### 11.4 AD-muuntimen näytteenottotaajuudet

Koska AD-muuntimen kellotaajuus ja näytteenottotaajuus riippuvat koko järjestelmän kellotaajuudesta. Työssä käytettyjen esimerkkien järjestelmän kellotaajuus oli 20 MHz, jolloin AD-muuntimen kellotaajuus saadaan laskettua käyttämällä kaavaa 5.

$$f_{ADC\_CLK} = \frac{f_{SYS\_CLK}}{4 \cdot (TVC\_reg + 1)} = \frac{20\text{ MHz}}{4 \cdot (0 + 1)} = 5\text{ MHz}$$

Käytetty kellotaajuus ei ole paras mahdollinen (maksimi 10 MHz), jos haluttaisiin mahdollisimman nopea näytteenottotaajuus. Tässä työssä tällä ei varsinaisesti ollut merkitystä, koska mittauksissa käytettiin vain tasajännitteitä ja AD-muuntimen näytteenottotaajuutta käsiteltiin vain teoriassa.

Esimerkkinä lasketaan työssä käytettyjen asetusten mukaiset näytteenottotaajuudet, eli 12-bittiselle muuntimelle esiskaalaimen kanssa, yksi kanava käytössä ja kun kaikki kanavat ovat

käytössä. Muiden asetusten mukaiset, samalla tavalla lasketut, näytteenottotaajuudet esitetään taulukoissa 15, 16 ja 17.

Näytteenottotaajuus saadaan laskettua käyttämällä kaavaa 8.

$$SampleRate = \frac{1}{t_{Conversion} + t_{Turnaround}} Hz, \text{ missä } t_{Turnaround} = 10 \cdot t_{SYS\_CLK} \text{ (kaava 9) ja}$$

$$t_{Conversion} = t_{sync\_read} + t_{sample} + t_{distrib} + t_{post\_cal} + t_{sync\_write} \text{ (kaava 11).}$$

Kun kaavaan 11 sijoitetaan kaavat 12–16, saadaan muunnosajan kaava seuraavaan muotoon.

$$t_{Conversion} = t_{SYS\_CLK} + t_{sample} + resolution \cdot t_{ADC\_CLK} + 2 \cdot t_{ADC\_CLK} + t_{SYS\_CLK}$$

Resoluutio työssä oli 12 bittiä ja varautumisaika ( $t_{sample}$ ) on esiskaalainta käytettäessä 10  $\mu s$  [13, s. 6]. Saadun kaavan järjestelmän- ja AD-muuntimenkellon jaksonajat saadaan laskettua käyttämällä kaavaa 10, josta esimerkkinä on laskettu 20 MHz:n kellolle jaksonaika. Muut laskuissa käytetyt jaksonajat on esitetty taulukossa 13.

$$t_{SYS\_CLK} = \frac{1}{f_{SYS\_CLK}} = \frac{1}{20 MHz} = 50 ns$$

Taulukko 13. Jaksonajat.

Kellotaajuus (MHz)	Jaksonaika (ns)
5	200
10	100
20	50
40	25
80	12,5

Kun tiedetään tarvittavat arvot, saadaan muunnosajan kaavasta laskettua tarvittava aika.

$$t_{Conversion} = 50 ns + 10 \mu s + 12 \cdot 200 ns + 2 \cdot 200 ns + 50 ns = 12,9 \mu s$$

Kun muunnos aika tiedetään, saadaan järjestelmän näytteenottotaajuus laskettua sijoittamalla saadut arvot kaavaan 8.

$$SampleRate = \frac{1}{t_{Conversion} + 10 \cdot t_{SYS\_CLK}} Hz = \frac{1}{12,9 \mu s + 10 \cdot 50 ns} = 74626,86567 Hz$$

Eli näytteenottotaajuus on noin 74,6 kHz, kun järjestelmän kellotaajuus on 20 MHz.

Kun mitataan vain yhdestä kanavasta, on käytettävä näytteenottotaajuus edellä laskettu 74,6 kHz. Kaavaa 7 käyttämällä voidaan laskea kanavakohtainen näytteenottotaajuus, kun mitattavia kanavia on 12, kuten tässä työssä maksimissaan käytettiin, ja otetaan yksi näyte jokaisesta kanavasta. Lisäksi kanavien muunnosaika on vakio.

$$f_{CHAN\_sample\_rate} = \frac{N_{TOT\_samples\_for\_channel}}{N_{TOT\_samples}} \cdot f_{SYS\_sample\_rate} = \frac{1}{12} \cdot 74626,8657 \text{ Hz} = 6218,906 \text{ Hz}$$

Eli yhden kanavan näytteenottotaajuudeksi saatiin noin 6,2 kHz, kun käytetään kahtatoista kanavaa yhtäaikaa. Tästä voidaan päätellä että tutkittavan signaalin maksimitaajuus saa olla yhdellä kanavalla mitatessa noin 37 kHz ja kahdellatoista kanavalla mitatessa 3,1 kHz.

Kun esiskaalain ei ole käytössä, on pitoaika, joka on riippuvainen kytkennän ulkoisesta impedanssista, paljon lyhyempi kuin skaalaimen kanssa. Pitoaika voidaan laskea käyttämällä kaavaa 4, mistä esimerkkinä laskettu 12 bitin muuntimen vaatima pitoaika. Tässä oletettiin että ulkoinen impedanssi oli lähellä nollaa, mitä se todellisuudessa ei ole. Tällöin kaavassa oleva R on pelkästään sisäistä impedanssia, eli 2 kΩ:a, kapasitanssi C on 18 pF:a ja jännite  $V_{in}$  on referenssijännite eli 2,56 voltia [10, s. 144].

$$t_{sample} = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{V_{IN}}{0,5 \cdot LSB}\right) = 2000 \Omega \cdot 18 \text{ pF} \cdot \ln\left(\frac{2,56 \text{ V}}{0,5 \cdot \frac{2,56 \text{ V}}{2^{12}}}\right) = 0,3244 \mu\text{s}$$

Saatu aika on minimi aika, jonka muunnin tarvitsee 12 bitillä. Eri bittimäärien ja impedanssien vaatimat ajat on taulukoitu taulukkoon 14.

Taulukko 14. AD-muuntimen pitoaikoja.

Ulkoinen impedanssi	0 Ω	2000 Ω	10 kΩ
12 bittiä	324,4 ns	648,8 ns	1,946 μs
10 bittiä	274,5 ns	549,0 ns	1,647 μs
8 bittiä	224,6 ns	449,2 ns	1,347 μs

Taulukkoon 15 on laskettu, edellä esitetyllä tavalla, näytteenottotaajuudet eri bittimäärille, kelloaajuuksille ja eri kanava määrille, kun esiskaalainta ei ole otettu käyttöön ja ulkoinen impedanssi on oletettu nolaksi.

Taulukko 15. Näytteenottotaajuudet kun esiskaalain ei ole käytössä ja ulkoinen impedanssi on nolla ohmia.

Bittimäärä		12		10		8	
$t_{\text{sample}}$ (ns)		324,4		274,5		224,6	
Kellotaajuudet (MHz)		Näytteenottotaajuudet (Hz)					
Systeemi AD-muunnin		ykä	12	ykä	12	ykä	12
		kanava	kanavaa	kanava	kanavaa	kanava	kanavaa
20	5	268499,6	22375,0	305390,1	25449,2	354107,6	29509,0
40	10	493973,5	41164,5	563539,0	46961,6	655909,7	54660,0
80	10	533504,0	44458,7	615574,0	51297,8	727484,4	60623,7

Taulukkoon 16 on laskettu näytteenottotaajuudet eri bittimäärille, kellotaajuuksille ja eri kanava määrille, kun esiskaalain on otettu käyttöön. Koska esiskaalain on käytössä, ulkoisella impedanssilla ei ole merkitystä.

Taulukko 16. Näytteenottotaajuudet kun esiskaalain on käytössä.

Bittimäärä		12		10		8	
$t_{\text{sample}}$ ( $\mu$ s)		10		10		10	
Kellotaajuudet (MHz)		Näytteenottotaajuudet (Hz)					
Systeemi AD-muunnin		ykä	12	ykä	12	ykä	12
		kanava	kanavaa	kanava	kanavaa	kanava	kanavaa
20	5	74626,9	6218,9	76923,1	6410,3	79365,1	6613,8
40	10	85470,1	7122,5	86956,5	7246,4	88495,6	7374,6
80	10	86580,1	7215,0	88105,7	7342,1	89686,1	7473,8

Taulukkoon 17 on laskettu puolestaan näytteenottotaajuudet eri bittimäärille, kellotaajuuksille ja eri kanavamäärille, kun esiskaalain ei ole käytössä ja ulkoinen impedanssi on oletettu olevan 2 k $\Omega$ :a.

Taulukko 17. Näytteenottotaajuudet kun esiskaalain ei ole käytössä ja ulkoinen impedanssi on 2 k $\Omega$ :a.

Bittimäärä		12		10		8	
$t_{\text{sample}}$ (ns)		648,9		549		449,2	
Kellotaajuudet (MHz)		Näytteenottotaajuudet (Hz)					
Systeemi AD-muunnin		ykä	12	ykä	12	ykä	12
		kanava	kanavaa	kanava	kanavaa	kanava	kanavaa
20	5	246980,7	20581,7	281769,5	23480,8	327954,9	27329,6
40	10	425731,2	35477,6	488042,9	40670,2	571689,9	47640,8
80	10	454772,8	37897,7	526592,9	43882,7	625312,7	52109,4

### 11.5 AD-muuntimen resoluutiot

AD-muuntimen resoluutiot on selvitetty käyttämällä apuna Fusion-piirin käyttöopasta [10]. AD-muuntimelle laskettiin resoluutiot kahdelle eri referenssijännitteelle, 2,56 voltia ja maksimijännitteelle, eli 3,3 voltille, sekä eri bittimäärille. Lisäksi molemmille referenssijännitteille laskettiin sisään tulevan jännitteen pienin muutos, jonka kullakin resoluutiolla voidaan havaita. Resoluutiot on laskettu käyttämällä kaavaa 3, josta esimerkkinä on laskettu LSB-bitin arvo 12 bitin muuntimelle.

$$U_{RES} = \frac{U_{REF}}{2^N} = \frac{2,56V}{2^{12}} = 0,625 mV$$

Muut arvot on laskettu samalla tavalla ja saadut tulokset on esitetty taulukossa 18. Taulukossa esiintyvät skaalaimen vahvistuskertoimet on esitetty Fusion-piirin käyttöoppaassa [10, s.154].

Taulukko 18. Resoluutiot.

<b>muuntimen resoluutio</b>	12 bittiä		10 bittiä		8 bittiä	
<b>Referenssijännite (V)</b>	2,56	3,3	2,56	3,3	2,56	3,3
<b>Jänniteresoluutio (mV)</b>	0,649	0,806	2,5	3,223	10,0	12,891
<b>Esiskaalaimen jänniteväli ja skaalaimen kerroin.</b>	<b>Pienin jännitevaihtelu, joka voidaan sisääntulevasta signaalista havaita. (mV)</b>					
0 V - 0,125 V, 20	0,03125		0,125		0,5	
0 V - 0,250 V, 10	0,0625		0,25		1,0	
0 V - 0,5 V, 5	0,125		0,5		2,0	
0 V - 1 V, 2,5	0,25		1,0		4,0	
0 V - 2 V, 1,25	0,5		2,0		8,0	
0 V - 4 V, 0,625	1,0		4,0		16,0	
0 V - 8 V, 0,3125	2,0		8,0		32,0	
0 V - 16 V, 0,15625	4,0		16,0		64,0	



## 11.6 Huomioita

### Mittaukset

Kaikkien mittausten perusteella kanavissa näyttäisi olevan kanavakohtaiset virheet, koska samalla jännitteellä osa kanavista näyttää jännitteen lähes oikein. Varsinkin lämpötilanmittauksessa huomattiin, että kanavien välillä on suuria eroja vaikka mitattava jännite oli kaikissa kanavissa sama. Jännitteen mittauksissa havaittiin useiden kymmenien millivolttien erot kanavien välillä. Koska yksi celsiusaste on jännitteenä kymmenen millivolttia, syntyy lämpötiloissakin monen asteen erot. Mittaustulokset vaihtelivat huomattavasti mittausten välillä. Huomattiin että esiskaalaimen jänniteväli vaikutti vaihteluun, mitä suurempi jänniteväli sitä enemmän tulokset vaihtelivat.

Vaikka käyttö- ja referenssijännitteet muuttuivatkin hieman eri asetuksilla, eivät ne muuttuneet niin paljoa, että ne olisivat vaikuttaneet mittauksiin. Referenssijännitteen muutokset pysyivät ilmoitetuissa  $\pm 23$  millivoltin rajoissa. Nollatasot näyttivät olevan suurimmaksi osaksi oikein, muutamaa tapausta lukuun ottamatta. Mittauksissa huomattiin, että analogialohkossa näyttäisi kuitenkin olevan pieni vahvistusvirhe (gain).

Jännitteen mittausten yhteydessä huomattiin, että mittauksissa esiintyi 20 millivoltin jännitekyynnys, joka mitattavan jännitteen tuli ylittää ennen kuin jännitteen muutos pystyttiin havaitsemaan. Ratkaisu tähän ongelmaan löytyi kehitysalustan maatasoista. Kehitysalustalla on eritelty digitaalinen ja analoginen maa, joiden potentiaali ero oli 20 millivolttia. Kun nämä maat yhdistettiin, mittaukset toimivat ongelmitta ja siihen mennessä tehdyt mittaukset uusittiin.

Ulkoisen lämpötilan mittauksen kanavassa AT4:ssä huomattiin joitakin erikoisuuksia. Ensimmäisin kanavassa oli käyttöjännite. Tämä aiheutti mittauksissa ongelmia, kun kanava kytkettiin piirilevylle. Tällöin se nosti koko piirilevyn jännitteitä hieman ylöspäin. Syytä kanavassa olevalle käyttöjännitteelle ei löytynyt, mutta luultavasti se liittyy lämpötilan mittaukseen puolijohteella, mihin kanava on suunniteltu. Toinen erikoisuus AT4-kanavassa oli se että esiskaalaimen jänniteväliksi piti määrittellä nolasta voltista kuuteentoista volttiin, jotta kanava mittasi oikein jännitevälin nolasta voltista neljään volttiin. Koska kehitysalustalla ei ollut käytettävissä toista ulkoista AT-kanavaa, ei voitu tutkia, oliko kyseessä tavanomaiset AT-kanavien ominaisuudet vai pelkästään tämän yhden kanavan viat. Ratkaisua ongelmiin ei myöskään löytynyt käyttöoppaasta [10].

Yhtaikaisten mittausten määrällä ei ollut merkitystä mittaustuloksiin. Kuitenkin joissakin tapauksissa referenssi- ja käyttöjännite muuttuivat hieman, mutta eivät kuitenkaan radikaalisti jotta ne olisivat vaikuttaneet mittauksiin.

### Näytteenottotaajuudet

Näytteenottotaajuuksien tarkastelussa huomattiin eräs omituisuus Actelin dokumenteissa. Käyttöoppaan [10] ja analogiasysteemin suunnitteluoppaan [13] välisissä tiedoissa oli eroavaisuuksia. Ilmoitettu sisäinen impedanssi oli käyttöoppaassa  $2\text{ k}\Omega$ :a, vaikka suunnitteluoppaassa oli käytetty esimerkkilaskuissa  $4\text{ k}\Omega$ :a. Kun näytteenottotaajuudet laskettiin, huomattiin että käyttämällä kokonaisimpedanssina  $4\text{ k}\Omega$ :a päästiin lähemmäs käyttöoppaassa ilmoitettuja maksiminäytteenottotaajuuksia. Käyttämällä  $2\text{ k}\Omega$ :a tuloksista tuli aivan liian suuria. Arvoitukseksi jäi, että onko virhe käyttöoppaan impedanssissa vai suunnitteluoppaan impedanssissa ja käyttöoppaan näytteenottotaajuuksissa.

Kuitenkin lasketuista näytteenottotaajuuksista (taulukot 4, 5 ja 6) voidaan päätellä mitattavan signaalin maksimitaajuudet. Oletetaan että esimerkkilaskuissa käytetty sisäisen impedanssin arvo  $4\text{ k}\Omega$ :a on oikea, jolloin maksiminäytteenottotaajuudet ovat 12 bitille noin 455 kHz, 10 bitille 527 kHz ja 8 bitille 625 kHz, kun ulkoinen impedanssi on nolla. Kun esiskaalain on käytössä, ovat maksiminäytteenottotaajuudet 12 bitille noin 86,6 kHz, 10 bitille 88,1 kHz ja 8 bitille 89,7 kHz. Eli mitattavien signaaleiden maksimitaajuudet ovat 12 bitillä ilman esiskaalainta noin 227,5 kHz ja skaalaimen kanssa 43,3 kHz, 10 bitillä ilman esiskaalainta noin 263,5 kHz ja skaalaimen kanssa 44,0 kHz sekä 8 bitillä ilman esiskaalainta noin 312,5 kHz ja skaalaimen kanssa 44,5 kHz.

### Resoluutiot

AD-muuntimen resoluutiot (taulukko 7) riippuvat käytetystä bittimäärästä ja referenssijännitteen suuruudesta. Työssä laskettiin jänniteresoluutiot eri kombinaatioilla ja samalla myös laskettiin mitattavan jännitteen erottelukyky. AD-muuntimen jänniteresoluutio vaihtelee välillä 0,649 millivoltista 12,89 millivolttiin ja mitattavan jännitteen pienin muutos välillä 0,031 millivoltista 64 millivolttiin.

Erottelukyvyyssä päästään jännitteellä parhaimmillaan 0,03125 volttiin, kuten myös virralla. Kuitenkaan tässä työssä käytetyllä lämpötila-anturilla ei päästä mitattavan jännitteen suuruuden takia, kuin 1 millivoltin tarkkuuteen, lämpötilassa tämä tarkoittaa 0,1 °C:tta. Tarkkuus on kuitenkin käytetyn anturin mittaustarkkuuteen nähden täysin riittävä.

Virran mittauksessa tarkimpaan mahdolliseen resoluutioon pääseminen on vaikeaa. Koska virran mittauksessa mitattava jännitehäviö vastuksen yli kerrotaan kymmenellä, pitäisi mittausvastuksen arvoa säätää, jotta saataisiin koko AD-muuntimen skaala käyttöön. Kuitenkin 2,56 voltin referenssijännitteellä ja 12 bitin muuntimella päästään 0,649 millivoltin tarkkuuteen. Tämä tarkoittaa mitattavassa jännitteessä 0,0649 millivoltin tarkkuutta, eli yhden ohmin vastuksella 0,0649 milliampeeria. Aina mittausvastusta ei voida vaihtaa, jolloin pitää virran mittaus toteuttaa pelkästään jännitteen mittauksella. Tällöin päästään tarkempaan resoluutioon. Tarkimmillaan pienimmällä jännitevälillä päästään 0,03125 millivoltin, eli yhden ohmin vastuksella 0,03125 milliampeerin resoluutioon.

## 12 JOHTOPÄÄTÖKSET

Suoritettujen mittausten tulosten perusteella, voidaan todeta että kalibroimattomana Fusion-piirin analogialohko ei ole kovinkaan stabiili. Mittaustulokset vaihtelevat lähes jokaisella mitauskerralla huomattavan paljon, joka kuitenkin saatiin hallintaan käytetyllä signaalin käsitteilyllä. Lisäksi vahvistuksessa tapahtuvan virheen takia suuremmilla arvoilla esiintyy mittaustuloksista virhettä. Mittausten perusteella useamman kanavan yhtäaikainen käyttö ei vaikuta mittaustuloksiin, vain näytteenottotaajuuteen. Kalibroimattomalla Fusion-piirillä ei voida oikein luotettavasti mitata tarkkoja arvoja.

Näytteenottotaajuudet ovat kauttaaltaan riittävät. Vaikka laskennoissa olikin hieman epäselvyyksiä, eivät ne vaikuttaneet laskuihin, joissa käytettiin esiskaalainta. Esiskaalainta käytettäessä voidaan teoriassa yhdellä kanavalla mitata, jopa täyttä äänikaistaa, kun käytössä on 12 bitin muunnin. Kuitenkin käytettäessä kaikkia kahtatoista kanavaa mitattavan signaalin maksimitaajuus jää noin 1,8 kHz:iin. Jos lasketut arvot ilman esiskaalainta pitävät paikkaansa, niin Fusion-piirillä voidaan mitata parhaassa tapauksessa jopa kahdellatoista kanavalla täyttä äänikaistaa. Ennakoivassa vikadiagnostiikassa voidaan saavutettavilla näytteenottotaajuuksilla huomata nopeasti piirille vaaralliset muutokset esimerkiksi käyttöjännitteessä. Koska näytteenoton jaksonaika on parhaimmillaan mikrosekunti luokkaa, voidaan hyvin todennäköisesti estää piirin vioittuminen nopeasti tarvittavilla toimenpiteillä.

Fusion-piirin resoluutiot ja erottelukyvyyt ovat hyvät. Jännitettä voidaan mitata jopa 30 mikrovoltin tarkkuudella. Virran mittauksessa ei päästä ihan yhtä hyvään tarkkuuteen, jos käytetään esiskaalaimen virran mittaus asetusta. Tällöin erottelukyky jää noin 60 mikrovoltin, eli 60 mikroampeerin, tarkkuuteen. Kuitenkin jos virran mittaus toteutetaan pelkällä jännitteen mittauksella päästään parempaan 30 mikrovoltin, eli 30 mikroampeerin, tarkkuuteen.

Fusion-piiri on kuitenkin hyvin suorituskykyinen ja monipuolinen laite. Työssä esille tulleista mittausten virheistä todennäköisesti päästäisiin eroon kalibroinnilla, jolloin saataisiin aikaiseksi tarkkoja tuloksia nopealla näytteenottotaajuudella luotettavasti. Piirin soveltuvuus elektronikan toimintakunnon seurantaan on hyvä. Nopealla näytteenotolla saadaan hyvinkin nopeat muutokset kiinni ja saavutettavat erottelukyvyyt riittävät mainiosti tarkkailuun. Piirin soveltuvuus esimerkiksi tärinän mittaukseen on todella hyvä, koska tärinöiden taajuudet eivät ole yleensä kovinkaan suuria. Näytteenottotaajuus riittää todella monikanavaisiin mittauksiin.

### 13 YHTEENVETO

Insinööriyön tavoitteena oli tutkia Actel Fusion-FPGA-piirin suorituskykyä ja sen soveltuvuutta ennakoivaan vikadiagnostiikkaan ja prognostiikkaan. Suorituskyvyn tutkiminen toteutettiin suorittamalla analogiasia mittauksia ja teoreettisilla laskennoilla. Mittauksia varten suunniteltiin ja toteutettiin yksinkertainen mittauspiirilevy, jossa oli osa-alueet jännitteelle, virralle ja lämpötilalle. Piirilevy suunniteltiin PADS-ohjelmistolla ja toteutettiin ammattikorkeakoulun piirilevyjyrsimellä. FPGA-piirin ohjelmointi ja ajaminen tapahtui Actelin Libero IDE v 8.6 ja SoftConsole IDE v 2.3 -ohjelmistoilla.

Työssä tutustuttiin käytettyyn kehitysalustaan, vikadiagnostiikkaan ja prognostiikkaan, FPGA-piireihin yleensä, VHDL-ohjelmointiin ja signaalinkäsittelyyn. Kehitysalustassa tutustuttiin tarkimmin Fusion-piirin analogialohkoon.

Suorituskykyä tutkittaessa tarkkailtiin AD-muuntimen ominaisuuksia, kuten näytteenottotaajuutta ja resoluutiota. Mittauksista pyrittiin selvittämään AD-muuntimen ja Fusion-piirin tarkkuus, stabiilius sekä mahdolliset virheet ja ongelmat.

Mittauksissa kävi ilmi että mittaustulokset eivät pitäneet tarkalleen paikkaansa. Mittausarvot vaihtelivat huomattavasti, vaikka mitattava arvo pysyi vakiona. Kuitenkin vaihtelusta päästiin eroon keskiarvoistamisella. Myös vahvistuksessa oli hieman virhettä. Lasketut näytteenottotaajuudet ja erottelukyvyyt olivat samaa luokkaa kuin valmistaja ilmoitti.

Yhteenvetona voidaan todeta että Fusion-piiri soveltuu hyvin elektroniikkatuotteen toimintakunnon seurantaan vaativissa olosuhteissa sekä ennakoivaan vikadiagnostiikkaan. Kun piiri kalibroitaisiin kunnolla, voitaisiin luotettavasti mitata tarkkojakin arvoja.

## LÄHTEET

1. Kajaanin AMK, Sekasingnaali-FPGA piirien soveltuvuus elektroniikkatuotteen toimintakunnan hallintaan, etättestaukseen ja ennakoivaan vikadiagnostiikkaan - eTest3. [PDF-dokumentti] < <http://www.kajak.fi/includes/loader.aspx?id=551d8ed8-f9f7-463a-93f6-6990271ed9e2> > (Luettu 27.2.2010)
2. IEEE, Prognostics implementation methods for electronics. Julkaistu 22.1.2007 - 25.1.2007 [PDF-dokumentti]  
 Saatavilla IEEE-tietokannasta: < <http://www.kajak.fi/suomeksi/Kirjasto/E-aineistot> >  
 Tarkkaosoite (vaatii kirjautumisen):  
 < <https://remote.kajak.fi/stamp/,DanaInfo=.aifgh1urvznJtqrsO48y+stamp.jsp?tp=&ar number=4126332> >  
 (Luettu 10.3.2010)
3. FPGA central, FPGA Architecture. Viimeksi muokattu 11.2.2009. [WWW-dokumentti]  
 < <http://www.fpgacentral.com/docs/fpga-tutorial/fpga-architecture> >
4. FPGA central, FPGA logic blocks. Viimeksi muokattu 11.2.2009. [WWW-dokumentti]  
 < <http://www.fpgacentral.com/docs/fpga-tutorial/fpga-logic-blocks> >
5. Doulos, What is VHDL? [WWW-dokumentti]  
 < [http://www.doulos.com/knowhow/vhdl\\_designers\\_guide/what\\_is\\_vhdl/](http://www.doulos.com/knowhow/vhdl_designers_guide/what_is_vhdl/) >  
 (Luettu 23.2.2010)
6. Honkanen Harri, Kajaanin AMK oppimateriaali, VHDL,  
 < Honkanen H. < <http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/HonHar/ma/VHDL-ohje.pdf> > (Luettu 27.2.2010)
7. Doulos, A Brief history of VHDL [WWW-dokumentti]  
 < [http://www.doulos.com/knowhow/vhdl\\_designers\\_guide/a\\_brief\\_history\\_of\\_vhdl/](http://www.doulos.com/knowhow/vhdl_designers_guide/a_brief_history_of_vhdl/) >  
 > (Luettu 25.2.2010)

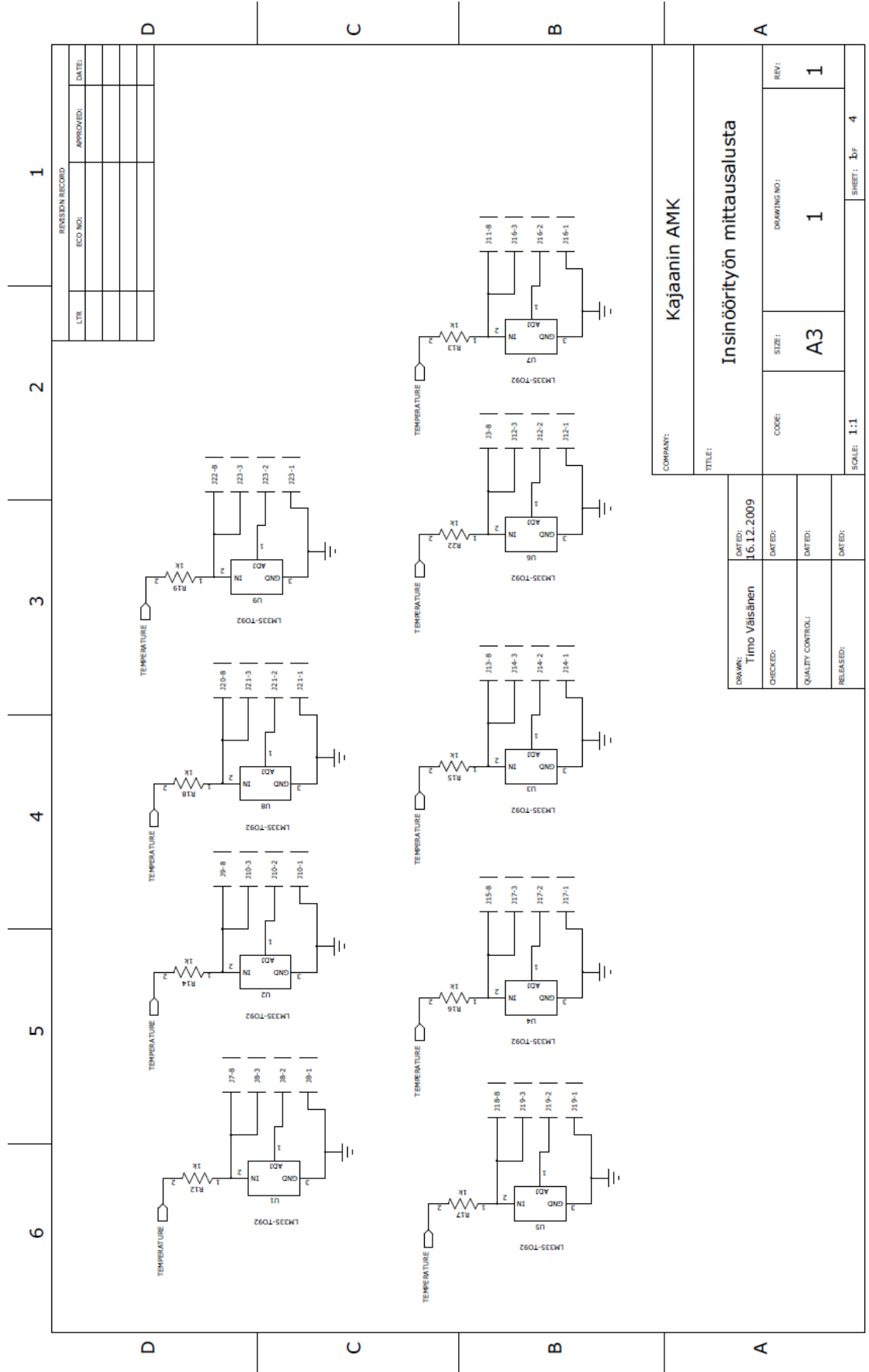
8. Nurmi J., Kuulusa M., Saastamoinen I., Proessori-lehden artikkeli Miljardin transistorin piirit tuottavasti. Julkaistu marraskuussa 2000. [WWW-dokumentti]  
< <http://www.proessori.fi/es00/arkisto/virtuaal.htm> > (Luettu 24.2.2010)
9. Actel, Improving ADC Results. [PDF-dokumentti]  
< [http://www.actel.com/documents/Improve\\_ADC\\_WP.pdf](http://www.actel.com/documents/Improve_ADC_WP.pdf) > (Luettu 8.3.2010)
10. Actel, Actel Fusion hand book. Julkaistu elokuussa 2009. [PDF-dokumentti]  
< [http://www.actel.com/documents/Fusion\\_HB.pdf](http://www.actel.com/documents/Fusion_HB.pdf) > (Luettu 16.11.2009)
11. Actel, Fusion mixed-signal FPGAs [WWW-dokumentti]  
< <http://www.actel.com/products/fusion/default.aspx> > (Luettu 16.11.2009)
12. Actel, Fusion Embedded Development Kit Users guide. Julkaistu elokuussa 2009. [PDF-dokumentti]  
< [http://www.actel.com/products/hardware/devkits\\_boards/fusion\\_embedded.aspx](http://www.actel.com/products/hardware/devkits_boards/fusion_embedded.aspx) >  
(Luettu 23.11.2009)
13. Actel, Designing the Fusion Analog System. Julkaistu lokakuussa 2008 [PDF-dokumentti]  
< [http://www.actel.com/documents/Fusion\\_Analog\\_HBs.pdf](http://www.actel.com/documents/Fusion_Analog_HBs.pdf) > (Luettu 27.3.2010)
14. Honkanen Harri, Kajaanin AMK opintomateriaali, A/D-muuntimet. [PDF-dokumentti]  
< [http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/HonHar/ma/ADDA\\_ADconv.pdf](http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/HonHar/ma/ADDA_ADconv.pdf) >  
(Luettu 26.1.2010)
15. RoHS-directive, Official Journal of the European Union. Julkaistu 13.02.2003. [PDF-dokumentti]  
< <http://www.rohs.eu/english/legislation/docs/launchers/launch-2002-95-EC.html> >  
(Luettu 21.01.2010)
16. Actel, Actel Fusion Embedded Development Kit. [WWW-dokumentti]  
< [http://www.actel.com/products/hardware/devkits\\_boards/fusion\\_embedded.aspx](http://www.actel.com/products/hardware/devkits_boards/fusion_embedded.aspx) >  
(Luettu 15.11.2009)

17. Actel, M1AFS Embedded Development Kit Schematics. [PDF-dokumentti]  
<  
[http://www.actel.com/portal/default.aspx?r=17&p=f=M1AFS\\_EMBEDDED\\_KIT\\_S](http://www.actel.com/portal/default.aspx?r=17&p=f=M1AFS_EMBEDDED_KIT_S)  
> (Luettu 24.1.2010)
  
18. National Semiconductor, LM335 datasheet. Julkaistu helmikuussa 1995. [PDF-dokumentti]  
< <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS005698.PDF>  
>  
(Luettu 21.12.2009)
  
19. Actel, ARM Cortex-M1 Embedded Processor Hardware Development Tutorial. Julkaistu marraskuussa 2009. [PDF-dokumentti]  
< [http://www.actel.com/documents/CortexM1\\_Proc\\_HW\\_Tutorial\\_UG.pdf](http://www.actel.com/documents/CortexM1_Proc_HW_Tutorial_UG.pdf) >
  
20. Actel, ARM Cortex-M1 Embedded Processor Software Development Tutorial. Julkaistu marraskuussa 2009. [PDF-dokumentti]  
< [http://www.actel.com/documents/CortexM1\\_Proc\\_SW\\_Tutorial\\_UG.pdf](http://www.actel.com/documents/CortexM1_Proc_SW_Tutorial_UG.pdf) >

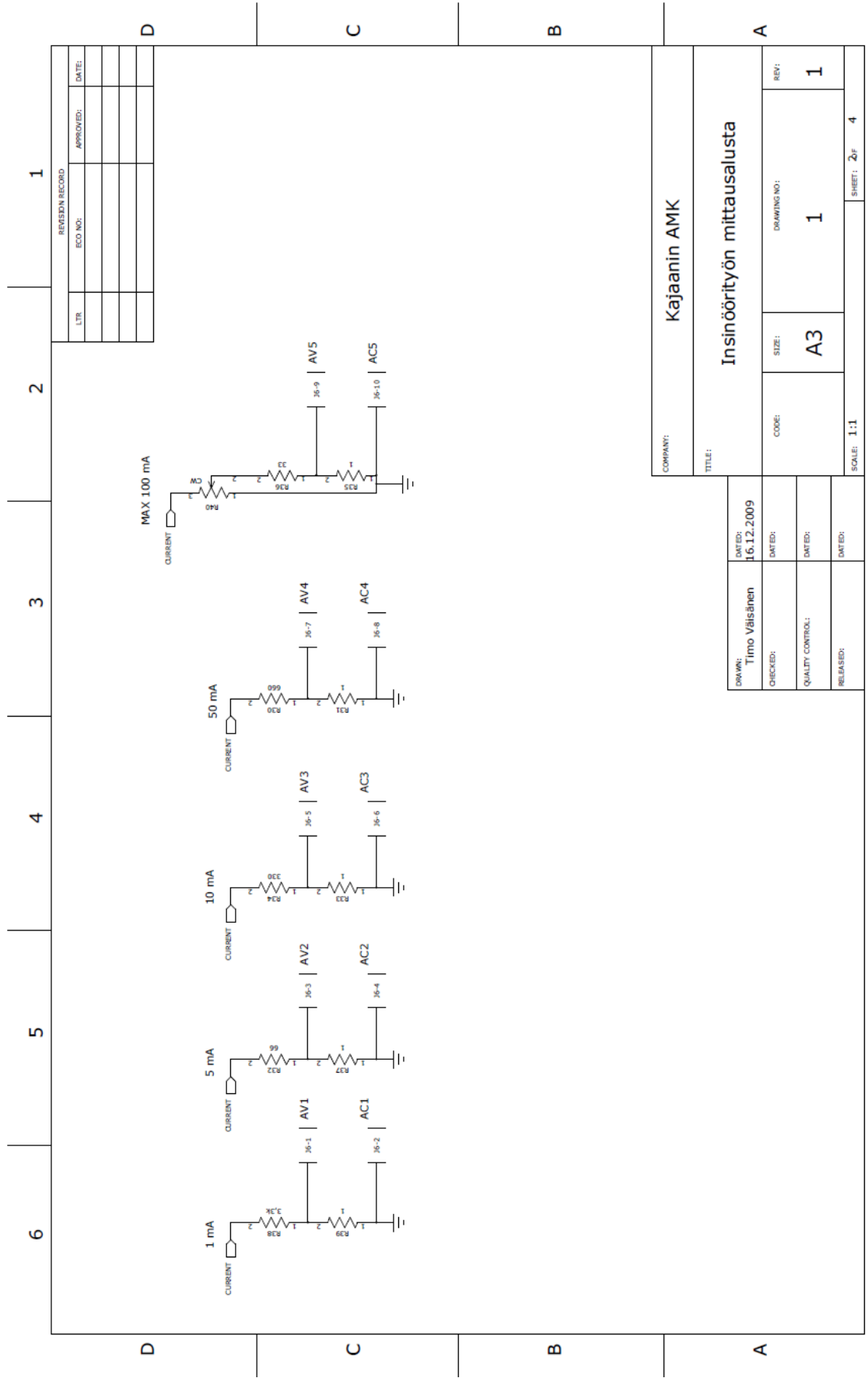


## LIITTEIDEN LUETTELO

- LIITE 1 Mittauspiirilevyn PADS-kuvat
- LIITE 2 Kuvia valmiista mittauspiirilevystä
- LIITE 3 SmartDesign-kytkentäkuva
- LIITE 4 C-koodit

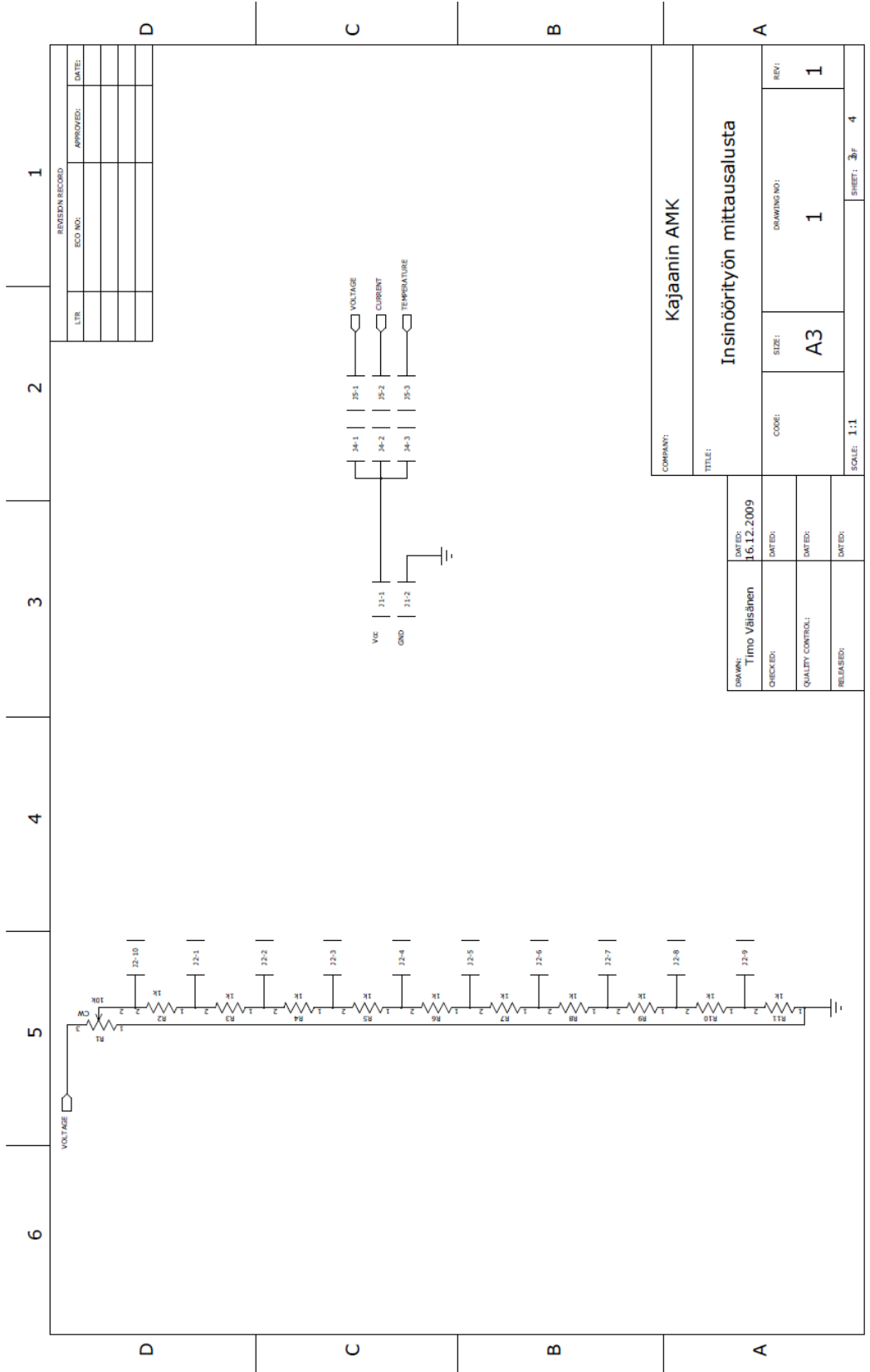


COMPANY: <b>Kajaanin AMK</b>		TITLE: <b>Insinööriyön mittausalusta</b>	
DRAWN: <b>Timo Väisänen</b>	DATE: <b>16.12.2009</b>	CODE: <b>A3</b>	REV: <b>1</b>
CHECKED:	DATE:	SIZE: <b>1</b>	DRAWING NO: <b>1</b>
QUALITY CONTROL:	DATE:	SCALE: <b>1:1</b>	SHEET: <b>bf</b> / <b>4</b>
RELEASED:	DATE:		



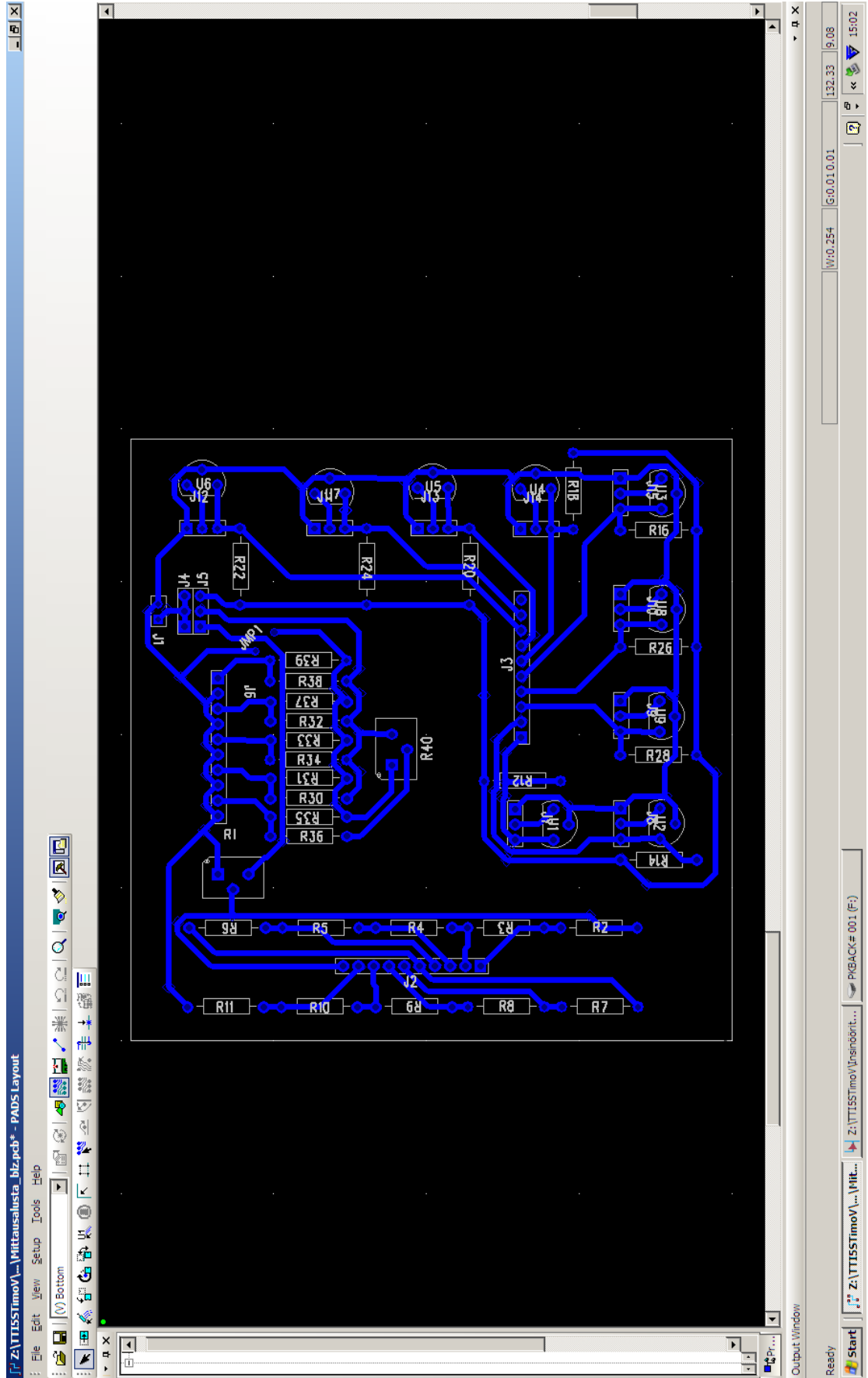
REVISION RECORD		
LTR.	ECO NO.	APPROVED:

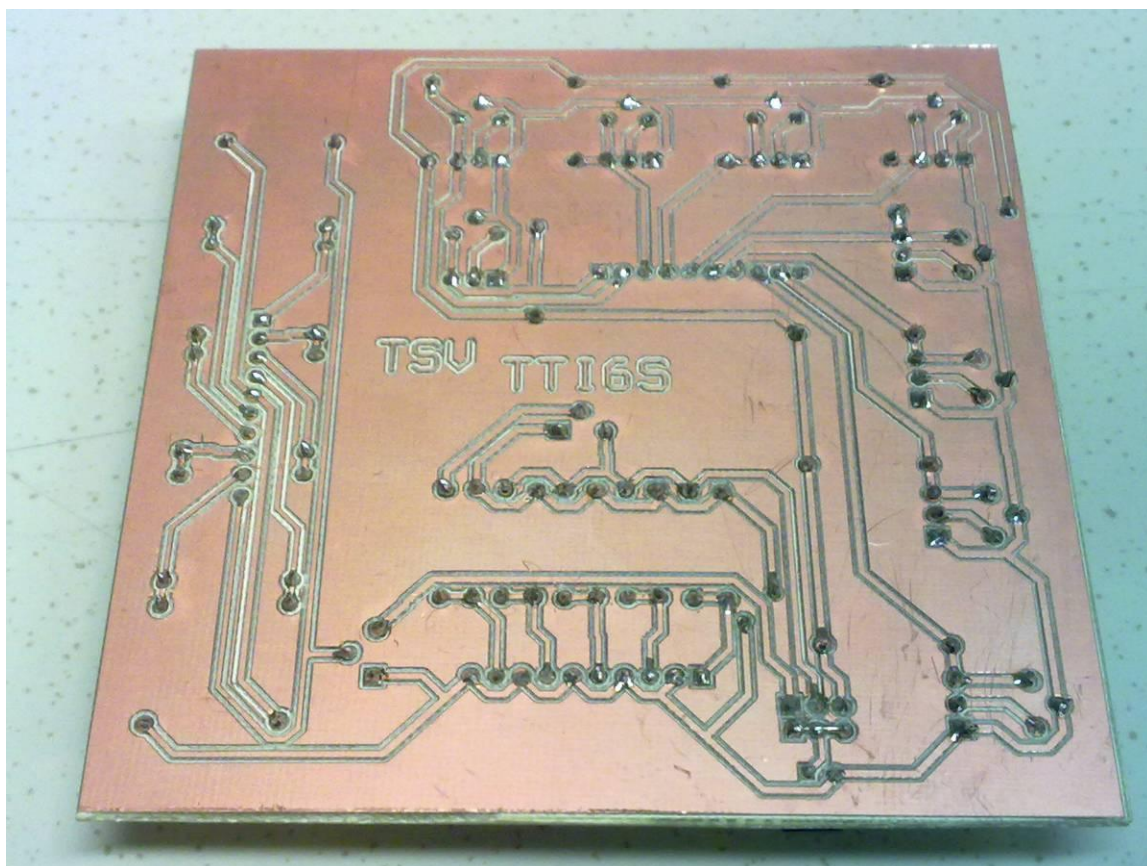
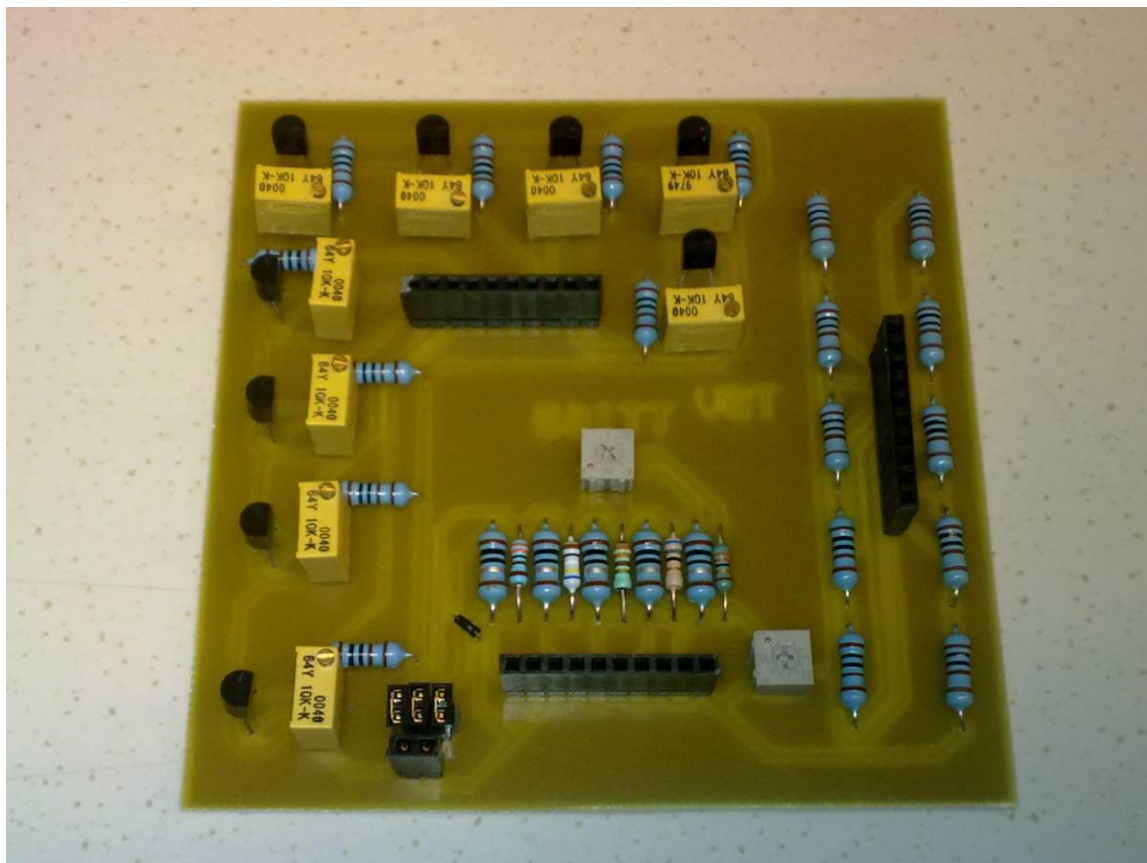
COMPANY: <b>Kajaanin AMK</b>	
TITLE: <b>Insinööriyön mittausalusta</b>	
CHECKED: <b>Timo Väisänen</b>	DATE: <b>16.12.2009</b>
QUALITY CONTROL:	DATE:
RELEASED:	DATE:
CODE:	SIZE: <b>A3</b>
DRAWING NO: <b>1</b>	REV: <b>1</b>
SCALE: <b>1:1</b>	SHEET: <b>2/4</b>



REVISION RECORD		
LTR	ECO NO.	APPROVED

COMPANY: <b>Kajaanin AMK</b>		TITLE: <b>Insinööriyön mittausalusta</b>	
DRAWN: <b>Timo Välsänen</b>	DATED: <b>16.12.2009</b>	CODE:	DRAWING NO: <b>1</b>
CHECKED:	DATED:	SIZE: <b>A3</b>	REV: <b>1</b>
QUALITY CONTROL:	DATED:	SCALE: <b>1:1</b>	SHEET: <b>3</b> of <b>4</b>
RELEASED:	DATED:		







Main.c-tiedoston alkuun lisätyt määrittelyt:

```
/* Keskiarvoistamisen asetus: 1 = päällä, 0 = pois päältä. */
#define averaging 0
/* Keskiarvoistuksen ikkunan pituus. */
#define SAMPLES 5
/* Tulostettavan yksikön valinta: 0 = mV, 1 = C, 2 = mA tulostusaliohjelmaa varten. */
#define define_unit 0
```

Tulostus-aliohjelman esittely main.c-tiedoston alussa:

```
void tulostus(uint16_t voltage, uint8_t channel_nb, uint16_t temp);
```

Keskiarvoistamista varten lisättyjen kanavakohtaisten muuttujien esittely:

```
/* Keskiarvoistamiseen kanavakohtaiset muuttujat */
uint16_t ed_av0;
uint16_t ed_av1;
uint16_t ed_av2;
uint16_t ed_av3;
uint16_t ed_av5;
uint16_t ed_av6;
uint16_t ed_ac0;
uint16_t ed_ac1;
uint16_t ed_ac2;
uint16_t ed_ac3;
uint16_t ed_ac4;
uint16_t ed_ac5;
uint16_t ed_ac6;
uint16_t ed_at2;
uint16_t ed_at4;
```

Keskiarvoistamista varten lisättyjen muuttujien esittely:

```
/* Keskiarvoistamisen muuttujat. */
uint16_t valitulos;
uint16_t keskiarvoistus;

/* Varamuuttuja. */
uint16_t temp;
```

Kaikki esitellyt muuttujat alustetaan pääohjelman (main) alussa.



Aliohjelma jännitteen mittaukseen:

```

void display_voltage ( uint8_t channel_nb, uint16_t raw_value )
{
    uint32_t full_scale;          // Kanavalle määritelty maksimiarvo
    uint16_t voltage;            // Jännitteen arvo

    /* Kanavalle määritellyn mittausalueen maksimin tallentaminen muuttujaan. */
    full_scale = CAI_input_full_range( channel_nb );

    /* Muunnos ADC:n arvosta jännitteeksi mV. */
    voltage = (full_scale * raw_value) / ADC_RESOLUTION;

    /*
    Kanavakohtainen näyttöiden käsittely. Tutkitaan if rakenteella mikä kanava kulloinkin on kyseessä. Jännitteen
    mittauksen kanavat: AV0 (kanavanumero 1), AV1 (kanavanumero 4), AV2 (kanavanumero 7), AV3 (kanava-
    numero 10), AV5 (kanavanumero 16), AV6 (kanavanumero 19), AC2 (kanavanumero 8), AC3 (kanavanumero
    11), AC4 (kanavanumero 14), AC5 (kanavanumero 17), AC6 (kanavanumero 20), AT4 (kanavanumero 15).
    Kanavan if-lauseen sisällä on toinen if-else-rakenne, jolla tutkitaan onko keskiarvoistaminen laitettu päälle.
    */
    if(channel_nb==1)            // Kanava AV0
    {
        /* Tutkitaan onko keskiarvoistaminen laitettu päälle. */
        if(averaging==1)
        {
            /* Lasketaan keskiarvoistus. */
            valitulos=(ed_av0-(ed_av0/SAMPLES))+voltage;
            ed_av0 = valitulos;
            keskiarvoistus=valitulos/SAMPLES;
            /* Koska tulostusaliiohjelma on yleiskäyttöinen, pitää tulostusta varten sijoittaa tulostettava
            arvo voltage-muuttujaan. */
            voltage=keskiarvoistus;
            /* Kutsutaan tulostusaliiohjelma. */
            tulostus(voltage,channel_nb);
        }
        else
        {
            tulostus(voltage,channel_nb);
        }
    }
}

```

Koodi on sen laajuuden takia supistettu. Koodista on jätetty pois muiden käytettyjen kanavien käsittelyt. Ne kuitenkin ovat hyvin samankaltaisia kuin yllä esitetty, vain kanavakohtainen muuttuja ja kanavan numero vaihtuvat.

Aliohjelma virran mittaukseen:

```

void display_current ( uint8_t channel_nb, uint16_t raw_value )
{
    uint16_t voltage;          // Jänniteen arvo
    uint16_t current;         // Virran arvo
    uint16_t result;          // Muuttuja laskuja varten
    temp=0;

    /* Muunnos ADC:n arvosta virraksi mA. */
    result = (2560 * raw_value) / ADC_RESOLUTION;
    current = ((result / 11)); // Jaetaan 11:sta, koska vastus ei ole tasan yhtä ohmia

    /*
    Kanava kohtainen näytteiden käsittely. Tutkitaan if rakenteella mikä kanava kulloinkin
    on kyseessä. Virran mittauksen kanavat: AC0 (kanavanumero 2), AC1 (kanavanumero 2),
    AC2 (kanavanumero 2), AC3 (kanavanumero 2), AC5 (kanavanumero 2) ja AC6 (kanavanumero 2).
    Jokaisen kanavan if-lauseen sisällä on toinen if-else-rakenne, jolla tutkitaan onko
    keskiarvoistaminen laitettu päälle.
    */

    if(channel_nb==2)          // Kanava AC0
    {
        /* Tutkitaan onko keskiarvoistaminen laitettu päälle. */
        if(averaging==1)
        {
            /* Lasketaan keskiarvoistus. */
            valitulos=(ed_ac0-(ed_ac0/SAMPLES))+current;
            ed_ac0 = valitulos;
            keskiarvoistus=valitulos/SAMPLES;
            /* Koska tulostusaliohjelma on yleiskäyttöinen, pitää tulostusta varten sijoittaa
            tulostettava arvo voltage-muuttujaan. */
            voltage=keskiarvoistus;
            /* Kutsutaan tulostusaliohjelma. */
            tulostus(voltage,channel_nb,temp);
        }
        /* Jos keskiarvoistaminen ei ole päällä. */
        else
        {
            /* Koska tulostusaliohjelma on yleiskäyttöinen, pitää tulostusta varten sijoittaa
            tulostettava arvo voltage-muuttujaan. */
            voltage=current;
            /* Kutsutaan tulostusaliohjelma. */
            tulostus(voltage,channel_nb,temp);
        }
    }
}

```

Koodi on sen laajuuden takia supistettu. Koodista on jätetty pois muiden käytettyjen kanavien käsittelyt. Ne kuitenkin ovat hyvin samankaltaisia kuin yllä esitetty, vain kanavakohtainen muuttuja ja kanavan numero vaihtuvat.

Aliohjelma sisäisen lämpötilan mittaukseen:

```

void display_temperature ( uint8_t channel_nb, uint16_t raw_value )
{
    uint32_t voltage; // Muuttuja jännitteelle
    temp = 0;
    /* Muunnos AD-muuntimen arvosta lämpötilaksi. */
    voltage = (raw_value / 4) - 273;
    /*
    Kanavakohtainen näytteiden käsittely. Tutkitaan if rakenteella mikä kanava kulloinkin on kyseessä. Sisäisen
    lämpötilan mittauksen kanava: AT2 (kanavanumero 9). Kanavan if-lauseen sisällä on toinen if-else-rakenne,
    jolla tutkitaan onko keskiarvoistaminen laitettu päälle.
    */

    if(channel_nb==9) // Kanava AT2
    {
        /* Tutkitaan onko keskiarvoistaminen laitettu päälle. */
        if(averaging==1)
        {
            /* Lasketaan keskiarvoistus. */
            valitulos=(ed_at2-(ed_at2/SAMPLES))+voltage;
            ed_at2 = valitulos;
            keskiarvoistus=valitulos/SAMPLES;
            /* Koska tulostusaliohjelma on yleiskäyttöinen, pitää tulostusta varten sijoittaa
            tulostettava arvo voltage-muuttujaan. */
            voltage=keskiarvoistus;
            /* Kutsutaan tulostusaliohjelma. */
            tulostus(voltage,channel_nb,temp);
        }
        /* Jos keskiarvoistaminen ei ole päällä. */
        else
        {
            /* Kutsutaan tulostusaliohjelma. */
            tulostus(voltage,channel_nb,temp);
        }
    }
}

```

Aliohjelma ulkoisten lämpötilojen mittaukseen:

```

void display_voltage ( uint8_t channel_nb, uint16_t raw_value )
{
    uint32_t full_scale;           // Kanavalle määritelty maksimiarvo
    uint16_t voltage=0;           // Jänniteen arvo

    /* Kanavalle määritellyn mittausalueen maksimin tallentaminen muuttujaan. */
    full_scale = CAI_input_full_range( channel_nb );

    /* Muunnos ADC:n arvosta jännitteeksi mV. */
    voltage = ((full_scale * raw_value) / ADC_RESOLUTION);

    /* Muunnos jännitteestä lämpötilaksi. */
    voltage = (result - (2980-(25*10)))/10;
    temp=voltage;

    /* Muunnos negatiivisille lämpötila-arvoille. */
    if(temp>50000)
    {
        /* Jos lämpötila on negatiivinen, lasketaan negatiivinen arvo. */
        voltage=65536-voltage;
    }

    /*
    Kanavakohtainen näytteiden käsittely. Tutkitaan if rakenteella mikä kanava kulloinkin
    on kyseessä. Ulkoisten lämpötilojen mittausten kanavat: AV2 (kanavanumero 7), AV3 (kanavanumero 10),
    AV5 (kanavanumero 16), AV6 (kanavanumero 19), AC2 (kanavanumero 8), AC3 (kanavanumero 11), AC5
    (kanavanumero 17), AC6 (kanavanumero 20), AT4 (kanavanumero 15). Kanavan if-lauseen sisällä on toinen if-
    else-rakenne, jolla tutkitaan onko keskiarvoistaminen laitettu päälle.
    */
    if(channel_nb==1)           //Kanava AV0
    {
        /* Tutkitaan onko keskiarvoistaminen laitettu päälle. */
        if(averaging==1)
        {
            /* Lasketaan keskiarvoistus. */
            valitulos=(ed_av0-(ed_av0/SAMPLES))+voltage;
            ed_av0 = valitulos;
            keskiarvoistus=valitulos/SAMPLES;
            /* Koska tulostusaliohjelma on yleiskäyttöinen, pitää tulostusta varten sijoittaa
            tulostettava arvo voltage-muuttujaan. */
            voltage=keskiarvoistus;
            /* Kutsutaan tulostusaliohjelma. */
            tulostus(voltage,channel_nb,temp);
        }
        /* Jos keskiarvoistaminen ei ole päällä. */
        else
        {
            /* Kutsutaan tulostusaliohjelma. */
            tulostus(voltage,channel_nb,temp);
        }
    }
}

```

Koodi on sen laajuuden takia supistettu. Koodista on jätetty pois muiden käytettyjen kanavien käsittelyt. Ne kuitenkin ovat hyvin samankaltaisia kuin yllä esitetty, vain kanavakohtainen muuttuja ja kanavan numero vaihtuvat.

Aliohjelma tulostukseen:

```

void tulostus(uint16_t voltage, uint8_t channel_nb, uint16_t temp)
{
    uint8_t value_text_reverse[MAX_TEXT_BUFFER_SIZE]; // Taulukko tekstille
    uint8_t unit[] = " mV"; // Yksikkö lämpötilalle
    uint8_t unit2[] = " C "; // Yksikkö jännitteelle
    uint8_t unit3[] = " mA"; // Yksikkö virralle
    uint8_t idx = 0; // Muuttuja tekstin tulostukseen
    uint8_t minus[1] = "-"; // Miinus-merkki

    /* Kanavan nimen tulostus sarjaporttiin. */
    UART_send( &g_the_uart, &channel_name_lut[channel_nb][0], CHAN_NAME_MAX_SIZE );
    /* Tekstin generointi taulukkoon. */
    idx = MAX_TEXT_BUFFER_SIZE;
    do {
        idx--;
        value_text_reverse[idx] = (voltage % 10) + '0';
        voltage = voltage / 10;
    } while( ( voltage > 0 ) && (idx > 0) );
    /* Kanavan nimen ja mittausarvon tyhjä väli. */
    while( idx > (MAX_TEXT_BUFFER_SIZE - 4) )
    {
        idx--;
        value_text_reverse[idx] = ' ';
    }
    /* Tulostetaan miinusmerkki, jos luku negatiivinen. */
    if(temp>50000)
    {
        /* Tulostetaan miinus-merkki sarjaporttiin. */
        UART_send( &g_the_uart, minus, sizeof(minus) );
    }
    /* Tulostetaan arvot sarjaporttiin. */
    UART_send( &g_the_uart, &value_text_reverse[idx], MAX_TEXT_BUFFER_SIZE - idx );
    /* Tulostetaan valittu yksikkö sarjaporttiin. */
    /* Jos käytössä sisäinen lämpötilan mittaus. */
    if(channel_nb==9)
    {
        UART_send( &g_the_uart, unit2, sizeof(unit2) );
    }
    /* Jos käytössä virran, jännitteen tai ulkoisen lämpötilan mittaus. */
    else
    {
        /* Tutkitaan mikä yksikkö on määritelty define_unitiin ja tulostetaan se sarjaporttiin. */
        if(define_unit==0)
        {
            UART_send( &g_the_uart, unit, sizeof(unit) );
        }
        if(define_unit==1)
        {
            UART_send( &g_the_uart, unit2, sizeof(unit2) );
        }
        if(define_unit==2)
        {
            UART_send( &g_the_uart, unit3, sizeof(unit3) );
        }
    }
}

```