

Juhani Palttala

Laite dynaamisen voima-anturin liittämiseksi tietokoneeseen

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 8. toukokuuta 2010.

Työn valvoja:

Prof. Pekka Eskelinen

Työn ohjaaja:

DI Lasse Leppäkorpi



Aalto-yliopisto
Teknillinen korkeakoulu

Tekijä: Juhani Palttala

Työn nimi: Laite dynaamisen voima-anturin liittämiseksi tietokoneeseen

Päivämäärä: 8. toukokuuta 2010

Kieli: Suomi

Sivumäärä:8+58

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Elektroniikan laitos

Professuuri: Sovellettu elektroniikka

Koodi: S-66

Valvoja: Prof. Pekka Eskelinen

Ohjaaja: DI Lasse Leppäkorpi

Väestön ikääntyessä vanhustenhoito vaatii lisää työvoimaa. Työtä voitaisiin mahdollisesti helpottaa automatisoimalla joitain rutiininomaiseen terveydentilan valvontaan liittyviä asioita. Yksi mahdollisuus on henkilön tilan tarkkailu ballistokardiografian menetelmin.

Tässä työssä suunniteltiin ja toteutettiin yksinkertainen pietsosähköiseen voimaanturiin perustuva laite, joka kytketään tietokoneeseen USB-liitännän kautta ja jonka avulla voidaan vuoteessa olevan henkilön elintoimintoja seurata edullisesti ja ilman tarvetta kiinnittää ihmiseen minkäänlaisia johtoja tai antureita.

Laite täyttää tavoitteet hyvin. Se on mittausten perusteella vähäkohinainen ja siten heikkojenkin elintoimintoihin liittyvien voimien mittaaminen on mahdollista. Laitetta suunniteltaessa oli vain alustava käsitys eri ominaisuuksien todellisesta tarpeesta, joten se suunniteltiin siten, että useita eri ominaisuuksia voitaisiin kokeilla. Koekäytön perusteella osa ominaisuuksista on tarpeettomia, joten seuraavassa versiossa monimutkaisuutta ja kustannuksia voidaan vähentää jättämällä ne pois.

Avainsanat: dynaaminen voima-anturi, ballistokardiografia, vuodemonitorointi, datankeruu

Author: Juhani Palttala

Title: A device for connecting a dynamic force sensor to a computer

Date: 8. toukokuuta 2010

Language: Finnish

Number of pages:8+58

Faculty of Electronics, Communications and Automation

Department of electronics

Professorship: Applied electronics

Code: S-66

Supervisor: Prof.Pekka Eskelinen

Instructor: M.Sc. (Tech.) Lasse Leppäkorpi

As the percentage of old people in Finland grows due to the retiring of "large age groups", an increasing amount of labour is required in the field of geriatrics. One solution to ease the work of the nurses could be utilizing contactless vital function monitoring. This can be implemented in several ways including acceleration sensors, force sensors and even radar.

In this paper, a small self-contained ballistocardiographic (BCG) system with on-board force sensor, analog-to-digital converter (ADC) and USB connection is presented. The objective was to design a device that can be installed inside different enclosures to reliably measure the vital functions of a person in different situations. The primary goal was a sensor plate that can be placed under the mattress in a hospital bed. A secondary goal was a small aluminium sensor box to be placed under a chair leg to demonstrate the technology in office surroundings.

The design target were met commendably. Using the device, the vital functions of the person in a bed or a chair can be monitored without the need of connecting any wires or other systems to the person. The noise level is small enough to allow measuring of even the weakest heart beat. As the importance of different features was unclear prior to beginning of this study, the device was designed with ability to evaluate several different features. However, after building prototypes and testing them in real condition, some of the features were found to be useless. Thus, in the future development the device can be designed less complex and more affordable by omitting unnecessary circuitry.

Keywords: dynamic force sensor, ballistocardiography, bed monitoring, data acquisition

Esipuhe

Tämä diplomityö tehtiin Finsor Oy:lle. Kiitän Lasse Leppäkorpea ja muita työka- vereita diplomityön mahdollistamisesta ja kaikista neuvoista eri ongelmissa. Työn valvojalle Pekka Eskeliselle kiitos nopeasta palautteesta työn edetessä ja kärsivälli- syydestä projektin venyessä.

Työ opetti uusia asioita muun muassa A/D-muuntimiin, pietsosähköisiin ilmiöi- hin, häiriöiden hallintaan ja yleensä elektroniikkalaitteen suunnitteluun liittyen, ja tulosten käsittely pakotti opettelemaan Python-ohjelmointikielen alkeita, mistä on varmasti jatkossa hyötyä.

Vaimolleni Riikalle kiitos tuesta ja kannustuksesta sekä avusta kuvien tekemises- sä. Haluan kiittää myös kaikkia ystäviä ja tuttaviam, jotka ovat jollain tavalla autta- neet tämä työn valmistumista. Erityisesti kiitos Kimmolle suuresta avusta \LaTeX in liittyen. Kiitos myös vanhemmilleni kannustuksesta ja tuesta opiskeluun ja muuhun- kin liittyen.

Ari Sihvolalle kiitos tieteellisen ajattelun opettamisesta sähkömagneettisen kent- täteorian kursseilla.

Ja ennen kaikkea — Luojalle kiitos sääntöjä noudattavasta maailmankaikkeu- desta, jota ihminen voi ilokseen tutkia ja yrittää ymmärtää.

Otaniemi, 8. toukokuuta 2010

Juhani Palttala

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
1.1 Tausta	1
1.2 Tavoitteet	1
2 Lähtökohdat	2
2.1 Ballistokardiografia potilasvalvonnassa	2
2.2 Ballistokardiografian mittausten menetelmät	3
2.3 Patjan alle sijoitettava voima-anturilevy	5
2.4 Dynaaminen voima-anturi	5
3 Suunnittelu	6
3.1 Anturi ja varausvahvistin	7
3.2 Analoginen signaalikäsitteily	9
3.2.1 Alipäästösuodatus	9
3.2.2 Säädetty vahvistus	11
3.3 Analogia-digitaalimuunnos	12
3.3.1 A/D-muuntimet yleisesti	12
3.3.2 Muunnintyytit	14
3.3.3 A/D-muuntimen valintaperusteet	20
3.3.4 ADS8343	21
3.3.5 A/D-muuntimen tulosten ajaminen	21
3.4 Mikro-ohjain	25
3.4.1 Mikro-ohjaimet yleisesti	25
3.4.2 Atmel ATMEGA8	27
3.5 Piirilevy	28
3.5.1 Piirilevyn lähtökohdat	28
3.5.2 Häiriöiden synty	29
3.5.3 Häiriöiden hallinta	30
3.5.4 Piirilevyn suunnittelu	31
4 Mittaukset	34
4.1 Voima-anturin mittaaminen	34
4.2 Antialiassuodatin ja sykekanavan ylipäästösuodatin	45
4.3 Kohinamittaukset	47

5 Tulosten analysointi	48
5.1 Koemittaus sängyssä	48
5.2 Askelvastemittaukset	48
5.3 Ali- ja ylipäästösuodattimet	52
5.4 Kohinamittaukset	52
6 Yhteenveto ja pohdinnat	54
6.1 Yhteenveto	54
6.2 Pohdinnat	55
6.3 Jatkotutkimus	55
Viitteet	56

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

b	bitti
C	kapasitanssi
D_n	digitaalinen signaali
dB	desibeli
R	resistanssi
F	faradi, kapasitanssin C mittayksikkö
f	taajuus
f_s	näytteenottotaajuus
Hz	hertsi, taajuuden F yksikkö
k	kerroin
kg	kilogramma
N	newton, voiman yksikkö
Q	varaus
s	sekunti
$S_{MAX(RMS)}$	suurimman mahdollisen sinimuotoisen tulosignaalin tehollisarvo
$S_{N(RMS)}$	kohinan tehollisarvo
t_{AQ}	näytteistysaika, <i>aquisition time</i>
t_c	varautumisaika
t_d	purkautumisaika
U	jännite
V_{CC}	piirin käyttöjännite
V_{DAC}	D/A-muuntimen lähtöjännite
V_{IN}	tulojännite
V_{OUT}	lähtöjännite
V_{REF}	vertailujännite
Ω	ohmi, resistanssin R yksikkö
τ	aikavakio
$^\circ$	aste, vaihe-eron yksikkö

Lyhenteet

AC	vaihtovirta, <i>alternating current</i>
ADC	analogia-digitaalimuunnin, <i>analog-to-digital converter</i>
BKG	ballistokardiografia
C0G	dielektreettityyppi
CPU	(mikroprosessorin) keskusyksikkö, <i>central processing unit</i>
CS	katso SS
DAC	digitaal-analogiamuunnin, <i>digital-to-analog converter</i>
DC	tasavirta, <i>direct current</i>
EEPROM	sähköisesti tyhjennettävä ohjelmoitava lukumuisti, <i>electronically erasable programmable read only memory</i>
EKG	elektrokardiografia
ENOB	tehollisten bittien määrä, <i>effective number of bits</i>
EPROM	tyhjennettävä ohjelmoitava lukumuisti, <i>erasable programmable read only memory</i>
FIR	äärellinen impulssivaste, <i>finite impulse response</i>
I ² C	<i>inter-integrated circuit</i>
I ² S	<i>integrated intership sound</i> , sarjaprotokolla audiosignaaleille
I/O	tulo ja lähtö, <i>input/output</i>
LCD	nestekidenäyttö, <i>liquid crystal display</i>
LDO	pienen jännitehäviön (regulaattori), <i>low drop-out (voltage regulator)</i>
LSB	vähiten merkitsevä bitti, <i>least significant bit</i>
MCU	mikro-ohjain, <i>microcontroller unit</i>
MISO	<i>master in, slave out</i>
MOSI	<i>master out, slave in</i>
MSB	eniten merkitsevä bitti, <i>most significant bit</i>
RMS	tehollisarvo, <i>root mean square</i>
RS-232	sarjaväyläprotokolla
Rx	sarjaportin tulo
SAR	<i>successive approximation register</i>
SNR	signaali-kohinasuhde, <i>signal-to-noise ratio</i>
SPI	sarjamoitoinen lisälaiteliitäntä, <i>serial peripheral interface</i>
SRAM	staattinen luku- ja kirjoitusmuisti, <i>static random access memory</i>
SS	orjan valinta, <i>slave select</i>
S/H	näytteenotto ja pito, <i>sample and hold</i>
TWI	kaksijohdinliitäntä, <i>two-wire interface</i>
Tx	sarjaportin lähtö
UART	yleiskäyttöinen asynkroninen sarjaväylä, <i>universal serial asynchronous receiver-transmitter</i>
USB	<i>universal serial bus</i> (sarjaväylästandardi)
ΣΔ	Sigma-Delta, A/D-muunnintyyppi

1 Johdanto

1.1 Tausta

Väestön ikääntyessä ja huoltosuhteen kasvaessa, eli työelämän ulkopuolella olevien määrän kasvaessa suhteessa työtä tekevien määrään, kasvaa myös hoitajien työmäärä sairaan- ja vanhusten hoidon alalla. Yksi osa hoitajien työtä on seurata potilaiden tilaa. Vuodeosastoilla olevia potilaita ei yleensä kytketä elintoimintoja seuraavaan laitteeseen, kuten sydänmonitoriin, koska ne vaativat yleensä jonkinlaisten johtojen kiinnittämistä potilaaseen. Lisäksi tällaiset laitteet ovat kalliita ja niitä on sairaalassa siten vain rajallinen määrä. Hoitajien työn helpottamiseksi on kehitelty erilaisia menetelmiä elintoimintojen seuraamiseksi potilaaseen koskematta. Ballistokardiografia on lääketieteen ala, joka tutkii sydämen aiheuttamia mekaanisia värähtelyitä pienillä, yleensä noin 1...20 hertsin taajuuksilla. Mittaukset tehdään yleensä jonkin verran korkeammalla taajuudella, mutta asettamalla mittauskaista alle 50 hertsin saadaan verkkotaajuuksien häiriöitä vähennettyä. [25][21][6][15]

Finsor Oy:n kehitteillä olevassa järjestelmässä, jonka kanssa käytettäväksi tässä työssä toteutettu laite suunniteltiin, voidaan henkilön muitakin elintoimintojen tarkkailla. Sydämenlyönnit, verenkierto, hengitys ja muut kehon liikkeet aiheuttavat voimia, jotka ovat mitattavissa voima-anturilla sängyn rakenteista ja patjan alta. Mitatuista voimasignaaleista saadaan digitaalista signaalianalyysiä hyödyntäen selville potilaan syke, sykevälivaihtelu, hengitystiheys ja yleinen liikeaktiivisuus. Näiden tietojen avulla voidaan parhaimmillaan seurata henkilön tilaa tai esimerkiksi univaiheita hyvinkin tarkasti. Lisäksi seuranta on hyvin helppo automatisoida ja voidaan kohtuullisella vaivalla liittää osaksi esimerkiksi sairaalan tai vanhainkodin tietojärjestelmää.

1.2 Tavoitteet

Tämän diplomityön tavoitteena oli suunnitella anturi- ja mittauskortti, jota voidaan käyttää potilasvuoteen patjan alla ohuen levyn sisään koteloituna tai tuolin jalan alla pienessä alumiinikotelossa, ja jonka saa kytkettyä USB-liitännän kautta tietokoneeseen. Tehtävään kuului ennen omassa metallikotelossaan olleen anturin integroiminen samalle piirilevyllä mittauselektroniikan kanssa, uuden mittauselektroniikan suunnittelu ja komponenttien valinta, sekä piirilevyn layout-suunnittelu. Suunnittelun lisäksi tehtävään kuului koekappaleen rakentaminen sekä sen mittaaminen ja testaaminen.

Suunnittelutyö jakaantui kahteen pääosaan: komponenttien valintaan ja piirilevyn layout-suunnitteluun. Itse piirikaaviossa käytettiin pääosin hyvin tavanomaisia ja toimiviksi havaittuja ratkaisuja, joskin jotain ratkaisuja jouduttiin suunnittelun edetessä miettimään uudestaan. Komponenttien valinnassa (luku 3) pyrittiin löytämään osat, jotka tarjoaisivat riittävät ominaisuudet mahdollisimman edullisesti ja joiden saatavuus olisi hyvä myös lähitulevaisuudessa.

Piirilevyn suunnittelussa haasteena oli saada komponentit sijoiteltua levyllä, jolle ulkomittojen lukkoon lyömisen jälkeen jouduttiinkin lisäämään huomattava määrä

osia. Levyn piti myös olla kustannussyistä ainoastaan kaksikerroksinen, mikä edellä mainitussa tilanteessa vaikeutti huomattavasti johdinten vetoa niin, että digitaaliset signaalit ja käyttöjännitehäiriöt eivät vaikuttaisi herkkiin analogisiin signaaleihin tai A/D-muuntimen vertailujännitteeseen. Piirilevyn suunnittelusta kerrotaan luvussa 3.5.

Koekappaleen rakentamisen ja mittausten avulla oli tarkoituksena varmistaa, että laite toimii halutulla tavalla. Mittaustulokset löytyvät luvusta 4, ja niiden arviointi ja analysointi luvusta 5. Huomiota kiinnitettiin erityisesti signaalin kohinatason ja muutenkin sen häiriöttömyyteen sekä itse anturin toimintaan. Yhteenveto on luvussa 6.

2 Lähtökohdat

2.1 Ballistokardiografia potilasvalvonnassa

Ballistokardiografiaa ei tiettävästi toistaiseksi ole hyödynnetty sairaaloiden jokapäiväisessä potilasvalvonnassa. Asiaa kuitenkin tutkitaan usealla taholla ja erilaisia tehtävään soveltuvia laitteita on useita [15]. Sydämen toiminnasta aiheutuvia voimia voidaan mitata suoraan voima-anturilla sängyn tai tuolin rakenteista, tai epäsuorasti esimerkiksi kiihtyvyyssanturilla. Myös tutkaan perustuvia menetelmiä on kokeiltu [23].

Sydämen pumpatessa verta aiheutuu pieniä, mutta hyvinkin mitattavissa olevia voimia, jotka syntyvät ensinnäkin itse sydämen liikkeistä ja toiseksi veren sykkivästä virtauksesta suonistossa. Sydämen lisäksi keuhkojen ja koko kehon liike näkyvät sängyn asennetun voima-anturin signaalissa. Kehittyneellä analyysillä tästä signaalista voidaan löytää halutut elintoimintojen tunnusluvut, kuten syke, sykevälän vaihtelu, hengitystiheys ja yleinen liikeaktiivisuus. Käyttämällä useaa anturia on myös jollain tasolla mahdollista nähdä potilaan asento signaalien muodoista ja keskinäisistä eroista ja toisaalta saada e.m. tunnusluvut luotettavammin ja tarkemmin.

Yksi syy siihen, että BKG:aa ei ole potilasvalvonnassa käytetty, lienee juuri toimintaperiaatteesta aiheutuva epäluotettavuus. Esimerkiksi patjan alta mitattu sydämen syke on hyvinkin pehmeämuotoinen värähdys (kuva 1), jollainen voi helposti syntyä myös esimerkiksi sormien heiluttelusta (kuva 2). Myöskin lattian kautta tulevat ympärillä liikkuvien ihmisten askeleet saattavat näkyä signaalissa, joskaan ne eivät normaalitilanteissa (betonilattia ja kävely) ole ongelma. Sen sijaan esimerkiksi ambulanssissa tiestä aiheutuva tärinä ja auton heiluminen olisi luultavasti suuri ongelma.

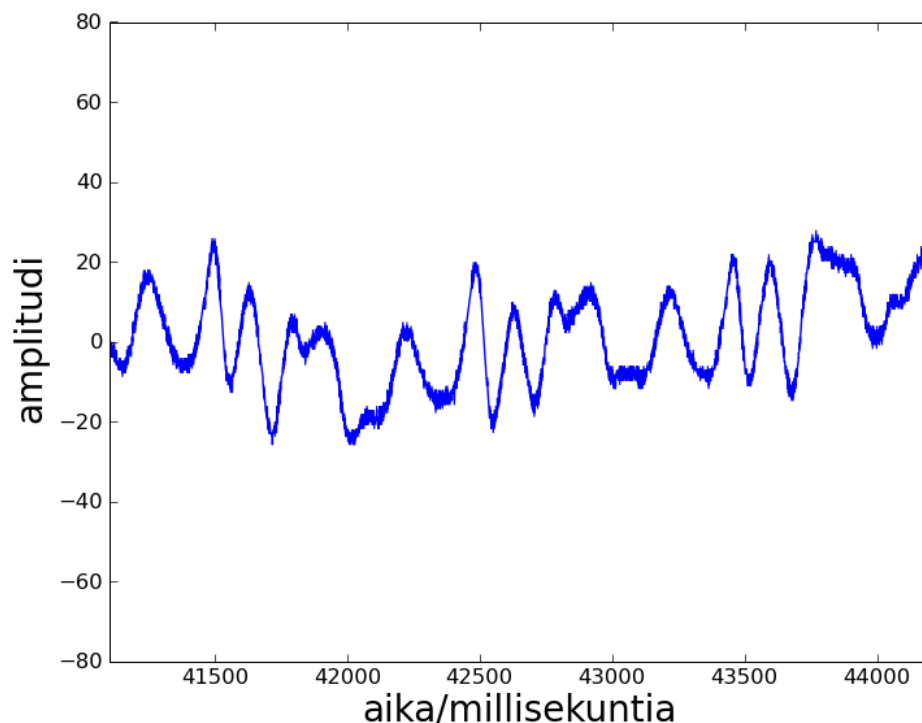
Herkän häiriintyvyyden takia BKG-menetelmät eivät ainakaan toistaiseksi ole riittävän luotettavia korvaamaan esimerkiksi elektrokardiografiaa (EKG), jossa potilaaseen kiinnitetään kehon jännitteitä mittaavia elektrodeja, joilla voidaan hyvin luotettavasti mitata potilaan syke. Sydänlihasta ohjaavaa sähköistä herätettä mitaavassa EKG-signaalissa eivät ulkoiset häiriöt juuri näy, eivätkä potilaan lihasten toiminnasta aiheutuvat signaalitkaan käytännön tilanteissa ole ongelma, vaikka voimakas lihasjännitys näkyykin EKG-signaalissa.

Kriittisempien potilaiden sijaan BKG:aan pohjautuvia menetelmiä voisikin käyttää sellaisten potilaiden kohdalla, joita normaalisti tarkkailevat vain hoitajat, ja joiden tilaa näin ollen seurataan vain harvakseltaan. Myös vanhustenhuollossa voitaisiin hyödyntää tietoa, joka kertoisi henkilön tilasta tämän ollessa tuolissaan tai sängyssään. Jos elintoiminnoissa tapahtuisi selkeä muutos, voisi järjestelmä esimerkiksi antaa automaattisen hälytyksen hoitajalle, jolloin elvytys voitaisiin aloittaa ajoissa.

2.2 Ballistokardiografian mittaamenetelmät

Elintoimintojen aiheuttamia voimia voidaan mitata epäsuorasti potilaaseen koskematta. Tässä työssä on käytetty anturia, joka mittaa patjan läpi sängyn pohjaan välittyvää voimaa. Elintoimintoja voidaan kuitenkin mitata monin eri tavoin, joista seuraavassa käydään läpi muutamia.

Sydämen syke aiheuttaa veren sykkivää virtaamista suonistossa, mikä toisin sanoen tarkoittaa massan jaksollista kiihtyvyyttä sydämen tahdissa, eli siis sykkeen tahdissa muuttuvaa voimaa. Tämä voima välittyy patjan läpi sängyn rakenteisiin. Huomionarvoinen seikka on, että sydämen aiheuttama voima on hyvin erilainen eri akseleiden suunnassa. Voimakkain suunta ei ole kohtisuoraan patjan läpi, vaan pituussuunnassa, sillä veri tekee lenkin jalkojen kautta, mistä syystä pituussuunnassa liikkuu paljon verta. Tämän takia patjan alta sängyn pohjaa vastaan kohtisuoraa voimaa potilaan yläruumiin alta mittaava anturi ei ole sykkeen mittaamiseen

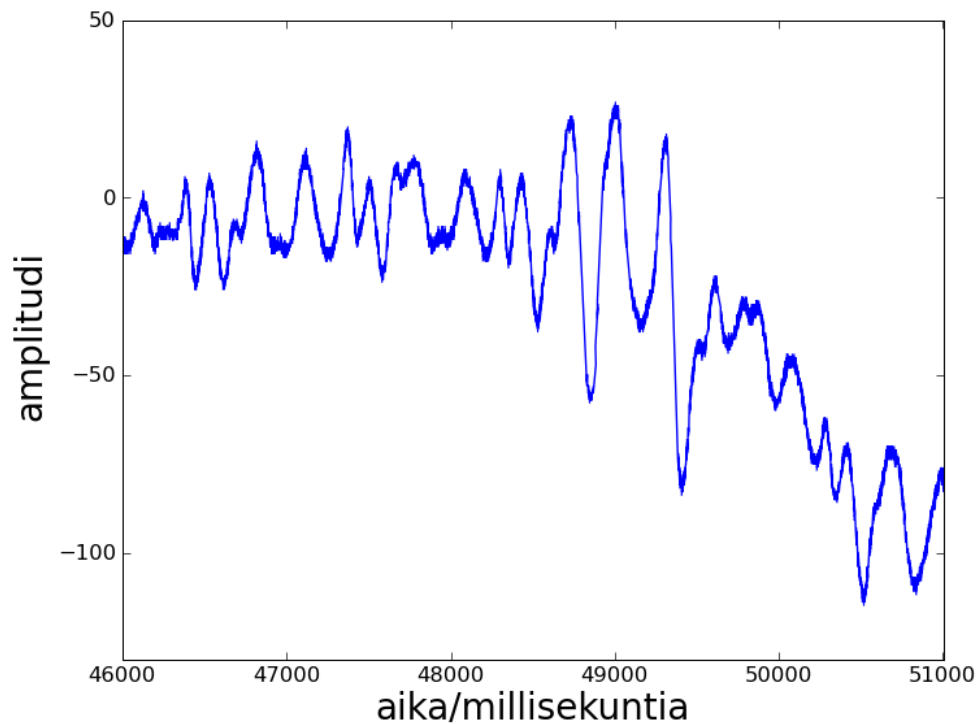


Kuva 1: Kolme sykejaksoa levyanturilla patjan alta mitattuna.

paras. Kohtisuoraa voimaa mittaamalla saadaan kuitenkin hengitys mitattua parhaiten. Hengitys näkyy parhaiten kun henkilö on selällään tai mahallaan, mutta hengitys on mitattavissa myös henkilön ollessa kyljellään.

Elintoimintoja voidaan mitata myös sängyn liikkeestä esimerkiksi kiihtyvyyssanturilla. Kiihtyvyyteen perustuvan mittauksen huono puoli on kuitenkin se, että kiihtyvyys on verrannollinen liikepoikkeamaan ja kääntäen verrannollinen taajuuteen. Elintoimintojen aiheuttamat taajuudet ovat hyvin matalia, tyypillisesti suurin osa tehosta on taajuuksilla 0,1...30 Hz. Tukevissa vuoteissa myös liikepoikkeama jää pieneksi. Ballistokardiografian tutkimuksen alkuaikoina käytettiin monissa tutkimuksissa sänkyjä, jotka oli tehty siten, että ne pääsivät kevyesti liikkumaan pituussuunnassa, jolloin liikettä tai kiihtyvyyttä saatiin paremmin mitattua. Nämä sängyt olivat yleensä kuitenkin aivan liian epäkäytännöllisiä esimerkiksi normaaliin sairaalakäyttöön. Nykyaikaisilla kiihtyvyyssantureilla saadaan tavanomaisesta sängystä mitattua ainakin sykettä, mutta hengityksen mittaaminen on vaikeampaa, koska taajuus on yleensä hyvin matala, vain noin 150...300 mHz.

Venymäliuskalla voidaan mitata sängyn rakenteiden vääntymistä sykkeen ja hengityksen tahdissa. Venymäliuskojen antamat signaalitasot ovat kuitenkin hyvin pieniä, mikä asettaa suuret vaatimuksen mittauselektronikalle, ettei signaali peittyisi kohinan alle. Venymäliuskalla voisi esimerkiksi sängyn pohjalevyn tai -säleikön taipumasta saada mitattua ainakin hengityksen.



Kuva 2: 48500 millisekunnin kohdalla alkava sormien heiluttelu näkyy selvästi BKG-signaalissa ja sekoittuu sykkeeseen.

2.3 Patjan alle sijoitettava voima-anturilevy

Tässä työssä tarkasteltava mittalaite suunniteltiin sijoitettavaksi kahdesta muovilevystä muodostuvaan koteloon. Kun levy laitetaan sänkyyn patjan alle, kohdistuu anturiin voimia koko levyn alueelta kuvan 2.3 mukaisesti. Anturi on levyjen välissä niiden keskipisteen kohdalla. Levyihin on tehty tarvittavat upotukset anturilevyä, johtoa ja liittimiä varten. Levyt on suunniteltu siten, että ne ovat hieman jännityksessä ja puristavat anturia. Näin anturilevystä saadaan luotettavampi, kun levy, jonka kautta voimat itse anturille välittyvät, on kaikissa tilanteissa varmasti puristuksissa anturia vasten. Samaa piirilevyä käytetään myös pienessä alumiinikotelossa, joka voidaan sijoittaa esimerkiksi tuolin tai sängyn jalan alle. Se on tarkoitettu lähinnä esittelytilanteisiin, missä se voidaan laittaa normaalin toimistotuolin jalan alle. Kotelo on muotoiltu siten, että pyörilläkin varustettu tuolinjalka pysyy hyvin sen päällä.

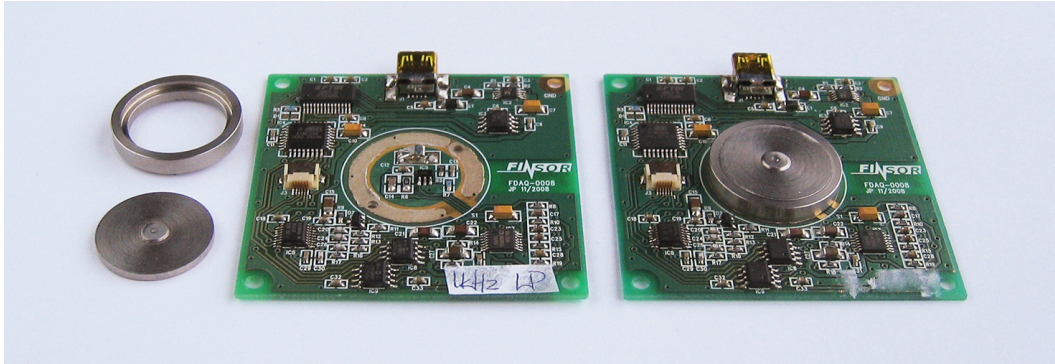
2.4 Dynaaminen voima-anturi

Laitteessa käytettiin Finsor Oy:n patentoitua dynaamista voima-anturia [?], joka on metallikuoressa oleva pietsosähköiseen ilmiöön [26] perustuva voimaan verrannollisen jännitteen antava anturi. Pietsosähköisen materiaalin ominaisuuksiin kuuluu, että siihen kohdistettu mekaaninen voima saa aikaan sähköisen polarisoitumisen, mistä seuraa voimaan verrannollinen varaus. Riippuvuus on lähes lähes suora, mutta siihen liittyy jonkin verran epälinearisuuksia [24][9]. Anturiin kohdistuva voima saa teräskannen taipumaan taivuttaen samalla pietsokalvoa. Tämä saa siinä aikaan varauksen, josta operaatiovahvistimella toteutetun varausvahvistimen (kuva 5) avulla saadaan voimaan verrannollinen jännite.

Anturin parametrit ovat säädettävissä hyvin laajalla alueella muokkaamalla anturin koteloa ja valitsemalla sopivat sähköiset komponentit. Tähän asti käytetyissä antureissa mitta-alue on ollut mikroneutoneista kymmeneen kiloneutoneihin ja taajuusalue millihertseistä kilohertseihin. Käytännössä anturin kehä ja kansi mitoitetaan niin, että ne varmasti kestävät ja sopiva herkkyyks ja taajuusrajat säädetään sähköisten osien valinnalla. Käyttö- ja signaalijännitetasot voivat myös olla parista voltista pariinkymmeneen volttiin, tarpeen mukaan. Jännitealue riippuu lähinnä valitusta operaatiovahvistimesta.

Aiemmat anturit ovat olleet erikseen koteloituja ja A/D-muuntimen sisältävä mittauskortti on yleensä sijainnut 1...2 metriä pitkän kaapelin päässä. Tässä työssä esitettyä patjan alle sijoitettavaa laitetta varten anturista kehitettiin kuitenkin uusi versio, joka saatiin suoraan liitettyä varsinaisen laitteen piirilevylle siten, että piirilevy toimii samalla anturin kotelon pohjana. Ratkaisu on esitetty kuvassa 3. Kuvassa näkyy piirilevy, jonka keskellä on ruostumattomasta teräksestä tehty anturin kehä ja kansi, ja toinen levy, josta kehä ja kansi on irrotettu, jossa näkyvät anturin sisällä olevat varausvahvistimen. Kokoonpanossa kehä liimataan piirilevyyden johtavalla liimalla hyvän maakontaktin varmistamiseksi. Sen sisään asetetaan pietsoelementti ja kansi painetaan päälle. Kansi pysyy kiinni ilman liimaa tiukan sovituksen ansiosta. Pietsokalvon signaali kytkeytyy piirilevylle juotetun jousen avulla ja maakontakti

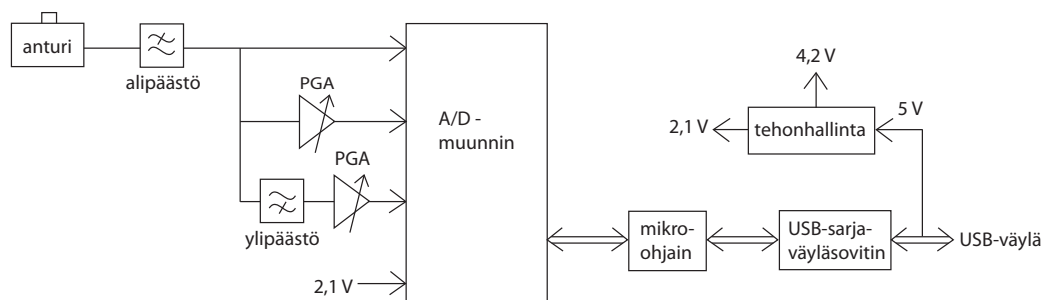
pietson pohjalevystä muodostuu metallisen kotelon kautta.



Kuva 3: Vasemmalla laitteen piirilevy, josta anturin kehä ja kansi on irrotettu ja oikealla piirilevy, jossa anturi on koottuna. Vasemmalla oleva piirilevy on 1 kHz antialiassuodattimella ja 2,5 kHz näytteenottotaajuudella toimiva versio, joka on kuitenkin ulkoisesti samanlainen, kuin 300 hertsin näytteistystaajuudella toimiva.

3 Suunnittelu

Laitteen suunnittelu lähti aiempien laitteiden pohjalta. Uudesta laitteesta haluttiin kuitenkin huomattavasti pienempi ja itse anturi piti saada integroitua muun elektronikan kanssa samalle levyille. Haluttujen ominaisuuksien perusteella tehtiin kuvan 4 lohkokaavio, jonka pohjalta lähdettiin suunnittelemaan piirikaaviota.



Kuva 4: Laitteen sähköinen lohkokaavio

Tässä vaiheessa anturikotelon jyrittyjen levyjen tilaaminen oli pitkähkön toimitusajan takia jo ajankohtaista ja sitä kautta piirilevyn ulkomitatkin oli lyötävä lukkoon (koska piirilevy upotettaisiin koteloon jyrittyyn tilaan). Alustavan piirikaavio komponentit sijoitettiin karkeasti paikoilleen piirilevyille ja levyn mitat valittiin siten, että tuleville johdinvedoille olisi varmasti tilaa. Myöhemmin suunnitelmaa

kuitenkin muutettiin ja piirikaavioon lisättiin useita komponentteja, minkä takia piirilevyn suunnittelusta tuli lopulta melko vaativa tehtävä. Piirilevyn suunnittelusta kerrotaan tarkemmin luvussa 3.5.

Seuraavassa käydään suunnittelun eri osa-alueet läpi. Ensin käydään piirikaavion suunnittelu osa-alueittain, alkaen anturista ja päättyen USB-liitäntään, vaikka todellisuudessa suunnittelu tapahtuikin epämääräisessä järjestyksessä palaten välillä taaksepäin, kun jotain asioita muutettiin. Piirikaavion jälkeen käydään läpi piirilevyn suunnittelu, vaikka sitäkin tehtiin osittain vuorotellen piirikaavion kanssa, kun prototyypin testauksessa havaittiin tarvetta suunnitelman muuttamiselle.

3.1 Anturi ja varausvahvistin

Pietsokalvo valittiin kapasitanssin, ulkomittojen, hinnan ja saatavuuden perusteella. Aiemmissa yksittäiskappaleina tehdyissä antureissa oli käytetty summereista irrotettuja pietsokalvoja, koska sopivia kalvoja ilman valmiita johtimia tai koteloa ei suoraan saanut elektroniikan jakelijoilta. Nyt kuitenkin päätettiin tilata suurehko erä suoraan valmistajalta. Sopivimpia pietsokalvoja tarjosi japanilainen Murata, jolta tilattiin kahtakin eri tyyppiä, 7BB-20-3 ja 7BB-20-6, joista lopulta valittiin jälkimmäinen. Sen kapasitanssi on 20 nF, ulkohalkaisija 20 mm, alustan paksuus 0,1 mm ja kokonaispaksuus 0,22 mm.

Valittu pietsokalvo kostuu messinkisestä pyöreästä levystä, jonka päällä on hieman pienempi pyöreä pietsosähköisellä materiaalilla päällystetty alue. Kalvoon kohdistettu voima saa aikaan pietsosähköisen materiaalin muodonmuutoksen ja sitä kautta sähköisen varauksen. Tämä näkyy jännitteenä pietsokalvon napojen välillä. Pietsokalvoa ei kuitenkaan sen suuren sisäisen impedanssin takia kannata käyttää jännitelähteenä, vaan kalvon varaus muutetaan jännitteeksi varausvahvistimen [11] avulla.

Kuvassa 5 on varausvahvistimen kytkentä. Varaus siirtyy kontaktijousen S kautta varausvahvistimelle, joka koostuu operaatiovahvistimesta $U1$ ja kondensaattorisista $C1$. Vahvistimessa — kuten koko laitteessa muutenkin — käytetään yksipuolista käyttöjännitettä. Tämän takia operaatiovahvistimen positiivinen tulo on kytketty virtuaalimaahan, joka muodostuu operaatiovahvistimella puskuroidusta Texas Instrumentsin jännitereferenssipiiristä LM4040D20 ja on 2,048 voltia, eli noin puolet käyttöjännitteestä. Näin voidaan mitata sekä positiivisia, että negatiivisia signaaleja.

Negatiivinen tulo pysyy negatiivisesti takaisinkytketyssä operaatiovahvistinkytkenässä samassa kuin positiivinen, joten pietson yli oleva jännite pysyy myös koko ajan samana. Näin ollen pietson oman kapasitanssin varauksen täytyy pysyä vakiona. Tästä seuraa väistämättä se, että pietson muodonmuutoksessa syntyvä varauksen muutos siirtyy kokonaan takaisinkytkentäkondensaattoriin ja aiheuttaa kondensaattorin napojen välille yhtälön

$$\Delta U - V_{REF} = \frac{\Delta Q}{C} \Leftrightarrow \Delta U = \frac{\Delta Q}{C} + V_{REF} \quad (1)$$

mukaisen jännitteen. Varausvahvistimen lähdössä näkyy siis jännite $V_{REF} - \Delta U$, koska kondensaattori on tulon ja lähdön välissä ja tulo pysyy aina jännitteessä V_{REF} .

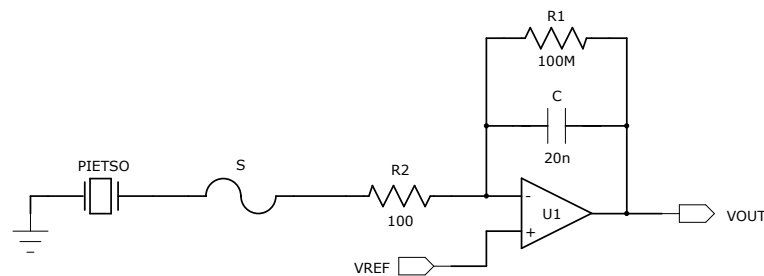
Takaisinkytkennässä olevalla vastuksella $R1$ voidaan säätää vahvistimen aikavakio eli se, miten nopeasti kondensaattori C purkautuu. C :n ja $R1$:n suhde siis määrää, miten pieniä taajuuksia voidaan mitata. Tasajännitteellä vahvistus on nolla. Arvoilla $C = 20 \text{ nF}$ ja $R1 = 100 \text{ M}\Omega$ on alarajataajuus

$$F_{-3dB} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 20 \text{ nF} \cdot 100 \text{ M}\Omega} \approx 0,1 \text{ Hz}, \quad (2)$$

mikä riittää hyvin hengityksen mittaamiseen. Liian matalan alarajataajuuden käyttäminen tuottaa ongelmia, koska sänkyyn meneminen tai siitä poistuminen aiheuttaa hyvin suuria voimia suhteessa esimerkiksi sykkeeseen. Koska signaalin vahvistuksen kuitenkin täytyy olla riittävä sykettä ja hengitystä ajatellen, yliohtautuu vahvistin melko varmasti kun sänkyyn mennään tai siitä poistutaan. Tämä ei ole ongelma, jos vahvistimen aikavakio on esimerkin mukaisesti 2 sekuntia. Jos aikavakio kuitenkin olisi vaikkapa 20 sekuntia, olisi anturi liian pitkään yliohtautuneena ja kykenemätön tuottamaan hyödyllistä signaalia. Kokonaan ilman takaisinkytkentävastusta saattaisi kytkentä myös ajan myötä ajautua pysyvästi laitaa, kun satunnaiset varaukset, kuten operaatiovahvistimen bias-virta, eivät pääsisi purkautumaan.

Kytkenässä oleva 100Ω vastus $R2$ estää pietsoa rupeamasta värähtelemään itseksensä. Se on kuitenkin niin pieni, ettei sillä ole käytännössä vaikutusta piirin muuhun toimintaan. Pietson värähtelytaipumusta ei tutkittu sen tarkemmin, vaan joskus ilmettyään asia ratkaistiin mahdollisimman helpolla tavalla.

Operaatiovahvistimena kytkennässä on Analog Devices AD8628, jonka tärkeimpiä ominaisuuksia tässä sovelluksessa ovat pieni offset-jännite, laidasta laitaa (rail-to-rail) -toiminta tulossa ja lähdössä, pieni kohina, sekä yksipuolinen käyttöjännite.



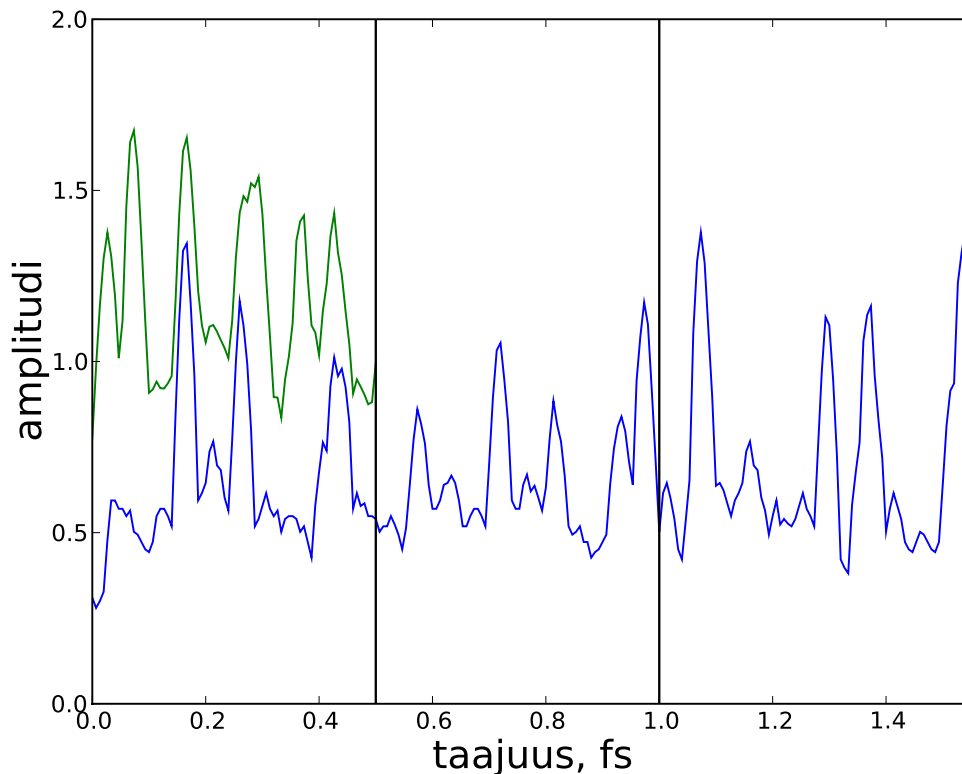
Kuva 5: Varausvahvistimen kytkentä.

3.2 Analoginen signaalikäsittely

Ennen A/D-muunnosta signaalia täytyy käsitellä analogisesti, jotta se olisi muunnoksen kannalta mahdollisimman sopiva.

3.2.1 Alipäästösuodatus

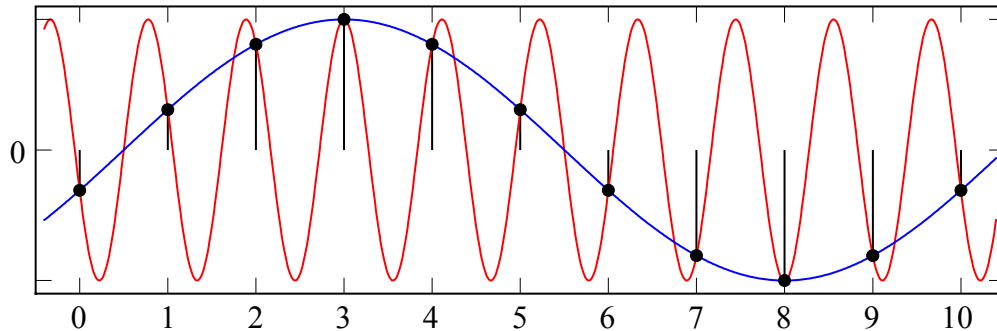
Näytteenottoteoreeman (tunnetaan myös nimillä Nyquistin teoreema, Shannonin teoreema, jne.) mukaisesti [17] näytteistettävässä signaalissa ei saa olla taajuuskomponentteja, jotka ovat suurempia kuin näytteistystaajuuden f_s puolikas, eli ns. Nyquistin taajuus. Tätä suuremmat taajuudet laskostuvat sen alapuolelle kuvan 6 mukaisesti ja huonontavat näin signaalia, kun koko taajuuskaistan kohina ja muut häiriöt summautuvat hyötysignaalin päälle. Sanan laskostuminen voi ymmärtää siten, että taajuus akseli ikään kuin laskostuu kankaan tavoin välille $0 \dots \frac{1}{2} f_s$ siten, että kohdat $n f_s$ osuvat taajuudelle 0 ja kohdat $(\frac{1}{2} + n) f_s$ taajuudelle $\frac{1}{2} f_s$.



Kuva 6: Kohinan laskostuminen: alempi sininen kuvaaja esittää kohinaa, joka ennen näytteistystä on jakautunut välille $0 \dots 1 \frac{1}{2} f_s$. Ylempi vihreä kuvaaja osoittaa, kuinka näytteisyksessä näytteenottotaajuuden puolikasta $\frac{1}{2} f_s$ suuremmilla taajuuksilla oleva kohina laskostuu välille $0 \dots \frac{1}{2} f_s$, jolloin kohinan amplitudi kasvaa.

Erityisen haitallista on, jos rajataajuutta suuremmalla taajuudella on voimakkaita signaaleja, koska ne näkyvät muunnoksen jälkeen yhtä voimakkaina, mutta

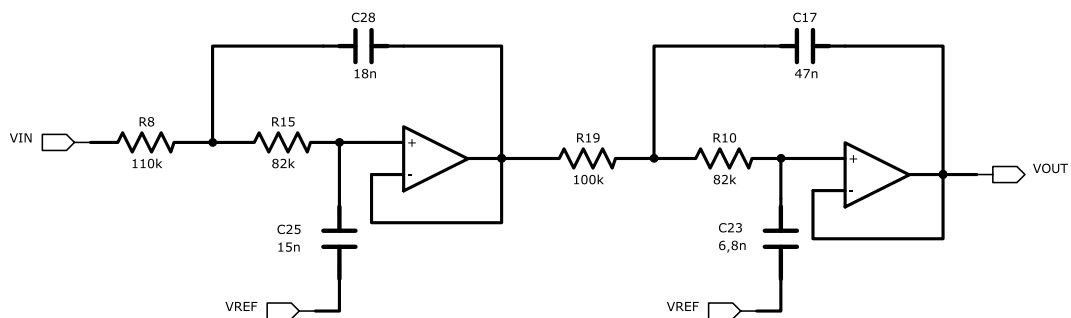
väärän taajuisina signaaleina. Kuvasta 7 nähdään, että liian suuritaajuisesta signaalista saadaan alle kaksi näytettä jaksoa kohden ja näin ollen muunnoksen tulos on sama, kuin minkä tuottaisi huomattavasti pienempi sopivasti valittu taajuus.



Kuva 7: Näytteistyksessä signaali aliasoituu, jos sen taajuus on suurempi kuin $\frac{1}{2}f_s$. Mustat pallot ovat signaalista (punainen kuvaaja) otettuja näytteitä ja taajuudeltaan huomattavasti pienempi (sininen) aaltomuoto on näytteistä rekonstruoitu signaali, joka ei enää lainkaan vastaa alkupäleistä. [1]

Ennen A/D-muunnosta on siis varmistettava, ettei signaalissa ole mukana liian suuria taajuuksia. Tämä tehdään alipäästösuodattamalla signaali ennen muuntimelle syöttämistä. Vaikka tässä tapauksessa hyötysignaalit ovatkin reilusti alle 150 Hz ja näytteistystaajuus on 300 Hz, on signaalissa kuitenkin aina mukana häiriöitä ja kohinaa myös hyötysignaalin yläpuolella. Tästä syystä ennen A/D-muunnosta on signaali alipäästösuodatettava, ettei suuritaajuisen kohina huonontaisi muunnoksen signaali-kohinasuhdetta.

Alipäästösuodattimena on 4. asteen Butterworth-tyyppinen suodatin, jonka rajataajuus on 100 Hz. Toteutus on Sallen-Key-topologian mukainen. Suodattimen piirikaavio on kuvassa 8.



Kuva 8: Antialiassuodattimen piirikaavio.

Neljännän asteen Butterworth-suodattimen jyrkkyys on 24 dB/oktaavi, joten 150 Hz taajuudella sen vaimennus on 16 dB ja 300 Hz kohdalla 40 dB. Suodatin on

pyritty pitämään mahdollisimman yksinkertaisena ja vaikka vaimennus taaajuudella $\frac{1}{2}f_s$ on melko pieni, on se mittausten perusteella kuitenkin riittävä (ks. luku 5.4). Tarvittaessa voidaan kuitenkin näytteenottotaaajuutta nostaa reilustikin — suotimen pysyessä samana —, jolloin antialiasoitumisen vaikutus pienenee. Valituilla arvoilla A/D-muuntimesta tietokoneelle saadussa signaalissa kohinaa on kuitenkin vain suunnilleen muuntimen valmistajan ilmoittaman muuntimen oman kohinan verran, joten suodatusta voidaan pitää riittävänä.

Suodattimet suunniteltiin käyttäen erään piirivalmistajan tarjoamaa ilmaista tietokoneohjelmaa [3], joka tosin oli melko suppea ja käyttöliittymältään hämmäntävän huono, mutta tehtävän ollessa melko yksinkertainen se ajoi asiansa. Ohjelmaan syötettiin halutut parametrit, joiden pohjalta ohjelma laski tarvittavat arvot. Laskennassa asetettiin vielä käytettäväksi E6-sarjan kondensaattoreita ja E24-sarjan vastuksia. E-sarjojen käyttäminen aiheutti tässä tapauksessa käytännössä vain merkityksettömiä vastevirheitä, mutta helpotti huomattavasti käytännön toteutusta, kun komponenttiarvoja ei tarvitse muodostaa useasta saatavana olevasta komponentista. Lähes kaikki myynnissä olevat vastukset ja kondensaattorit noudattavan E-sarjoja, ja yleensä pienempinumeroiset sarjat ovat halvempia ja vähemmän tarkkoja. Pienemmät E-sarjat ovat kuitenkin paremmin saatavilla, tässä tapauksessa käytännössä suoraan yrityksen oman protopajan hyllystä. Suodattimessa käytettyjen vastusten tarkkuusluokka on +/-1% ja kondensaattoreiden +/-5%

3.2.2 Säädetty vahvistus

Koska laite on tarkoitettu käytettäväksi erilaisissa kohteissa ja koteloissa, oli suunnittelussa huomioitava signaalinvoimakkuuden suuri vaihtelu. Kehon liikkeiden aiheuttamat voimat voivat olla useammankin dekadin voimakkaampia, kuin hengitys ja syke. Lisäksi kaikkien näiden voimakkuus ja keskinäinen suhde riippuu hyvin paljon sekä henkilöstä, että sängystä ja anturin sijainnista siinä. Jotta kaikissa eri tilanteissa saataisiin varmasti mittausta toimimaan ilman, että anturin sisäisiin osiin tarvitsee koskea, on laitteessa alipäästösuodattimen jälkeen ohjelmoitavat vahvistimet (programmable gain amplifier, PGA), joiden vahvistus voidaan asettaa mikrokontrollerin SPI-väylän (Serial Peripheral Interface, ks. luku 3.4.1) kautta. PGA-piiriinä toimii Microchipin MCP6S21, jossa on kahdeksan vahvistusvaihtoehtoa: 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16 tai 32 V/V.

Kuvan 4 lohkokaaaviosta nähdään, että yhdestä alipäästösuodatetusta anturisignaalista menee A/D-muuntimelle kaikenkaikkiaan kolme signaalia. Alipäästösuodatuksen jälkeen signaali jaetaan kolmeen haaraan, joista yksi menee suoraan A/D-muuntimelle, toinen menee säädettyä vahvistimen kautta ja kolmas menee ensin 1 Hz ylipäästösuodattimen kautta ja sen jälkeen säädettyä vahvistimen kautta A/D-muuntimelle.

Ensin mainittu kanava on tarkoitettu liikeaktiivisuuden tarkkailuun. Koska kehon liikkeiden aiheuttama signaali on voimakkuudeltaan moninkertainen verrattuna sydämen aiheuttamaan signaaliin, ei sitä tarvitse erikseen vahvistaa. Toisesta signaalista saadaan tarvittaessa syke ja hengitys suuremmalla tarkkuudella, koska signaalia voidaan ennen A/D-muunnosta vahvistaa. Henkilön liikkeessä tämä kana-

va yleensä ajautuu kuitenkin välittömästi laitaan, eikä sitä sen vuoksi voi käyttää liikeaktiivisuuden tarkempaan tutkimiseen.

Kolmannesta signaalista saadaan pelkkä sykesignaali ilman hengitystä, koska hengitys on yleensä selkeästi alle 1 Hz taajuuksilla. Tietyissä tilanteissa hengitys saattaa olla tulla anturisyksinnäisiin niin voimakkaasti suhteessa sykkeeseen, että sykettä on vaikea erottaa. Tällaisessa tilanteessa syke voidaan mitata omasta kanavastaan ilman, että voimakas hengitys häiritsee sitä.

3.3 Analogia-digitaalimuunnos

Tämän laitteen yksi tärkeimmistä osista on analogia-digitaalimuunnos. Muunnin määrää lopulta sen, millä tarkkuudella jännitteeksi muutettu voimasignaali saadaan numeeriseen muotoon. Toki A/D-muunninta edeltävätkin osat vaikuttavat suuresti laatuun, mutta koska A/D-muunnin on kallein yksittäinen komponentti, on sen valintaan syytä panostaa enemmän. Sitä edeltävien osien kohdalla voidaan enimmäkseen valita ”varmasti riittävän hyvä” hinnasta välittämättä.

3.3.1 A/D-muuntimet yleisesti

Analogia-digitaalimuuntimen tarkoitus on muuttaa analoginen signaali digitaaliseksi. Käytännön toteutustapoja on kuitenkin paljon erilaisia, joista kutakin voidaan käyttää tiettyyn tarkoitukseen tehdyissä muuntimissa. Valintaperusteena voivat olla esimerkiksi näytteenottotaajuus eli nopeus, bittien määrä eli erottelukyky, kohinataso, muunnoksen jännitealue, kanavien määrä, muuntimen tehonkulutus, lineaarisuus, nollapistevirhe eli se, miten paljon nollajännitteen muunnos poikkeaa nollassa, tai jokin muu tekijä.

Näytteenottotaajuus Näytteenottotaajuus F_s (yksikkö Hz tai S/s eli samples per second) kertoo, kuinka monta näytettä signaalista voidaan ottaa sekunnissa. Näytteenottotaajuuden on oltava vähintään kaksinkertainen suurimpaan näytteistettävään taajuuteen verrattuna, mutta tällöin alipäästösuodattimen tulisi olla äärettömän jyrkkä. Käytännössä siis suodattimen rajataajuus valitaan siten, että toteutettavissa olevan suodattimen vaimennus rajataajuudella on riittävä, jolloin näytteenottotaajuus on selkeästi enemmän, kuin kaksi kertaa suurin näytteistettävä taajuus. Markkinoilla on muuntimia muutamia näytteitä sekunnissa ottavista suuren erottelukyvyn muuntimista aina useiden gigahertsien taajuuksiin yltäviin ja pienemmän erottelukyvyn muuntimiin. Nopeus ja erottelukyky nostavat yleensä muuntimen hintaa ja tehonkulutusta.

Näytteitä otetaan useimmiten tasavälein, mutta on myös tilanteita, joissa näytteenottotaajuus vaihtelee. Esimerkiksi tällaisesta tilanteesta on digitaalipiirin signaalin tilanmuutokseen liittyvät ilmiöt, kun signaali muuttuu harvakseltaan, eikä haluta tallentaa pitkiä aikoja muuttumattomana pysyvää signaalia tarpeettoman suurella kellotaajuudella.

Erottelukyky Bittien määrä eli erottelukyky kertoo sen, miten monella eri arvolla alkuperäinen signaali voidaan esittää. Kahdeksalla bitillä voidaan esittää 2^8 eli 256 eri arvoa ja 16 bitillä vastaavasti 2^{16} , eli 65 536. Jokainen numeerinen arvo vastaa yleensä samansuuruista jännitealuetta, mutta on myös niin sanottuja logaritmisia muuntimia, jossa numeerista arvoa vastaava alue muuttuu logaritmisesti. Tällaisia muuntimia käytetään esimerkiksi, kun siirretään puhetta digitaalisena pienellä kaistalla. Puheessa ja musiikissa vaaditaan yleensä tiettyä erottelukykyä suhteessa signaalin voimakkuuteen, eli suurinta erottelukykyä tarvitaan vain hiljaisimmissa kohdissa (lähellä alueen puoliväliä), kun taas voimakkaimmissa kohdissa erottelukyvyn vaatimus on huomattavasti pienempi. Nimellinen bittimäärä ei kerro muuntimen todellista erottelukykyä, vaan kohinan ja muiden syiden takia todellinen erottelukyky on yleensä nimellistä hiukan pienempi. Esimerkiksi tässä tapauksessa käytetyn nimellisesti 16-bittisen muuntimen todellinen erottelukyky vastaa 14,8 bittiä alle 10 kHz taajuuksilla ja alle 12 bittiä 100 kHz taajuudella. Yleisesti ottaen markkinoilla olevat muuntimet ovat 8...24-bittisiä. Tarkkuuden kasvaessa hinta yleensä nousee tai suurin näytteenottotaajuus putoaa.

Erottelukykyä voidaan kasvattaa kohinatason alapuolelle ja jopa muuntimen nimellistä erottelukykyä paremmaksi niin sanotusti ylinäytteistämällä, eli ottamalla näytteitä halutun näytteistystaajuuden monikerran suuruisella taajuudella ja laskeamalla näytteiden keskiarvo. Nelinkertaisella ylinäytteistyksellä saadaan yhden bitin verran lisää erottelukykyä, eli 6 dB verran lisää dynamiikkaa. Tämä edellyttää, että signaalissa on kohinaa enemmän kuin puolikkaan vähiten merkitsevän bitin verran, sillä jos kohinaa on liian vähän, ovat kaikki keskiarvon laskemiseen käytetyt peräkkäiset näytteet arvoltaan enimmäkseen samoja, jolloin keskiarvon laskeminen ei auta. Kohinan on lisäksi oltava tasaisesti jakautunutta [10]. Ylinäytteistystä voi hyödyntää myös siten, että antialiasointisuodattimesta voidaan tehdä yksinkertaisempi, kun itse hyötysignaalin suurimman taajuuden ja varsinaisen näytteistystaajuuden ero kasvaa moninkertaiseksi. Tällöin riittää usein ensimmäisen asteen passiivinen RC-alipäästösuodatin, joka koostuu sarjavastuksesta ja rinnakkaiskondensaattorista.

On myös olemassa muuntimia, jotka perustuvat yksibittiseen muunnokseen suurella ylinäytteistyksellä, kuten esimerkiksi sigma-delta-muunnin, johon palaamme myöhemmin luvussa 3.3.2.

Signaali-kohinasuhde Signaali-kohinasuhde on muuntimen (koko taajuuskais-tan) oman kohinan suhde suurimpaan muunnettavaan signaaliin. Kohinaa aiheuttavat muuntimen oma elektronikka ja lisäksi äärellisestä erottelukyvystä johtuva virhe niin sanottu kvantisointivirhe, joka yleisessä tapauksessa, jossa tulosignaalin on huomattavasti yhtä LSB:tä suurempi, on tasaisesti jakautunutta. Suuri kohina huonontaa muuntimen erottelukykyä. Kuten edellä kerrottiin, voidaan kohinan vaikutusta pienentää keskiarvoistamalla useita näytteitä. Keskiarvoistaminen on erityisen käytökelpoinen suurta tarkkuutta vaativissa hitaissa mittaauksissa, esimerkiksi tarkassa lämpötilan tai muun hitaasti muuttuvan signaalin mittaamisessa. Keskiarvoistaminen ei kuitenkaan paranna muuntimen epälineaarisuudesta tai nollapistevirheistä johtuvia virheitä.

Lineaarisuus Muuntimen lineaarisuus kertoo siitä, miten samankokoinen yhden bitin muutosta vastaava jännitteen muutos on jännitealueen eri kohdissa. Puuttuva bitti tarkoittaa, että jotain tiettyä lukuarvoa ei saada tuloksena millekään jännitteelle.

Nollapistevirhe Nollapistevirhe (off-set) tarkoittaa muuntimen absoluuttista virhettä, eli sitä, miten paljon koko tulon jännitealue poikkeaa ilmoitetusta. Esimerkiksi audiosovelluksissa tällä ei ole juuri mitään merkitystä, kun taas esimerkiksi lämpötilamittauksissa sillä on hyvinkin suuri vaikutus. Nollapistevirheen suuruus yleensä muuttuu komponentin lämpötilan mukana, jolloin yksinkertainen vakiokorjaus ei riitä, vaan pitäisi olla tieto komponentin lämpötilasta ja sen vaikutuksesta virheen suuntaan ja suuruuteen.

3.3.2 Muunnintyypit

A/D-muunnin voidaan toteuttaa hyvin monella erilaisella tavalla. Yhteistä niille on se, että sisään menee analoginen jännite (tai virta) ja ulos tulee jonkinlainen digitaalinen esitys siitä. Seuraavassa käydään läpi joidenkin yleisimpien muunnintyyppien peruserätykset.

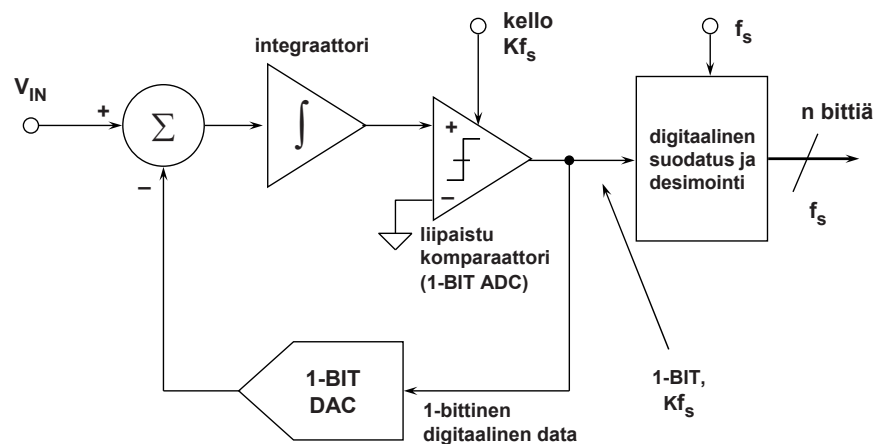
Sigma-delta Sigma-delta-A/D-muunnin ($\Sigma\Delta$; tai delta-sigma, $\Delta\Sigma$) on yksibittinen muunnin, jossa käytetään ylinäytteistystä suuren erottelukyvyn saavuttamiseksi. Erottelukyky on tyypillisesti 16...24 bittiä. Nopeimmillaan sillä päästään muutama megahertsiin, mutta tyypillisimmillään se on audiomuuntimissa ja tarkkuutta vaativassa mittauskäytössä, joissa näytteenottotaajuudet ovat muutamista kilohertseistä sataan kilohertsiin. Sigma-delta-muunnin sopii parhaiten hitaasti muuttuville signaaleille, koska suodatinosan asettumisaika on huomattavan pitkä. Se ei siis sovi esimerkiksi kahden täysin erillisen signaalin näytteistämiseen vuoroperään analogista multiplekseriä käyttämällä.

Kuvassa 9 on esitetty yksibittisen sigma-delta-muuntimen periaate. Tulon summataan takaisinkytketty signaali negatiivisena, ja tämä signaali viedään integraattorille eli käytännössä alipäästösuodattimelle. Integraattorin signaali viedään komparaattorille, jonka lähdöstä muunnostulos saadaan digitaalisesti suodattamalla. Komparaattori on elektroninen komponentti, jonka lähtö on 'yksi' tai 'nolla', riippuen siitä, onko positiivisen tulon jännite suurempi vai pienempi kuin negatiivisen ja se toimii tässä käytännössä yksibittisenä A/D-muuntimena. Suodatus on yleensä alipäästösuodatus, mutta erikoistapauksissa (kuten tietyissä radioteknisissä sovelluksissa) se voi olla myös kaistanpäästösuodatus. Se on usein toteutettu FIR-tyyppisenä (Finite Impulse Response), minkä etuna on stabiilisuus kaikissa tilanteissa ja mahdollisuus toteuttaa lineaarinen vaihevaste. Komparaattorin lähtö summataan negatiivisena muuntimen tulon yksibittisen A/D-muuntimen kautta. Käyttämällä useampaa takaisinkytkentää saadaan muuntimen kvantisointikohinasta suuri osa siirrettyä hyötykaistalta ylemmille taajuuksille, jotka häviävät suodatuksessa [22]. Tätä tekniikka kutsutaan myös nimellä kohinanmuokkaus (noise shaping).

Muunnin ei vaadi mitään ulkoisia komponentteja, eikä usein edes antialiasuodatinta, sillä moninkertaisen ylinäytteistyksen ansiosta suuretkaan taajuudet eivät aliasoidu, vaan muunnin keskiarvoistaa ne pois. Yksibittisenä se ei myöskään ole herkkä valmistusprosessin aiheuttamalle hajonnalle, vaan hyvin suuri tarkkuus voidaan saavuttaa ilman kalibrointia. Sigma-delta-muunnin voidaan toteuttaa myös monibittisenä, jolloin komparaattorin sijasta siinä on usean bitin flash-muunnin ja takaisinkytkennässä vastaavan bittimäärän D/A-muunnin. Tällaisessa toteutuksessa flash-muuntimen ja D/A-muuntimen tarkkuus ovat kriittisiä muuntimen tarkkuuden kannalta.

Rinnakkaismuunnin Rinnakkaistyyppinen A/D-muunnin (flash ADC) koostuu rinnakkaisista komparaattoreista eli vertailijoista [20]. Flash on muunnintyypeistä nopein, sillä muuntimen viive on ainoastaan yksittäisen komparaattorin viive, riippumatta muuntimen tarkkuudesta. Tietenkin komparaattoreiden lähtöjen tila pitää vielä lukea ja koodata haluttuun muotoon, mikä hiukan hidastaa muunnosta etenkin, jos bittimäärä on suuri. Tämä ei kuitenkaan yleensä ole ongelma, vaan rinnakkaismuuntimilla päästään jopa useiden gigahertsien näytteenottotaajuuteen.

Koska yhdellä komparaattorilla havaitaan vain onko muunnettava signaali suurempi vai pienempi kuin vertailujännite, tarvitaan n -bittisen muuntimen toteuttamiseen 2^{n-1} kappaletta komparaattoreita ja vertailujännitteitä. Vertailujännitteet voidaan toteuttaa sarjaan kytketyillä vastuksilla, mutta 2^n kappaletta vastuksia ja 2^{n-1} kappaletta komparaattoreita vievät mikropiirissä huomattavan määrän pinta-alaa, minkä takia rinnakkaismuuntimet ovatkin harvoin yli 8-bittisiä. Kuvassa 10 on 3-bittinen rinnakkaismuunnin. Suuremman bittimäärän muuntimet toimivat samalla periaatteella.

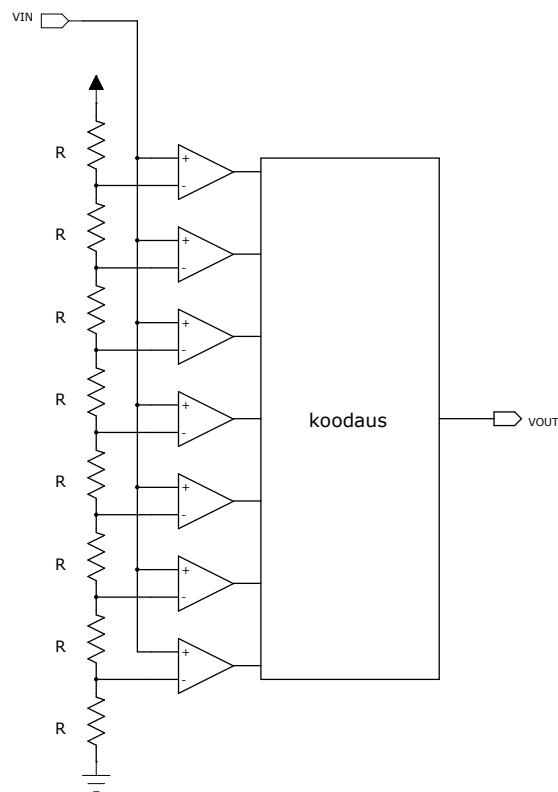


Kuva 9: yksibittisen sigma-delta-A/D-muuntimen periaatekuva [14].

Liukuhihnamuunnin Liukuhihnatyypinen A/D-muunnin (Pipeline ADC) koostuu sarjaankytketyistä rinnakkaistyyppisistä muuntimista esimerkiksi kuvan 11 osoittamalla tavalla. Jakamalla 8-bittinen rinnakkaismuunnin kahdeksi 4-bittiseksi tarvitaan 255 komparaattorin sijaan vain $2 \cdot (2^4 - 1) = 30$, ja näin sen piillä vaatima pinta-ala on huomattavasti pienempi. Toisaalta rakenne muuten on hiukan monimutkaisempi ja monivaiheisuuden myötä muunnos kestää pidempään. Kaikkien sarjaankytkettyjen lohkojen tarkkuus tulee myös mitoittaa muuntimen kokonaistarkkuuden mukaan, eli eniten merkitsevien bittien lohkon toleranssit määräytyvät vähiten merkitsevän bitin mukaan. [16]

Integroiva A/D-muunnin Yksinkertaisin mahdollinen A/D-muunnin lienee niin sanottu integroiva muunnin, joka on periaatteeltaan kuvan 12 mukainen. Siinä muunnettava jännite on kytketty vastuksen kautta operaatiovahvistimen negatiiviseen tuloon, joka on tässä tapauksessa on virtuaalinen maapiste. Koska negatiivisessa takaisinkytkennässä operaatiovahvistimen tuloon ei kulje virtaa, varautuu kondensaattori suoraan jännitteeseen verrannollisella virralla. Mittauksen alussa laskuri käynnistetään, ja se pysähtyy, kun kondensaattorin jännite nousee vertailujännitteen yli ja saa komparaattorin tilan vaihtumaan. Laskurin arvo on suoraan verrannollinen tulon jännitteeseen.

Kuvatun kaltaisen muuntimen ongelmana on sen tarkkuuden riippuminen suoraan R :n ja C :n tarkkuudesta. Lisäksi muunnokseen kuluva aika on verrannollinen



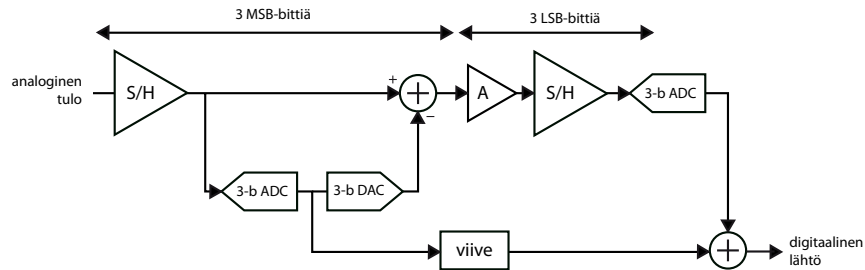
Kuva 10: 3-bittisen rinnakkaismuuntimen periaate.

jännitteen suuruuteen. Tavallisesti käytetäänkin kuvan 13 mukaista ratkaisua, ns. kaksoisintegroivaa A/D-muunninta, jossa kondensaattoria ensin varataan mitattavalla jännitteellä, minkä jälkeen varaus puretaan kytkemällä tulo vertailujännitteeseen. Näin integraattorin komponenttien epätarkkuus kumoutuu. Varaaminen kestää ennalta määrätyn ajan t_c , minkä jälkeen tulos saadaan mittaamalla aika t_d , joka purkautumiseen kuluu. Muunnin voidaan toteuttaa lisäämällä integroivan muuntimen tuloon kytkin, joka varaamisen ajan on kytketty mitattavaan jännitteeseen tämän jälkeen kytketään negatiiviseen jännitteeseen, jolloin kondensaattori purkautuu.

Kaksoisintegroivat muuntimet ovat yleensä melko tarkkoja, 12...20-bittisiä, mutta hyvin hitaita, yleensä muutama näyte sekunnissa ja parhaimmillaankin noin 100. Muunnintyyppiä käytetään yleensä lähinnä yleismittareissa tai muissa saman tapaisissa, joissa signaalit muuttuvat hitaasti. Valitsemalla integrointiaika sopivasti saadaan verkkotajuiset häiriöt vaimennettua tehokkaasti [4].

SAR SAR-muunnin (Successive Approximation Register ADC, punnitseva A/D-muunnin) on sigma-delta-muuntimen ohella yleisin muunnintyyppi. Muunnin testaa — punnitsee — bitin kerrallaan, alkaen eniten merkittävästä. Muunnos on siis binäärihaku, jossa tutkitaan, onko muunnettava jännite suurempi vai pienempi kuin vertailujännite. Jokaisen vertailun jälkeen vertailujännitteeksi vaihdetaan jäljellä olevan alueen puolivälissä oleva jännite. Muunnokseen kuluva aika kasvaa lineaarisesti erottelukyvyn funktiona, eli jokaisen bitin kohdalla kuluu sama aika. SAR-tyyppisten muuntimien tarkkuudet ovat yleensä 10 ja 16 bitin väliltä ja nopeudet ulottuvat muutamiin megahertzeihin. Niillä päästään pieneen virrankulutukseen ja ne vievät piillä melko vähän pinta-alaa. Niitä on usein esimerkiksi mikrokontrolleiden integroituina A/D-muuntimina. [13]

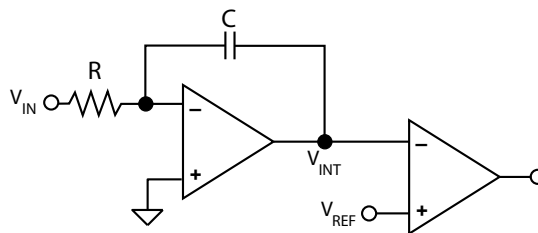
Muunnin voidaan käytännössä toteuttaa hyvin monella eri tavalla, mutta periaate on kuitenkin hyvin yksinkertainen (kuva 14). Tulossa on pitopiiri, jolla tulojännite V_{IN} pidetään koko muunnoksen ajan sillä tasolla, joka sillä oli näytteistysprosessin alkuhetkellä. Binäärihaku toteutetaan siten, että aluksi N-bittinen rekisteri asete-



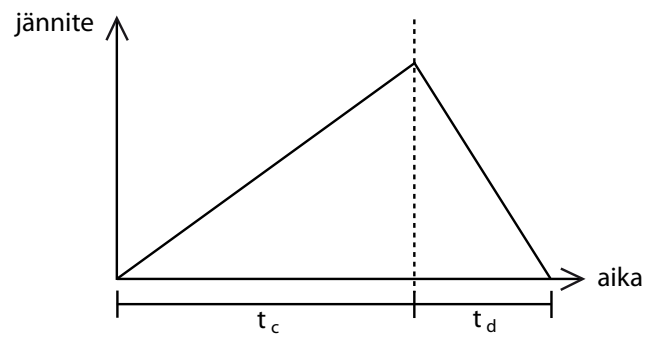
Kuva 11: Kaksiportainen liukuhihnamuunnin, joka koostuu kahdesta peräkkäisestä 3-bittisestä muuntimesta.

taan puoliväliin (arvoon $100 \dots .00$, missä siis eniten merkitsevä bitti eli MSB on 1 ja muut bitit nollia). Tällöin D/A-muuntimen lähtö V_{DAC} on $1/2 V_{REF}$, eli täsmälleen muunnosalueen puolivälissä. V_{REF} on vertailujännite, josta D/A-muunnin muodostaa vertailujännitteen, johon se vertaa tulojännitettä, ja useimpien muuntimen muunnosalue on $0 \dots V_{REF}$, mutta jossain se on myös $0 \dots 2V_{REF}$. (Tässä selityksessä oletetaan muunnosalueeksi $0 \dots V_{REF}$, mutta itse työssä käytetyssä tyyppissä ADS8343 on muunnosalue $0 \dots 2V_{REF}$.) Seuraavaksi vertaillaan komparaattorin avulla, onko tulojännite suurempi vai pienempi, kuin V_{DAC} . Jos V_{IN} on suurempi kuin V_{DAC} , on komparaattorin lähtö looginen 1 ja MSB pysyy arvossa 1. Vastaavasti, jos V_{IN} on pienempi kuin V_{DAC} , putoaa MSB arvoon 0. Seuraavaksi testataan toiseksi eniten merkitsevä bitti asettamalla se arvoon yksi ja tekemällä samanlainen vertailu. Näin jatketaan, kunnes kaikki bitit vähiten merkitsevään bittiin (LSB) asti on käyty läpi.

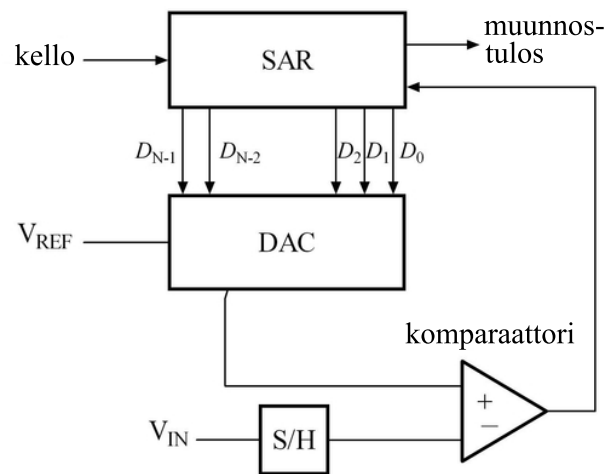
D/A-muunnin voidaan toteuttaa esimerkiksi kuvan 15 mukaisesti. Kondensaattorit vastaavat D/A-muuntimen bittejä ja kytkemällä kondensaattori jännitteeseen V_{REF} saadaan looginen 1 ja maahan kytkemällä 0. Kondensaattoreiden kytkentöjen muuttamisessa kokonaisvaraus säilyy, joten efektiivisen kapasitanssin muuttuessa myös jännite muuttuu. Eniten merkitsevän bitin kondensaattori on suurin, ja seuraavan bitin kondensaattori aina puolet edellisestä; näin myös jokaista bittiä vastaava jännite on puolet pykälää merkitsevemmän bitin jännitteestä ja jännitteet myös summautuvat lineaarisesti. Viimeisenä on vielä niin sanottu ”dummy”-kondensaattori, joka on yhtä suuri kuin LSB-kondensaattori.



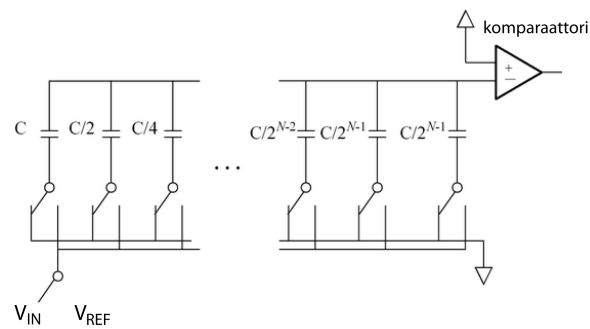
Kuva 12: Integroivan A/D-muuntimen periaate.



Kuva 13: Kaksoisintegroivan A/D-muuntimen periaate .



Kuva 14: SAR-muuntimen periaate.



Kuva 15: Erään SAR-muuntimen käytännön toteutus.

3.3.3 A/D-muuntimen valintaperusteet

Käytettävän A/D-muuntimen valinnassa tärkeimpiä ominaisuuksia oli riittävä erottelukyky, vähintään 16 bittiä, sekä riittävän pieni kohina. Nopeuden suhteen ei ollut suuria vaatimuksia. Näytteenottotaajuus on 300 Hz, joten kolmen kanavan näytteistämiseksi riittää alle 1 kHz taajuudella näytteistävä muunnin. BKG-signaalia mitattaessa signaalissa oleellisia ovat jännitteen muutokset, joten signaalin nollapistevirheellä tai sen lämpötilariippuvuudella ei ole juurikaan merkitystä. Vaatimusten perusteella soveltuvia muunnintyyppisiä olivat lähinnä SAR-muuntimet ja sigma-delta-muuntimet, joilla saavutetaan sekä riittävä resoluutio että nopeus. Flash- ja liukuhihnamuuntimet taas on tarkoitettu huomattavasti suuremmille nopeuksille, eikä niiden erottelukyky ole riittävä. Integroivat muuntimet taas ovat liian hitaita.

Mitattavat voimasignaalit ovat tietyllä tapaa hyvin samankaltaisia kuin musiikissa, ainoastaan taajuusalue on huomattavasti alempi. Yhteistä on se, että signaaleissa ei ole varsinaista tasajännitekomponenttia (tai sillä ei ole merkitystä), eikä signaali ei myöskään muutu keskimäärin kovinkaan paljon kahden näytteen välillä. Näin ollen audiomuunnin oli vartenotettava vaihtoehto, sillä ne ovat nopeuteensa ja tarkkuuteensa nähden yleensä huomattavasti muita halvempia. Ne ovat kuitenkin yleensä $\Sigma\Delta$ -tyyppisiä, eli niiden asettumisaika on melko hidas, eikä niitä siksi voi käyttää multiplekserin kanssa, kun signaalista toiseen vaihtaessa kuluisi huomattava aika, ennen kuin saataisiin oikeita tuloksia. Jokaiselle kolmelle kanavalle olisi pitänyt olla oma muunnin, jolloin halvemmän yksikköhinnan etu olisi menetetty ja kytkennästä olisi tullut monimutkaisempi, vaikkakin sigma-delta-muunninta käytettäessä antialiassuodattimesta oltaisiin voitu kokonaan luopua.

Suurella osalla audiomuuntimia on lisäksi sisäänrakennettu ylipäästösuodin, joka on muuntimesta riippuen muutaman hertsin taajuudella, mutta joka tapauksessa selkeästi liian ylhäällä ainakin hengityksen kannalta. Osalla audiomuuntimia tosin tämä ylipäästösuodin on ohitettavissa. Vielä yhtenä ongelmana oli se, että käytännössä kaikki audiomuuntimet on suunniteltu toimimaan alimmillaan 8 kHz näytteenottotaajuudella ja lähes kaikki myös ovat 24-bittisiä stereomuuntimia, eli niissä on kaksi erillistä muunninta ja ne toimivat yleensä vain sellaisena. Näistä syistä datan määrä olisi kasvanut turhan suureksi ja olisi saattanut aiheuttaa ongelmia käytetylle ATmega8-mikrokontrollerille etenkin, kun audiomuuntimet käyttävät erityistä I²S-väylää, jollaiselle useimmissa mikrokontrollereissa ei ole piiritason tukea. I²S (Inter-IC Sound, tai Integrated Interchip Sound) on yhden laitteen eri komponenttien väliseen äänisignaalin siirtoon tarkoitettu sarjamuotoinen väyläprotokolla. Piiritason tuen puuttuminen tarkoittaa käytännössä sitä, että itse siirtoprotokollan vaatimusten toteuttamiseen joutuisi käyttämään huomattava määrä prosessoriaikaa ja koodin kirjoittaminen siten, että tiedonsiirto kaikissa tilanteissa olisi luotettavaa, olisi vaatinut aika ja vaivaa.

Lopulta sopivimmaksi muunnintyypiksi osoittautui SAR, joka tarjoaa riittävän erottelukykyyn ja nopeuden ja joka sopii erityisen hyvin nimenomaan multiplekserin kanssa käytettäväksi, koska siinä jokainen näytteenotto täysin erillinen tapahtuma.

Koska laite toimii vain, kun se on kytketty tietokoneeseen USB-liitännän kautta, ei muuntimen tai muidenkaan aktiivisten komponenttien tehonkulutuksella ole suur-

ta merkitystä, kunhan ei ylitetä standardin mukaisia rajoja, eikä niiden ylittämistä tässä tapauksessa ollut pelkoa. USB:n tarjoama käyttöjännite on USB-standardin mukaan 4,75...5,25 voltia normaalissa tietokoneen USB-liittimessä tai omalla tehollähteellään varustetussa keskittimessä ja 4,40...5,25 voltia väylästä tehon ottavassa keskittimessä. Laitteen tulee siis toimia vähintään 4,40 voltin käyttöjännitteellä, lukuunottamatta toimintoja, jotka vaativat yli 100 mA virtaa [5]. Koska haluttiin käyttää lineaarisesti reguloituja käyttöjännitteitä, tuli jännitteen käytännön ylärajaksi noin 4,2 voltia, kun huomioidaan niin sanottujen LDO-regulaattoreiden (low drop-out voltage) tyypillisesti noin 100...200 mV jännitehäviö.

Jännite haluttiin pitää mahdollisimman suurena, jotta komponenttien kohina pysyisi riittävän pienenä suhteessa käyttöjännitteeseen ja sitä kautta dynamiikka riittävänä. Tämä rajoitti muuntimen valintaa yllättävän paljon, sillä suuri osa muuntimista oli suunniteltu toimivaksi 3,3 V tai 5 V jännitteillä ja puolen voltin tai alle jännitetoleranssilla, toisin sanoen muuntimien sallitut käyttöjännitteet olivat joko 3,0...3,6 tai 4,5...5,5 voltia. 4,5...5,5 voltin jännitteellä toimiva muunnin olisi hyvinkin saattanut käytännössä toimia, koska USB-liitännästä saatava jännite lienee enimmäkseen 5 voltia. Laite haluttiin kuitenkin toteuttaa standardin mukaisesti, eli 4,40 voltilla toimivaksi, eikä luottaa hyvään onneen.

Joku 5 voltin muuntimista olisi hyvinkin saattanut käytännössä toimia myös 4,2 voltilla, mutta muuntimeksi päätettiin kuitenkin valita hiukan laajemmalle käyttöjännitealueelle tarkoitettu tyyppi. 3,3 voltin ajateltiin olevan turhan pieni dynamiikan kannalta, vaikka jälkikäteen mietittynä voidaan todeta, että ero 3,3 V ja 4,3 V välillä on noin 2 dB, eli 16-bittisen muuntimen teoreettiseen 96 dB dynamiikkaan verrattuna hyvin pieni.

Hakkuriregulaattorilla olisi myös voinut helposti varmistaa 5 voltin reguloitun lähtöjännitteen mainitulla tulojännitealueella, mutta hakkuri olisi ollut monimutkaisempi, kalliimpi ja alttiimpi aiheuttamaan häiriöitä suuri-impedanssiseen voimaanturiin ja muihinkin analogiapiireihin.

3.3.4 ADS8343

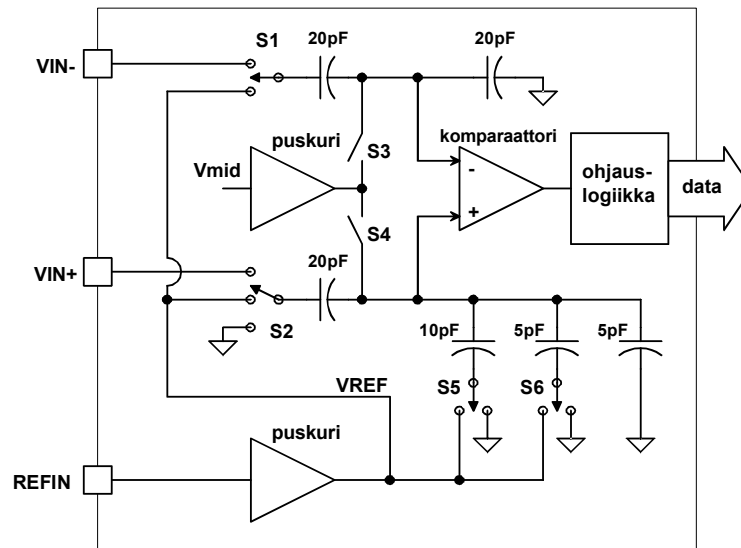
Sopivaksi vaihtoehdoksi osoittautui Texas Instrumentsin tyyppi ADS8343, joka on 16-bittinen SAR-tyyppinen muunnin, jonka suurin näytteistystaajuus on 100 kHz, tehollinen bittien määrä käytettävillä taajuuksilla 14,8 bittiä ja käyttöjännitealue 2,7...5,5 voltia. Tuloja on kahdeksan, ja tulon multiplekserillä voidaan valita mikä tahansa niistä joko yksipäisenä (single-ended) tai eromuotoisena eli differentiaalisena. Muuntimen huono puoli on suhteellisen korkea hinta, mikä kuitenkin päätettiin hyväksyä, koska muunnin oli muuten sopivin.

3.3.5 A/D-muuntimen tulojen ajaminen

Käytetyn A/D-muuntimen tulo on kapasitiivinen, koska näytteistykseen käytetty kondensaattori on kytketty suoraan tulonastoihin multiplekserin kautta, ilman erillistä puskurivahvistinta tai vastusta. Näin ollen tuloa ajavan piirin — tässä tapauksessa antialiassuodattimen tai ohjelmoitavan vahvistimen — täytyy pystyä syöttämään hetkellisesti suuria virtoja ja olla riittävän nopea ja stabiili kapasitiivisilla

kuormilla, jotta tulojännite ehtii asettua näytteenoton aikana ja ettei ajava vahvistin jää värähtelemään.

Ensimmäisissä prototyypeissä antialiassuodattimen vahvistimen nopeus ei ollut riittävä ja siitä tulikin ongelmia, joita aluksi epäiltiin sulautetun ohjelman virheeksi. Ongelma liittyi A/D-muuntimen hieman tavallisesta poikkeavaan tapaan toteuttaa näytteistäminen ja sisäinen D/A-muunnin. Käytetyn A/D-muuntimen jännitealue on $0 \dots 2 V_{REF}$, ja se on toteutettu kuvan 16 mukaisesti. Kytkenästä seuraa, että näytteistyskondensaattori jää koko muunnosprosessin jälkeen jännitteeseen, joka riippuu muunnoksen tuloksesta siten, että muunnosalueen puolivälissä siinä tapahtuu suuri hyppäys. Tämä tarkoittaa sitä, että kun melko hitaasti muuttuva analoginen signaali (ts. peräkkäisten näytteiden välinen ero suhteessa koko tulojännitealueeseen on pieni) lähestyy puoliväliä, muuttuu näytteistyskondensaattorissa edellisen muunnoksen jäljiltä oleva jännite myös hitaasti. Kun tullaan tilanteeseen, jossa edellinen näyte on puolivälin yläpuolella ja uusi näyte sen alapuolella, tapahtuu jännösjännitteessä suuri hyppäys kuvan 17 mukaisesti. Ajavan vahvistimen kannalta tämä tarkoittaa sitä, että A/D-muuntimen tulon näytteenoton hetkellä haukkaama virta muuttuu jyrkästi. Tästä seurasi mainitussa prototyypissä se, että aina (numeerisen) muunnostuloksen ylittäessä nollan näkyi signaalissa hyppäys, joka johtui aluksi käytetyn vahvistimen hitaudesta. (Muunnin antaa tuloksen 2:n komplementti-muodossa, eli muunnosalueen puolivälissä olevan jännite tuottaa muunnostulokseksi luvun 0.) Vahvistin ei siis ehtinyt ladata näytteistyskondensaattoria oikeaan jännitteeseen näytteenoton aikana. Virhettä tuli luultavasti koko jännitealueella, mutta sitä ei huomattu muuten kuin virheen suuruuden muutoksesta alueen puolivälissä.



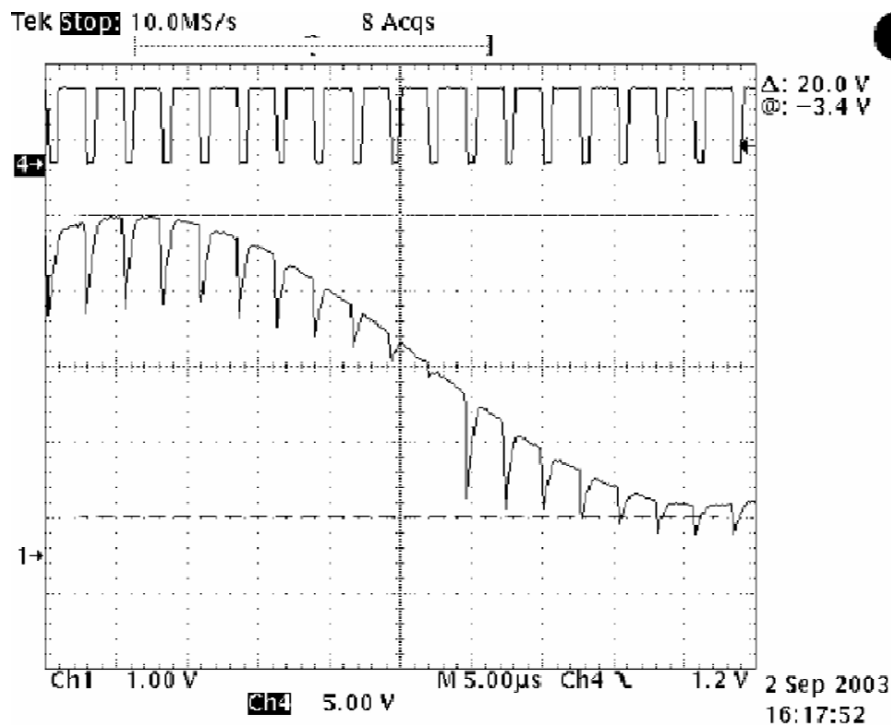
Kuva 16: SAR-tyyppisen A/D-muuntimen ADS8343 sisäinen toteutus. [7]

Koska virhe esiintyi aina vain nollan ylityksessä, ajateltiin sen aluksi liittyvän jontekin bittien lukemiseen muuntimelta tai sulautetun ohjelman lukujen käsittelyyn,

esimerkiksi siihen, kun muunnokset luetaan muuntimelta kolmena kahdeksan bitin tavuna ja sen jälkeen yhdistetään 16-bittiseksi etumerkilliseksi kokonaisluvuksi (sulautetussa C-ohjelmassa tietotyyppistä 'char' tietotyyppiä 'signed integer'). Kun virhettä ei kuitenkaan mistään ohjelmaan liittyvästä löytynyt, tutustuttiin tarkemmin valmistajan SAR-muuntimien suunnitteluohjeisiin, ja niitä tutkimalla ongelmaan päästiinkin käsiksi.

A/D-muuntimen kapasitiivisen tulon ja sitä ajavan vahvistimen (antialiassuodattimen tai PGA-piirin) lähdön väliin suunniteltiin RC-suodatin, joka vähentää vahvistinpiirin lähdön näkemää kapasitanssia ja siten helpottaa sille asetettavia vaatimuksia ja samalla kondensaattori muuntimen tulon välittömässä läheisyydessä tarjoaa matalaimpedanssisen lähteen näytteistyskondensaattorin kytkeytymisestä aiheutuvalle virtapiikille. RC-suodatin myös rajoittaa muuntimen kaistanleveyttä vähentäen kohinaa.

Suunnittelu lähtee liikkeelle A/D-muuntimen tulon kapasitanssista, joka tässä tapauksessa on valmistajan mukaan 25 pF. Käytettävän kondensaattorin kapasitanssin jännite- ja taajuusriippuvuuksien tulee olla hyvin pienet. Käytännössä sopivia ovat hopea-mica-kondensaattorit tai C0G-tyypin keraamiset kondensaattorit. Valmistajan suosituksen mukaan ulkoisen suodattimen kondensaattorin tulee olla kapasitanssiltaan vähintään 20-kertainen muuntimen tulon kapasitanssiin nähden, eli vähintään 500 pF. Texas Instrumentsin asiakaspalvelusta saadusta taulukosta 1, nähdään, että 16-bittisellä muuntimella tulee näytteistysajan t_{AQ} ja suodattimen asettumisajan τ suhteen k olla vähintään 11,8. Tässä ajassa RC-suodatin ehtii aset-



Kuva 17: ADS8343:n tulon jännitteessä näkyvä heilahdus aina näytteistyksen alkaessa. [8]

tua vähintään puolikkaan vähiten merkitsevän bitin tarkkuudella oikeaan arvoon näytteenoton aikana. Muuntimen näytteenotto kestää 4,5 kellojaksoa, eli aika riippuu käytetystä SPI-väylän nopeudesta, joksi valittiin 1 megabitti sekunnissa, mistä näytteistysajaksi saadaan 4,5 μ s. Muuntimen sisääntulon kapasitanssissa on valmistusprosessista johtuvaa hajontaa, joten kondensaattorin arvoksi kannattaa valita hiukan suurempi kuin 500 pF. Yksinkertaisuuden vuoksi valittiin 1 nF. Pyöristämällä k ylöspäin arvoon 12, saadaan yhtälöstä [8]

$$\tau = RC \leq \frac{t_{AQ}}{k} = \frac{4,5\mu s}{12} = 0,375\mu s \quad (3)$$

vastuksen R arvoksi 375 Ω , josta lähin pienempi E24-sarjan arvo on 360 Ω .

Taulukko 1: Aikavakiokertoimet SAR-muuntimen tulon RC-suodattimelle. Annetulla kertoimella RC-suodatin asettuu alle $\frac{1}{2}$ LSB:n tarkkuudella oikeaan arvoon.

A/D-muuntimen erottelukyky	kerroin k
8	6,2
10	7,6
12	9,0
14	10,4
16	11,8
18	13,2
20	14,6

3.4 Mikro-ohjain

3.4.1 Mikro-ohjaimet yleisesti

Mikro-ohjain eli mikrokontrolleri (microcontroller tai microcontroller unit, MCU) on pieni tietokone, jossa on samalle piipalalle integroituna kaikki tarvittava, eli suoritin (CPU, central processing unit), rekisterit, muistit, kello, tulo- ja lähtöliitännät (input/output, I/O), laskurit ja ajastimet, sekä erilaiset väyläohjaimet. Lisäksi useissa mikro-ohjaimissa on integroituna myös A/D-muunnin. Joissain malleissa on myös esimerkiksi sisäänrakennettu USB-väyläohjain tai signaalinkäsittely- eli DSP-yksikkö (digital signal processing).

Tietokoneisiin verrattuna mikro-ohjaimet eroavat selkeästi pienemmän laskentatehon ja muistin määrän lisäksi siinä, että niillä ajetaan tarvittavaa ohjelmaa yleensä ilman käyttöjärjestelmää, vaikkakin joillekin mikro-ohjaimille onkin olemassa käyttöjärjestelmiä. Lisäksi monissa kohteissa järjestelmän reaaliaikaisuudelle on asetettu tiukat vaatimukset. Tämä tarkoittaa sitä, että tiettyjen asioiden täytyy tapahtua riittävän lyhyellä viiveellä tai että viive on riittävän tarkasti ennakoitavissa. Esimerkiksi erilaisissa tarkoissa prosessinohjaussovelluksissa ei yleensä voida sallia satunnaisia muutaman sekunnin viiveitä reagoinnissa antureilta saatavaan ohjaustietoon. Reaaliaikaiseen toimintaan liittyy myös keskeytysten käyttö. Keskeytyksen voivat aiheutua esimerkiksi ulkoisista tapahtumista, kuten jonkun tulon tilanmuutoksesta tai sisäisestä tapahtumasta, kuten laskurin täyttymisestä, mistä puhutaan myöhemmin luvussa 3.4.1.

Mikro-ohjaimia käytetään lähes kaikissa elektronisissa laitteissa. Jos laitteessa on vähänkin logiikkaa, joka vaatisi parikin erillistä logiikkapiiriä, on käytännössä helpompi ja usein halvempikin toteuttaa se mikro-ohjaimella.

Suoritinydin on mikro-ohjaimen keskeisin osa, joka ohjaa kaikkea toimintaa. Se lukee ohjelmamuistista käskyn ja suorittaa sen. Rekistereitä käytetään erilaisissa laskutoimituksissa lyhytaikaiseen tulosten, kuten funktion sisällä käytettävien muuttujien tallentamiseen. Rekistereitä on yleensä muutamia ja korkeintaan joitain kymmeniä ja niihin mahtuu yleensä yksi tavu tietoa.

Muistit Ajon aikaiseen tiedon, kuten erilaisten muuttujien, tallentamiseen käytetään käyttömuistia, joka on yleensä SRAM-tyyppistä (Static Random Access Memory). Sen on niin sanottua haihtuvaa muistia, eli jos mikro-ohjaimelta katkaistaan käyttöjännite, häipyy myös SRAM-muistin sisältö. Kaikkein yksinkertaisimmissa mikro-ohjaimissa ei ole edes SRAM-muistia, vaan kaikkien muuttujien on mahdollista rekistereihin. Tällaisissa prosessoreissa ajettavat ohjelmat ovat yleensä hyvin yksinkertaisia.

Mikäli joitain tietoja, kuten kalibrointiasetuksia tai käyttäjän tekemiä asetuksia, halutaan tallentaa pysyvästi, voidaan käyttää EEPROM-muistia (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory), joka on sähköisesti uudelleenkirjoitettava haihtumaton muisti. Suurimmassa osassa nykyisiä mikro-ohjaimia on sisäinen EEPROM.

Itse ohjelma oli aiemmin yleensä tallennettu sisäiseen tai ulkoiseen EPROM-muistiin (Erasable Programmable Read Only Memory), joka voitiin kirjoittaa kerran

sähköisesti, minkä jälkeen se voitiin tyhjentää ainoastaan ultraviolettivalon avulla ja tämän jälkeen ohjelmoida uudestaan. EPROM-muistin sisältävissä mikropiireissä oli ikkuna, joka oli normaalisti peitetty valolta suojaavalla tarralla tai vastaavalla, joka irrotettiin, kun piiri laitettiin UV-valoon tyhjennettäväksi. Nykyisin ohjelma tallennetaan usein sisäiseen flash-muistiin, joka voidaan ohjelmoida ja uudelleenohjelmoida sähköisesti ja monissa piireissä ilman erityisiä ohjelmointilaitteita, esimerkiksi suoraan sarjaväylän kautta. Ohjelmamuisti on yleensä huomattavasti suurempi kuin SRAM- ja EEPROM-muistit. Kaikissa mikro-ohjaimissa ei ole sisäistä ohjelmamuistia, vaan ohjelma tallennetaan ulkoiselle flash- tai EEPROM-muistille, ja kytketään mikro-ohjaimen sopivalla väylän avulla. Jossain mikro-ohjaimissa flash-muistia voidaan käyttää hieman SRAM-muistin tapaan, esimerkiksi käyttöliittymän vaatimia suurehkoja selkokielisiä viestejä voidaan lukea suoraan flash-muistista ja tulostaa esimerkiksi laitteen LCD-näytölle. Näin käyttömuistia ei tarvitse tuhjata käyttöliittymän teksteihin.

Oheislaitteet Mikro-ohjaimissa on usein lähes kaikki tarvittava integroituna samalla piipalalle. Useimmissa on sisäänrakennettu kello, joka on yleensä RC-oskillaattori. Sen ansiosta piiri toimii tarvittaessa ilman ulkoista kelloa. Sisäinen kello ei kuitenkaan ole välttämättä riittävän tarkka tai se ei toimi halutulla taaajuudella ja usein käytetäänkin ulkoista kidettä tai kellosignaalia. Yleensä mikro-ohjaimissa on myös useita erillisiä laskureita, joita voidaan käyttää erilaisiin ajastustehtäviin tai esimerkiksi pulssinleveysmoduloidun moottorinohjaussignaalin tuottamiseen. Laskuri voidaan esimerkiksi ohjelmoida aiheuttamaan keskeytyksen aina saavuttaessaan tietyn arvon. Näin laskurin arvoa ei tarvitse jatkuvasti seurata itse ohjelmassa.

Useimmissa malleissa on myös sisäänrakennettu A/D-muunnin. Se on useimmiten 8- tai 10-bittinen, muutamien kilohertsien näytteenottotaajuuteen yltävä SAR-muunnin ja muuntimen tulossa on multiplekseri, jolla signaali voidaan valita useasta mikropiirin fyysistä jalasta. Joissain piireissä on sisäinen ohjelmoitava vahvistin, jolla heikkoja signaaleja voidaan vahvistaa ennen muunnosta. Huomattavasti harvemmissä malleissa on sisäinen D/A-muunnin, mutta usein jonkinlaisen D/A-muuntimen voi toteuttaa käyttämällä sisäistä laskuria pulssinleveysmodulaattorina ja suodattamalla tämä signaali ulkoisen RC-suodattimen avulla. Tällaisilla muuntimilla ei yleensä päästä kovin suuriin nopeuksiin, mutta hitaasti muuttuvien jännitteiden tuottaminen niillä kyllä onnistuu.

Tulo- ja lähtöliitännät Mikro-ohjaimia myydään monenlaisissa koteloissa, aina muutamalla liitäntäjalalla varustetuista usean kymmenen jalan malleihin. Yleensä yksittäinen jalka voidaan ohjelmallisesti valita joko tavanomaiseksi tuloksi tai lähdöksi tai mahdollisesti jotain erikoista tehtävää hoitavaksi liitännäksi. Lähtöliitäntöjen kautta mikro-ohjain voi ohjata kytkimiä, ledejä, LCD-näyttöä ja muita vastaavia, tuloliitäntöjen avulla se taas voi ottaa vastaan käskyjä näppäimiltä, mittauksia antureilta tai muita toimintaan vaikuttavia tietoja.

Yleiskäyttöisillä liitännöillä voidaan myös toteuttaa erilaisten protokollien mukaisia tiedonsiirtokanavia, joskin yleisimmin käytetyille on usein rautatason tuki, jolloin niiden hoitamiseen ei tarvita erikoista ohjelmakoodia, vaan esimerkiksi sar-

javäylyä voidaan arkkitehtuurista riippuen lukea ja kirjoittaa kuten muitakin rekistereitä tai muistiosoitteita.

Joitain yleisimpiä dataväyliä mikro-ohjaimissa ovat UART (Universal serial Asynchronous Receiver-Transmitter, 'sarjaväylä'), SPI (Serial Peripheral Interface), I²C (Inter-Integrated Circuit) ja TWI (Two-Wire Interface) jotka kaikki ovat sarjamuotoisia ja erilaisiin tilanteisiin tarkoitettuja.

Sarjaväylät UART vastaa loogisesti RS-232 -väylää, joka on tietokoneissa vuosikymmeniä käytössä ollut sarjamuotoinen tiedonsiirtoon käytetty protokolla, joka on edelleen jossain määrin käytössä etenkin teollisuuden mitta- ja ohjauslaitteissa. UART eroaa kuitenkin RS-232:sta jännitetasoiltaan, jotka ovat prosessorille sopivat — tässä työssä käytetyn ATMEGA8:n tapauksessa signaali tulkitaan nolllaksi, jos sen jännite on alle 0,2 voltia ja ykköseksi, jos se on yli 0,6 voltia. Protokollan mukaan liikennöinti tapahtuu kahden osapuolen välillä ja se on asynkronista, eli erillistä kellosignaalia ei ole, vaan kummankin täytyy lähettää dataa toisen osapuolen ymmärtämällä nopeudella. Jossain tapauksissa laite osaa erottaa käytetyn nopeuden suoraan tulevasta datasta, mutta useimmin nopeudet täytyy vain asettaa ennalta kumpaankin laitteeseen. Kummassakin laitteessa on vähintään kaksi dataväylää, tulevalle (Rx) ja lähtevälle (Tx), jotka kytketään ristiin, eli yhden osapuolen Rx kytketään toisen osapuolen Tx:ään ja päinvastoin. Lisäksi protokolla määrittelee useita kättelyyn ja ohjaukseen käytettäviä signaaleja, jotka eivät kuitenkaan ole pakollisia.

SPI-väylä on samalla piirilevyllä olevien mikropiirien väliseen kommunikointiin tarkoitettu tahdistettu sarjaprotokolla, jossa on yksi isäntä (master) ja monta orjaa (slave). Siinä on kaksi datalinjaa, jotka ovat nimeltään MISO (Master in, Slave out) eli orjilta isännälle kulkeva datalinja ja MOSI (Master out, Slave in) eli isännältä orjille kulkeva datalinja. Kellosignaali tulee isännältä ja se on aktiivinen vain, kun tietoa siirretään. Kaikkien orjien datalinjat on kytketty samoihin MISO- ja MOSI-linjoihin ja isäntälaite valitsee kulloinkin käytettävän orjan erillisellä Slave Select-signaalilla (SS tai CS eli Chip Select). SS-linjan jännitteen ollessa nolla, on kyseinen orja valittuna. Jokaiselle orjalle täytyy mennä oma valintasiignaalsensa. Jos orjia on vain yksi, voidaan orjan SS-nasta yhdistää suoraan maahan, jolloin se on aina käytössä.

3.4.2 Atmel ATMEGA8

Tässä työssä käytettiin Atmelin Atmega-sarjan 8-bittistä mallia ATMEGA8, joka on sarjan halvimpia ja vaatimattomimpia malleja, joka maksaa alle 2 euroa 100 kappaleen erissä. Siinä on 8 kilotavun ohjelmamuisti, 1 kt SRAM ja 512 tavun EEPROM, sekä rautatason tuki UART:ille, SPI-väylälle ja muutamalle muullekin väylälle, joita ei tässä työssä kuitenkaan käytetty. Piirillä on myös 10-bittinen SAR-tyyppinen A/D-muunnin, mutta sitä ei käytetä, koska tarkkuutta haluttiin huomattavasti enemmän.

Mikrokontrolleri ohjaa laitteen kaikkia toimintoja. SPI-väylän kautta se ohjaa ja lukee A/D-muunninta sekä säätää tarvittaessa ohjelmoitavien vahvistinpiirien vah-

vistusta. USB-sarjaporttimuunninpiirin kanssa mikrokontrolleri kommunikoi UART:in kautta.

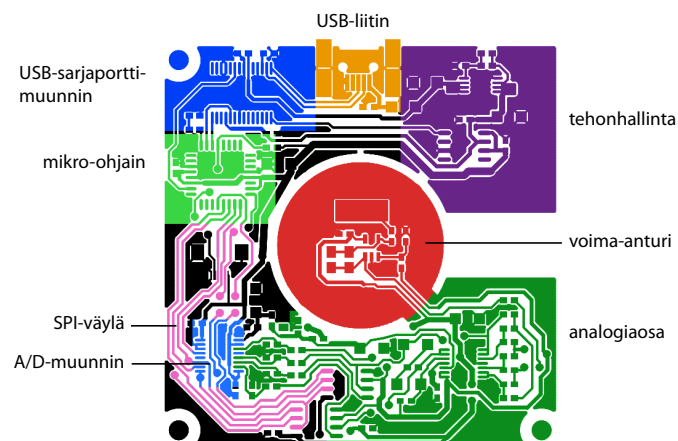
3.5 Piirilevy

3.5.1 Piirilevyn lähtökohdat

Piirilevyllä on elektroniikkalaitteessa yleensä kaksi tehtävää: yhdistää komponentit toisiinsa sähköisesti piirikaavion määräämällä tavalla, sekä kiinnittää komponentit mekaanisesti laitteeseen. Tässä työssä piirilevyn suunnittelun erityisenä vaikeutena oli se, että sen ulkomitat jouduttiin päättämään ennen kuin piirikaavio oli valmis, johtuen laitekoteloiden pitkäkköistä toimitusajasta, ja piirisuunnittelun edetessä komponenttien määrä lisääntyi merkittävästi tehden levyistä huomattavasti ahtaaman. Vaikeutta lisäsi se, että laitteessa on sekä digitaalisia osia, jotka aiheuttavat häiriötä, että herkkiä analogisia osia, jotka häiriintyvät herkästi. Häiriölähteet ja häiriintyvät osat piti pyrkiä pitämään mahdollisimman erillään samalla pitäen maatasot mahdollisimman yhtenäisinä. Levyllä on myös muutama sekasignaaliipiiri, A/D-muunnin ja ohjelmoitavat vahvistimet, jotka vaikeuttivat analogia- ja digitaaliosien maatasojen erillään pitämistä.

Piirilevyn mitoiksi asetettiin koteloita tilattaessa 57 mm kertaa 58 mm. Anturi päätettiin sijoittaa täsmälleen levyn keskelle ja USB-liitin lyhyemmän sivun keskelle. Lisäksi jokaiseen kulmaan päätettiin laittaa reikä 2,5 mm kiinnitysruuville.

Koska anturi on levyn keskellä, jäi muiden komponenttien sijoittelulle melko vähän vaihtoehtoja. Kuvassa 18 on esitetty komponenttien sijoittelu piirilevyllä lohko-tasolla. Sijoittelussa pyrittiin noudattelemaan ”signaalien luonnollista kulkua”, jotta johdinvedot olisivat mahdollisimman lyhyitä ja suoria.



Kuva 18: Piirilevyn lohko-kaavio

Piirilevyllä käytettävät johdinleveydet on valittu yhtäältä johtimessa liikkuvien virtojen, tavoitellun maksimiresistanssin ja -induktanssin, sekä käytettävissä olevan tilan mukaan ja toisaalta ottaen huomioon valmistustekniset asiat, jotka asettavat

rajoituksia sille, miten ohuita johtimia kannattaa tehdä. Käytetyllä piirilevyvalmistajalla hinta alkaa nousta, mikäli levyllä on alle 250 mikrometrin levyisiä johtimia tai johdinten välejä. Levyllä käytettiin oletuksena johdinleveydelle sekä kuparia-alueiden väliselle minietäisyydelle arvoa 300 mikrometriä. Tehonsyötössä käytettiin leveämpiä johtimia ja ohjelmointiliittimen johdinvedoissa jouduttiin käyttämään 250 mikrometrin arvoa johtimille ja johtimien väleille, koska valitun liittimen jalat sautuivat mainitulla jaolla olemaan.

3.5.2 Häiriöiden synty

Laitteet, joissa kulkee sähkövirtaa tai on jännitteitä, aiheuttavat magneettisia ja sähköisiä kenttiä, jotka voidaan ainakin teoriassa havaita myös laitteen ulkopuolella. Mainittujen suureiden muuttuminen ajan suhteen taas saa aikaan sähkömagneettisia häiriöitä. Nimenomaan sähkömagneettiset häiriöt yleensä aiheuttavat ongelmia. Staattiset eli muuttumattomat kentät aiheuttavat ongelmia lähinnä ollessaan hyvin voimakkaita, kuten esimerkiksi magneettikuvauslaitteen ympäristöön leviävä hyvin voimakas magneettikenttä.

Sähkömagneettiset häiriöt leviävät ilmateitse ja häiritsevät näin ollen paitsi usein laitteen omaa toimintaa, myös pahimmillaan hyvinkin kaukana olevia laitteita. Eri-tyisen herkkiä sähkömagneettisille häiriöille ovat erilaiset radiolaitteet, joiden tehtävänä on useimmiten nimenomaan ottaa vastaan sähkömagneettista säteilyä. Hyötysignaalin ollessa heikko voivat pienetkin häiriöt estää hyötysignaalin vastaanoton.

Häiriöt säteilevät erityisen hyvin johtimista. Suojaamaton johdin, jonka jännite muuttuu, toimii lanka-antennina. Johdin, jossa kulkee muuttuva virta, joka paluuvirran (maajohtimen) kanssa muodostaa silmukan, taas toimii silmukka- eli virta-antennina. [19]

Häiriöt voivat kytkeytyä myös sähköä johtavien osien, erityisesti erilaisten johtimien kautta resistiivisesti, kapasitiivisesti ja induktiivisesti. Nämä häiriöt leviävät erityisesti yhden laitteen sisällä, mutta tasasuuntaajien, taajuusmuuttajien tai moottoreiden käynnistysten aiheuttamat häiriöt voivat levitä hyvinkin kauas sähköverkon kautta. Häiriöitä aiheuttavat yleensä paljon tehoa kuluttavat laitteet, mutta huonosti suunniteltu pienitehoinenkin laite voi aiheuttaa häiriöitä verkkoon. Huonosti suunnitellussa laitteessa myös sähköverkosta tulevat häiriöt saattavat päästä tehosiötön läpi häiritsemään itse laitetta. Sähköverkon johtimet voivat myös toimia suurena antennina, jonka kautta häiriöt leviävät ilmaan.

Resistiivinen kytkeytyminen tarkoittaa häiriötä, joka syntyy, kun elektroniikan eri osat ottavan tarvitsemansa virran samaa johdinta pitkin. Kuvassa 19 on käyttöjännitejohdon päässä paljon tehoa käyttävä piiri B. Sen ottama virta saa johtimessa aikaan jännitehäviön, joka jakautuu tasapaksussa johtimessa tasaisesti koko matkalle. Näin ollen jännitehäviö näkyy myös samassa johdossa olevassa mikropiirissä A. Mikäli mikropiiri A on herkkä käyttöjännitteen häiriöille, näkyy B:n aiheuttama häiriö myös A:n lähdössä. Vastaavasti johdon sarjainduktanssi aiheuttaa jännitehäviöitä virran muuttuessa. Esimerkiksi suurella taajuudella toimivat hakkuriteholähteen transistorit voivat aiheuttaa voimakastakin häiriötä huonosti suunnitellussa laitteessa.

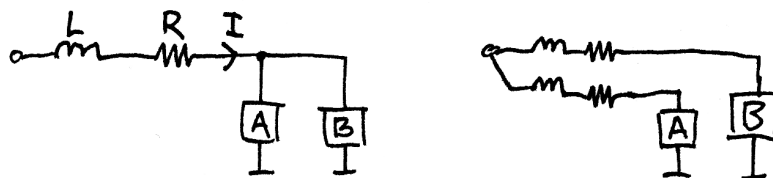
Kapasitiivinen kytkeytyminen tapahtuu kahden osan välisen kapasitanssin, yleensä ei-toivotun, niin sanotun hajakapasitanssin, kautta. Hajakapasitanssi voi tulla ongelmaksi erityisesti kahden pitkän rinnakkaisen johdinvedon välillä, kuten kuvassa 20 vasemmalla. Erityisesti nopeasti muuttuva jännitesignaali yhdessä johtimessa voi aiheuttaa jänniteheilahduksen myös viereisessä johtimessa. Ilmiötä kutsutaan myös nimellä ylikuuluminen.

Induktiivinen kytkeytyminen tarkoittaa häiriön välittymistä kahden johdinsilmukan keskinäisen induktanssin avulla. Muuntajassa tämä on toivottua ja mahdollistaa sähkön siirtämisen ilman galvaanista yhteyttä ja jännitteen muuttamisen halutuksi, mutta ilmiö esiintyy myös erityisesti toisiaan lähellä kulkevien johtimien välillä. Jos johtimien paluuvirrat vielä kulkevat etäällä johtimista, kuten kuvassa 21 vasemmalla, muodostuu virtasilmukoiden pinta-aloista suurempia ja keskinäinen induktanssi kasvaa. Laittamalla signaalijohdot kauemmaksi toisistaan ja molemmille signaaleille oma maavetonsa, pienenee niiden keskinäinen induktanssi huomattavasti.

Vielä yksi häiriöiden lähde on staattisten sähkövarausten purkautuminen, jollainen saattaa aiheutua ihmisen koskettaessa laitetta. Ihminen saattaa sopivissa olosuhteissa kerätä itseensä useidenkin kilovolttien jännitteen, joka voi huonosti suojatun laitteen sisälle päästessään aiheuttaa toimintahäiriöitä tai jopa hajottaa herkkiä mikropiirejä. Häiriö voi mennä laitteen sisään esimerkiksi väärin maadoitetun metallikotelon tai johtimen kautta.

3.5.3 Häiriöiden hallinta

Laitteen synnyttämät häiriöt täytyy pyrkiä minimoimaan, ettei se häiritsisi itseään tai muita lähellä olevia laitteita ja jotta se täyttäisi sähkölaitteille asetettavat EMC-määräykset (Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopi-



Kuva 19: Vasemmalla piirien A ja B ottama virta tulee samaa johdinta pitkin, jolloin toisen piirin B ottama virta vaikuttaa myös A:n käyttöjännitteeseen. Oikealla puolella kummallakin on oma johtonsa, jolloin piirit eivät vaikuta toisiinsa johdinimpedanssien kautta.

vuus). Toisaalta laitteen täytyy myös sietää jonkin verran ulkoista häiriötä. Nämä asiat kulkevat sikäli käsi kädessä, että usein samakaltaiset ominaisuudet lisäävät sekä häiritsevyyttä, että häiriintyvyyttä. Eri tilanteissa häiritsevyydelle ja häiriintyvyydelle voidaan asettaa erilaisia vaatimuksia valmistajan, käyttäjän ja viranomaisten taholta.

Eriyistä huomiota on kiinnitettävä siihen, että levyllä ei kulje nopeasti muuttuvia virtoja ja että ne kulkevat mahdollisimman lyhyitä matkoja tai että niitä kuljettavat johtimet eivät muodosta maasilmukoita. Nopeita virtamuutoksia voidaan estää käyttämällä asianmukaista suodatusta käyttöjännitteille, eli sopivan kokoista kondensaattoria mahdollisimman lähellä (korkeintaan joidenkin millimetrin päässä) kaikkia IC-piirejä. Maasilmukat taas vältetään pitämällä huoli, että johtimen virralle on paluureitti maata pitkin mahdollisimman lähellä johdinta, eli parhaimmillaan suoraan johtimen kohdalla levyn toisella puolella. Maasilmukat toimivat antennina, joiden tehokkuus riippuu pinta-alasta.

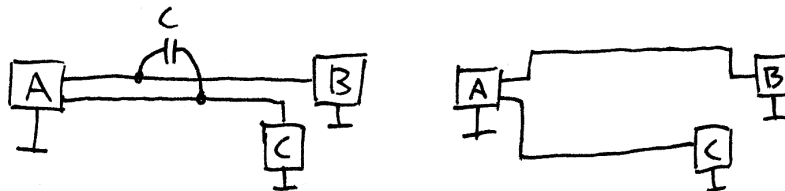
Vetojen välistä kapasitiivista ylikuulumista voidaan välttää vetämällä ne mahdollisimman erillään tai laittamalla niiden väliin maaveto. Myös kaikkien vetojen alla oleva maataso vähentää ylikuulumista ja säteilyä ympäristöön. Ohuempi piirilevy on tässä suhteessa parempi (tai monikerroslevyissä ohut kerrosten eristeväli).

Resistiivisiä häiriöitä voidaan vähentää käyttämällä riittävän paksuja johtimia, syöttämällä sähkö eri osille kullekin omilla johtimillaan, ja sijoittamalla suuritehoiset yhdelle ja pienitehoiset toiselle piirilevyille tai ainakin omille alueilleen samalla piirilevyllä.

3.5.4 Piirilevyn suunnittelu

Piirilevy suunniteltiin käyttäen Mentor Graphicsin PADS-ohjelmistoa. Piirikaavio piirrettiin alustavien suunnitelmien pohjalta PADS Logic -ohjelmalla, joka on PADSin piirikaavioiden piirtoon tarkoitettu ohjelma. Kun piirikaavio oli tehty, siirrettiin piirikavio PADSin piirilevyn suunnitteluohjelmaan nimeltä PADS Layout.

Logic antaa Layoutille listan komponenteista ja niiden välisistä kytkennöistä, ja Layout laittaa komponentit yhteen kasaan, minkä jälkeen käyttäjä voi siirtää komponentit sopiville paikoille ja piirrellä vedot ja kuparitasot käsin, tai halutessaan käyt-



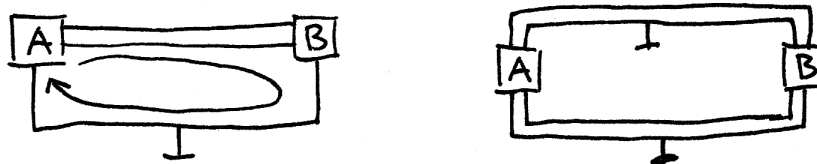
Kuva 20: Vasemmalla lähekkäin kulkevien johtimien välillä on huomattava kapasitanssi, jonka kautta erityisesti suuritaajuiset signaalit näkyvät myös viereisessä johdossa. Laittamalla johdot kauemmaksi toisiaan pienenee kapasitanssi.

tää molempiin tehtäviin automaattisia työkaluja. Automatisointia voi myös käyttää vain valikoituihin tehtäviin. Tässä tapauksessa työ tehtiin kuitenkin kokonaan käsin.

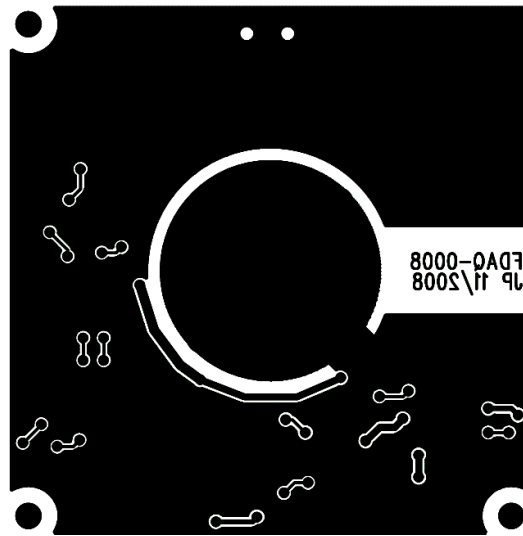
Piirilevyn suunnittelun edetessä tuli välillä esiin asioita, joiden takia piirikaaviotakin vielä muuteltiin, joista suurimpana aiemmin käsitelty suurempi vaatimusten muutos, jonka seurauksena ulkomittojen luukkoonlyömisen jälkeen tuli komponentteja lisää, minkä seurauksena levyn suunnittelusta tuli haastavampi.

Suunnittelu tehtiin kappaleissa 3.5.2 ja 3.5.3 esitettyjen periaatteiden, kirjallisuuden [18] sekä kohtuullisen kokemuksen pohjalta. Piirillä ei ole erityisen nopeita signaaleita, nopein on 12 MHz kellosignaali sekä samalla taaajuudella toimiva USB:n differentiaalinen dataväylä. Näin ollen minkäänlaista impedanssien sovittamista piirilevyn sisäisissä vedoissa tai ajoitukseen liittyvää johdinten pituuksien keskinäistä sovittamista ei tarvinnut miettiä. USB-dataväylän impedanssin sovituskkin hoituu asianomaisen mikropiirin sisäisillä vastuksilla.

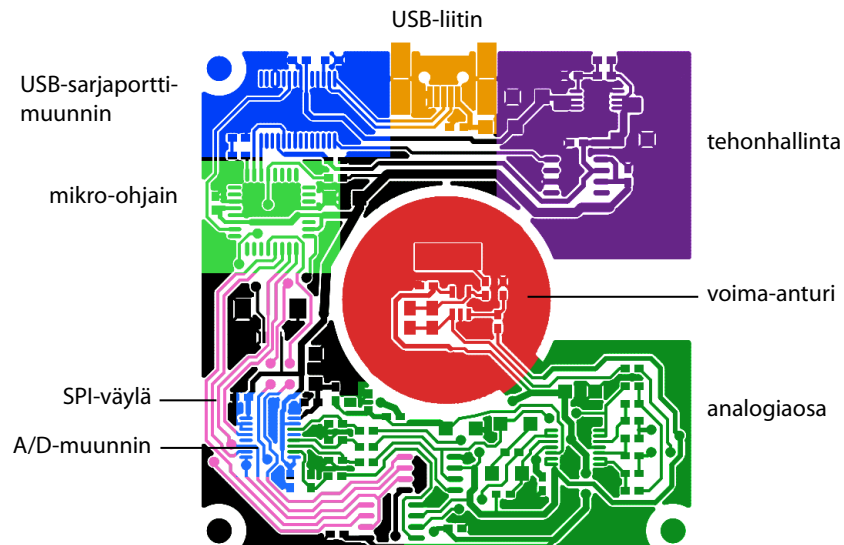
Suurin huomio kiinnitettiin siihen, miten eri signaalit ja niiden paluuvirrat tulisivat levyllä kulkemaan. Kaikkien signaalien kohdalle pyrittiin järjestämään mahdollisimman ehjä maa levyn alapuolelle. Maata ei kuitenkaan tehty täysin yhtenäiseksi, vaan siihen tehtiin aukkoja, joiden avulla pyrittiin pitämään digitaaliosien virrat poissa analogisten osien alta. Eri osien maa-alueita ei kuitenkaan täysin voinut erottaa, koska niiden välillä kulkee signaaleita, jotka tietenkin tarvitsevat paluuvirroilleen reitin. Maa onkin kuvan 22 mukainen. Keskellä oleva anturin maa on eristetty muusta piiristä ja on yhteydessä ainoastaan seuraavaan osaan eli antialiassuodattimeen. Samaa periaatetta noudatetaan koko levyllä, tosin säädettävien vahvistimien ja A/D-muuntimen osalta se oli hyvin vaikeaa. Siinäkin kuitenkin pyrittiin viimeiseen asti välttämään sitä, että digitaaliset ja analogiset vedot kulkisivat ristiin tai liian lähellä toisiaan, kuten nähdään kuvasta 23. Mittausten perusteella tässä onnistuttiinkin hyvin.



Kuva 21: Vasemmalla signaalien muodostamilla virtasilmukoilla on suuri yhteinen pinta-ala, jolloin niiden keskinäinen induktanssi on suuri. Oikealla kummalla kin on oma maavetonsa ja virtasilmukoiden pinta-alat pienet, jolloin signaalit eivät häiritse toisiaan.



Kuva 22: Piirilevyn alapuolella oleva maa on pyritty pitämään mahdollisimman ehjänä, huomioiden kuitenkin analogisten osien pitäminen puhtaana digitaaliosien paluuvirroista.



Kuva 23: Piirilevyn yläpuolella pyrittiin eri osien signaalijohtimet pitää omilla alueillaan.

4 Mittaukset

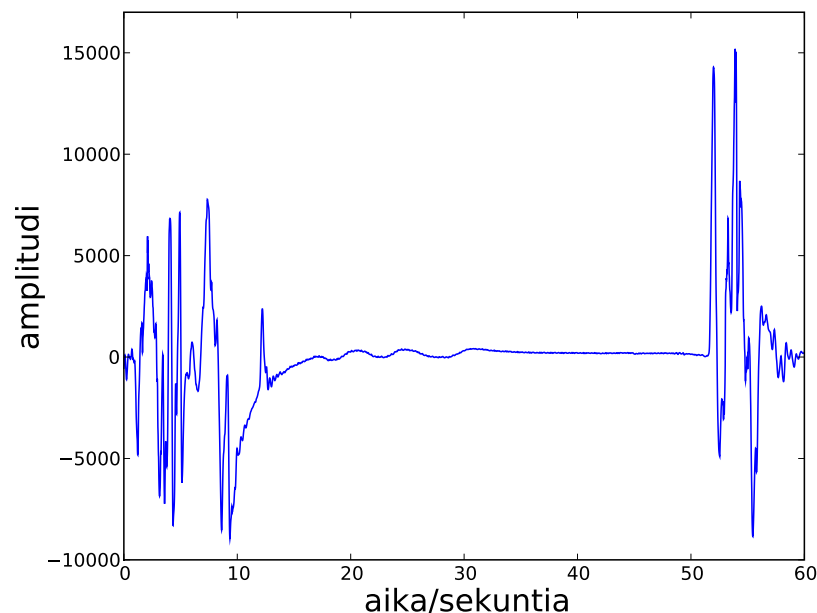
Mittaukset suoritettiin Finsor Oy:n testaus- ja kokoonpanotiloissa Otaniemessä. Käytetyt laitteet on lueteltu taulukossa 2.

Taulukko 2: Mittalaitteet

laite	tyyppi	tehtävä
oskilloskooppi tietokone	Tektronix MSO4034 Lenovo T61	aaltomuotojen mittaaminen Data Explorer -ohjelman käyttö
yleismittari painot, 6 kpl	Agilent 34411A metallikappaleita	jännite- ja virtamittaukset voimahäätteenä

4.1 Voima-anturin mittaus

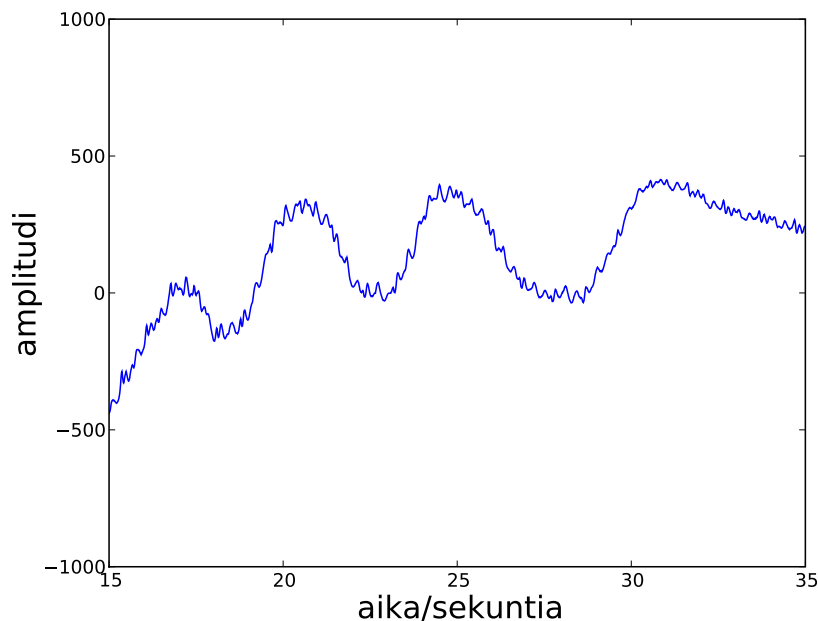
Laitteella mitattiin sängyssä makaavan henkilön elintoimintoja. Kuvassa 24 on esitetty koemittaus, jossa henkilö ensin tulee sänkyyn, hengittää hetken rauhallisesti, jonka jälkeen pidättää jonkin aikaa hengitystä ja tämän jälkeen nousee sängystä. Kuvassa 25 on suurennettuna pätkä, jossa näkyy hengitystä ja sykettä. Mittaus on tehty patjan alle sijoitetulla levyyn koteloitulla anturilla.



Kuva 24: Koemittauksesta nähdään, että sängyssä liikkuminen aiheuttaa huomattavan suuria voimia hengitykseen tai pelkkään sykkeeseen verrattuna.

Voima-anturin ominaisuuksien tarkka tutkiminen on haasteellista ilman erikoisia laitteita. Sängystä mitatut sykkeet eivät ole kovin toistettavia. Tarkempaan mittaamiseen on tehty erilaisia välineitä, joista yksi on impulssivasara. Se on muodoltaan kuin pieni vasara, ja sen päässä on anturi, jonka ominaisuudet tunnetaan tarkasti. Sillä voidaan mitata nimenomaan anturin dynaamista vastetta. Kun sillä lyödään anturia, saadaan vasaralta jänniteaalto, josta taas saadaan laskettua tarkka voima-heräte, kun tiedetään, montako millivoltia vasara antaa yhtä newtonia kohden. Sitä voidaan verrata tutkittavan anturin vasteeseen ja näin kalibroida se. Impulssivasaran olisi luultavasti saanut lainattua jostain TKK:n Konetekniikan osaston laboratoriosta, mutta sen ongelma on se, että sillä saadaan anturiin kohdistettua vain melko pieniä voimia ja toisaalta anturin muoto on sellainen, että siihen on vaikea osua aina samalla tavalla, etenkin jos yrittää lyödä voimakkaasti.

Mittauksissa päädyttiinkin käyttämään toisenlaista menetelmää, joka ei vaadi mitään erikoisia välineitä. Mittausta varten valmistettiin erilaisia painoja, joiden massat punnittiin tarkalla vaa'alla. Painot tehtiin sekalaisista metallikappaleista ja niihin kiinnitettiin lenkit, joista massat saatiin nykäistyä kohtisuoraan ylös anturin päältä. Näin anturiin saatiin kohdistettua tarkasti tunnettu ja toistettavissa oleva voimasignaali. Heräte vastaa askelta, jossa ennen nykäisyä anturiin vaikuttaa kappaleen massan ja maan vetovoiman kiihtyvyyden määräämä voima ja ajanhetken jälkeen voima on nolla. Anturin kansi kestää 200 kilogrammaa ilman pysyviä muodonmuutoksia, joten se ei käytännössä jousta suurimmallakaan käytetyllä painolla, joka oli hieman alle 3 kg. Koska myös nykäisy oli hyvin nopea, voidaan olettaa herätteen vastaavan mittaustarkkuuden rajoissa täydellistä askelfunktiota.



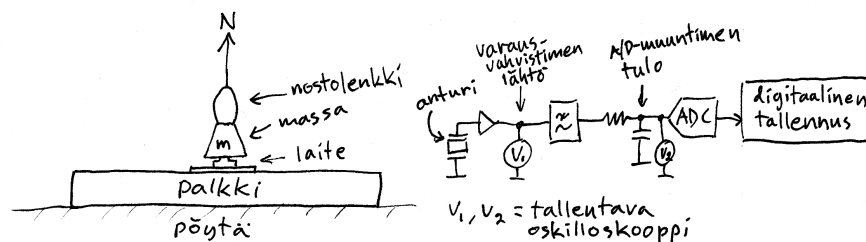
Kuva 25: Tässä koeasettelussa hengityksen voimakkuus suhteessa sykkeeseen oli huomattavan suuri. Suhde vaihtelee ja joissain tilanteissa hengitys ei juurikaan erotu.

Mittausjärjestely on esitetty kuvassa 26. Anturin piirilevy oli mittauksessa neljästä kulmastaan kiinnitettynä jäykkään alumiinipalkkiin ja lisäksi levyn alla anturin kohdalla oli kaksi kerrosta paperia, minkä ansiosta levy oli hiukan jännityksessä ja anturi pysyi varmasti paikoillaan mittauksen ajan. Palkki oli kiinnitettynä tukevaan pöytään ruuvipuristimilla ja kaikki mittalaitteet oli siirretty muille pöydille, jotta niiden tuulettimet eivät olisi aiheuttaneet mekaanisia värähtelyitä mittauskohteeseen. Oskilloskoopin mittapäiden kiinnittämistä varten levyllä juotettiin tarvittaviin kohtiin johtimet signaaleille ja molemmille oma maajohdin, jotka piirilevyllä kytkettiin mahdollisimman lähelle vastaavaa signaalijohdinta.

Mittaus tehtiin kuudella eri massalla ja kullakin massalla tehtiin kuusi toistoa. Käytettyjen massojen suuruudet ja mittaustulokset löytyvät taulukosta 3. Ilmoitetut jännitemuutokset ovat suoraan varausvahvistimen lähdöstä mitattuja ja ne on saatu oskilloskoopin näytöltä kuvan 27 osoittamalla tavalla mitta-apuviivoja hyödyntäen. Kaikki mittaukset tallennettiin oskilloskoopista USB-muistitikulle sekä Finsorin Data Explorer -ohjelmalla tietokoneelle. Oskilloskoopin mittaukset ovat 8-bittisiä ja ne tehtiin 1 kHz näytteenottotaajuudella. Myös A/D-muuntimen tulojännite mitattiin, mutta tuloksia ei käytetty mihinkään, sillä tietokone tallensi onnistuneesti saman asian paremmalla erottelukyvyllä. Data Explorer tallensi A/D-muuntimen tulokset 300 Hz taajuudella 16-bittisenä.

Taulukko 3: Jännitteen muutokset askelvastemittauksessa eri massoilla. Jännitteen muutokset on alaspäin ja myös massan muutos on negatiivinen joten selkeyden vuoksi kaikki luvut on esitetty positiivisina.

massa g	jännitteen muutos mV					
	2881	1370	1390	1360	1350	1350
1205	616	604	628	626	618	630
711	378	372	377	368	372	384
363	215	210	212	212	205	206
142	85,3	83,6	86	85,6	86,4	85,2
72	43,6	43,6	45,2	43,2	43,6	42,8

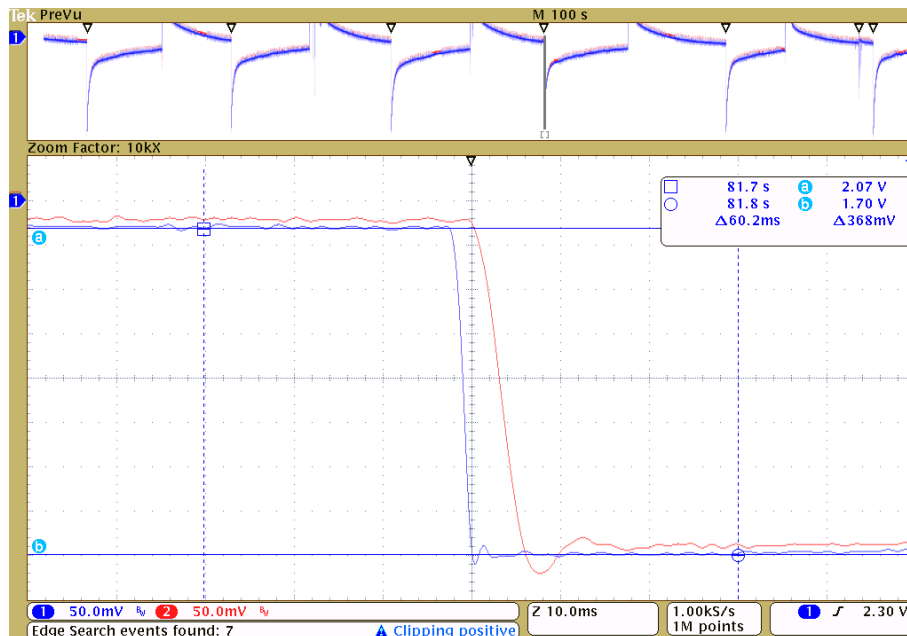


Kuva 26: Askelvasteiden mittaamisessa käytetty järjestely.

Varausvahvistimen lähdöstä mitatut vasteet ovat kuvissa 29, 30, 31, 32, 33 ja 34, ja A/D-muuntimen tulokset kuvissa 35, 30, 37, 38, 39 ja 40. Yksittäiset toistot on asetettu päällekkäin, jotta toistojen välistä hajontaa olisi helppo vertailla. X-suunnassa toistot on asetettu päällekkäin laskevan reunan perusteella ja Y-suunnassa juuri ennen nostoa ollut jännite on asetettu nollakohdaksi. Skaalaus on yksittäisessä sarjassa sama sekä jännitteen, että ajan suhteen. Eri sarjojen välillä jännite tietenkin muuttuu, sillä eri massoilla saatiin erisuuruisia jännitevasteita. Myös aikaskaala on saattaa hiukan vaihdella, vaikka se onkin kaikissa suunnilleen 60 sekuntia. Oskilloskoopin tuloksia on kuvien esittämistä varten alipäästösuodatettu, jotta kohinan alta saisi paremman kuvan eri toistojen välisestä hajonnasta. Suodatuksen vahvistus oli 1, joten y-akselilla olevat jännitearvot pitävät paikkansa edelleen.

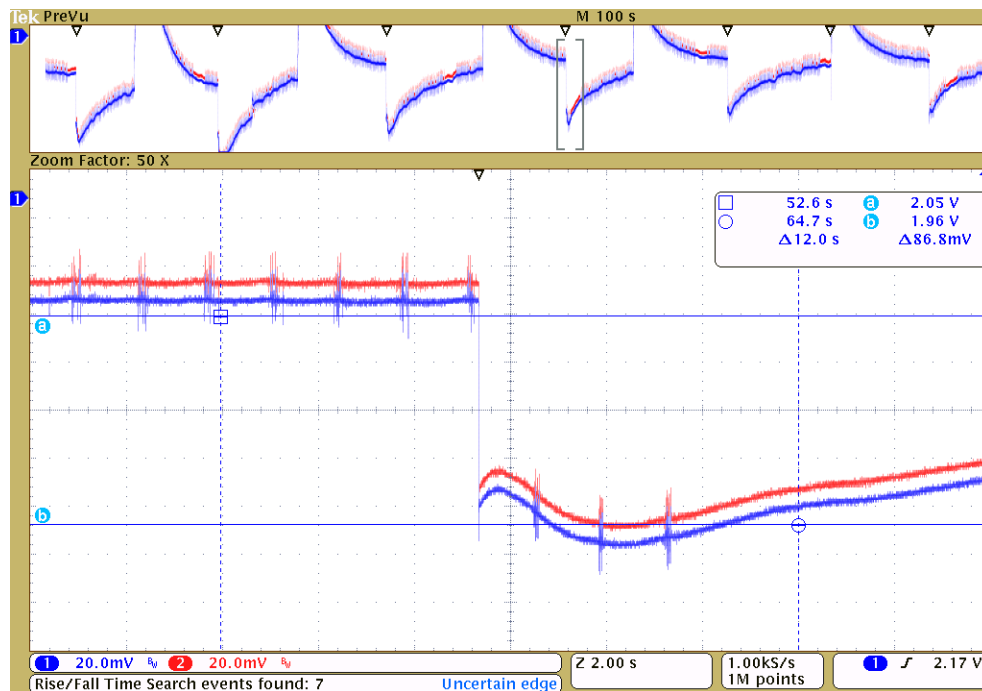
Oskilloskooppimittauksissa kohina oli huomattava, kuten nähdään kuvasta 28. Kuvassa suurennetussa kohdassa kohina on itseasiassa hetkellisesti keskimääräistä vähäisempi, oikea käsitys saadaan katsomalla kuvan ylälaidassa näkyvää koko mitausta. Syytä kohina suuruuteen tai erityisen voimakkaaseen noin 1,5 sekunnin välein toistuvaan purskeeseen ei lyhyellä tarkastelulla löytynyt. Sama häiriö on paljon vähäisempi tai olematon A/D-muuntimen tuloksissa, joten se saattaa liittyä oskilloskoopin huomattavasti suurempaan kaistanleveyteen. Häiriö ei kuitenkaan vaikuttanut sanottavasti tulosten analysointiin.

Oskilloskoopin tuloksia on kuvien esittämistä varten alipäästösuodatettu, jotta kohinan alta saisi paremman kuvan eri toistojen välisestä hajonnasta. Suodatuksen

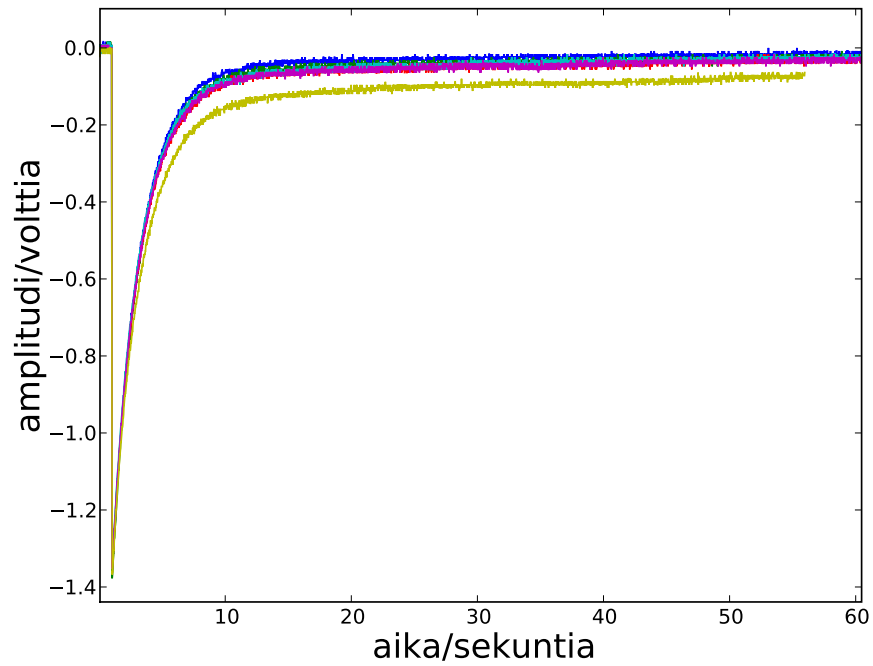


Kuva 27: Oskilloskoopin mitta-apuviivojen käyttö anturin herkkyyden mittaamiseksi askelvasteesta. Vaakasuorat viivat asetettiin oikeisiin kohtiin ja niiden jännite-ero luettiin ruudun oikean yläkulman taulukosta. Samaa menetelmää käytettiin osassa taajuusvastemittauksia.

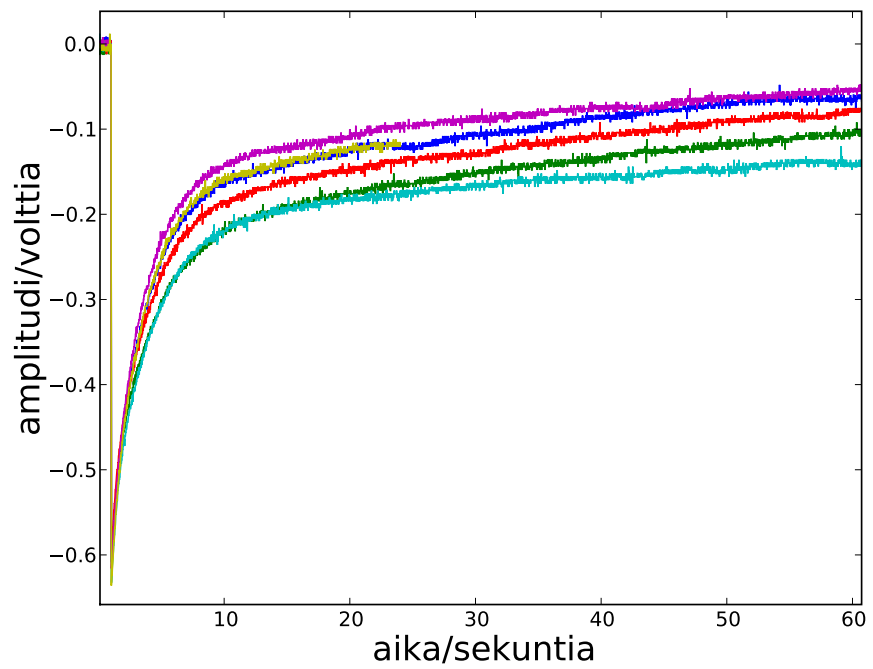
vahvistus oli 1, joten y-akselilla olevat jännitearvot pitävät paikkansa edelleen.



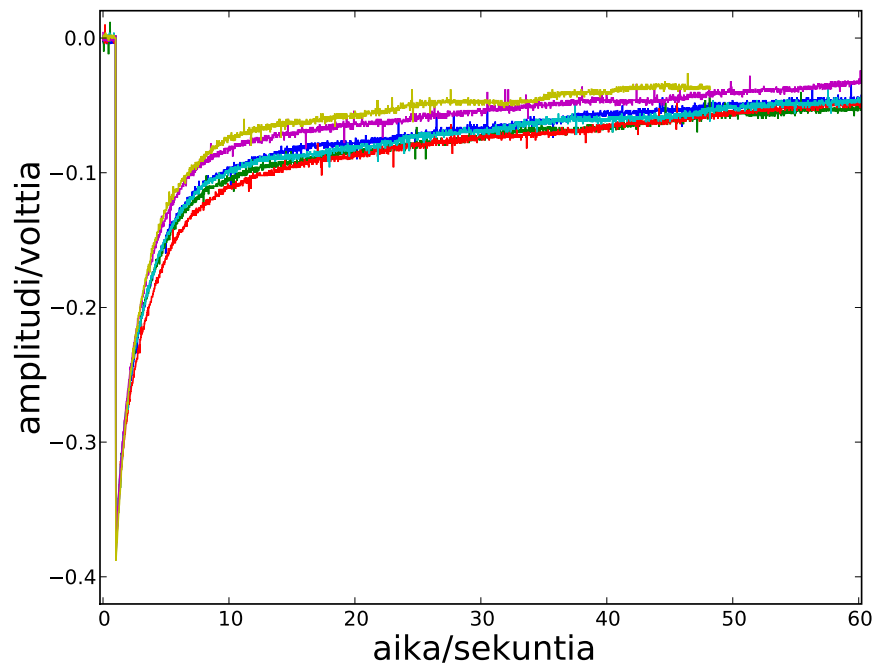
Kuva 28: Askelvasteen oskilloskooppimittauksissa oli melko paljon kohinaa, mikä näkyy erityisesti kuvan yläosassa.



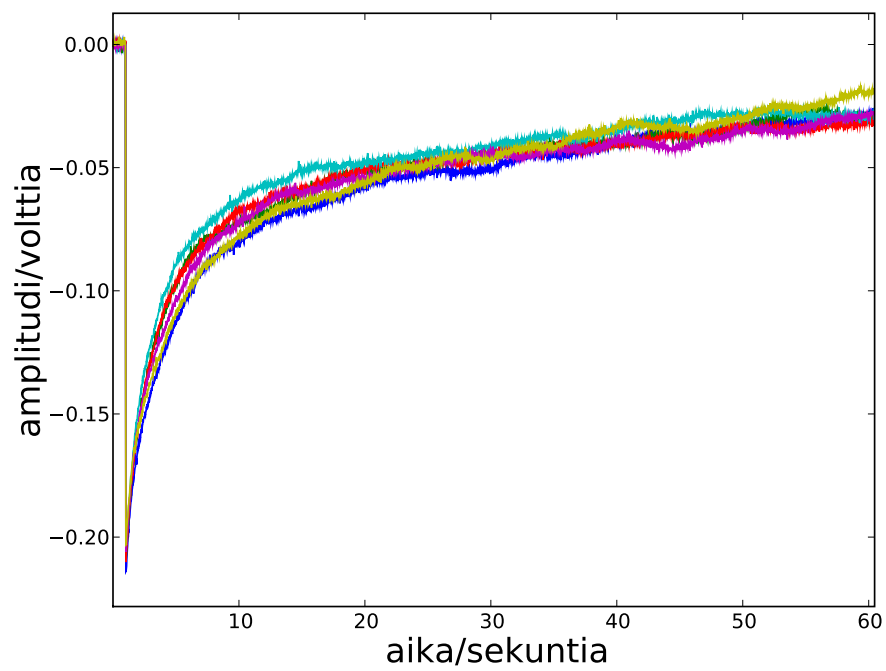
Kuva 29: Askelvaste mitattuna varausvahvistimen lähdestä, massa 2881 grammaa.



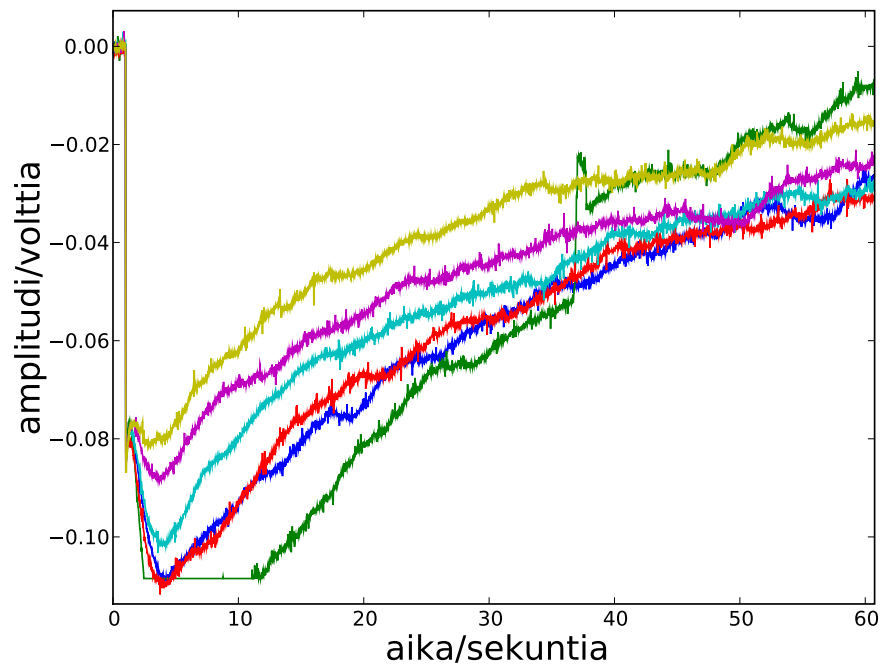
Kuva 30: Askelvaste mitattuna varausvahvistimen lähdestä, massa 1205 grammaa.



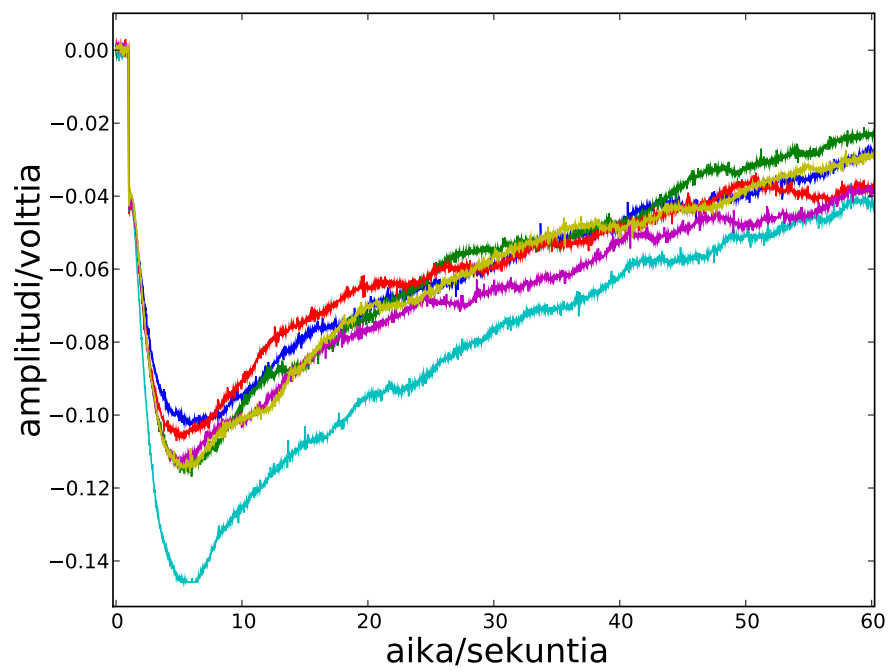
Kuva 31: Askelvaste mitattuna varausvahvistimen lähdestä, massa 711 grammaa.



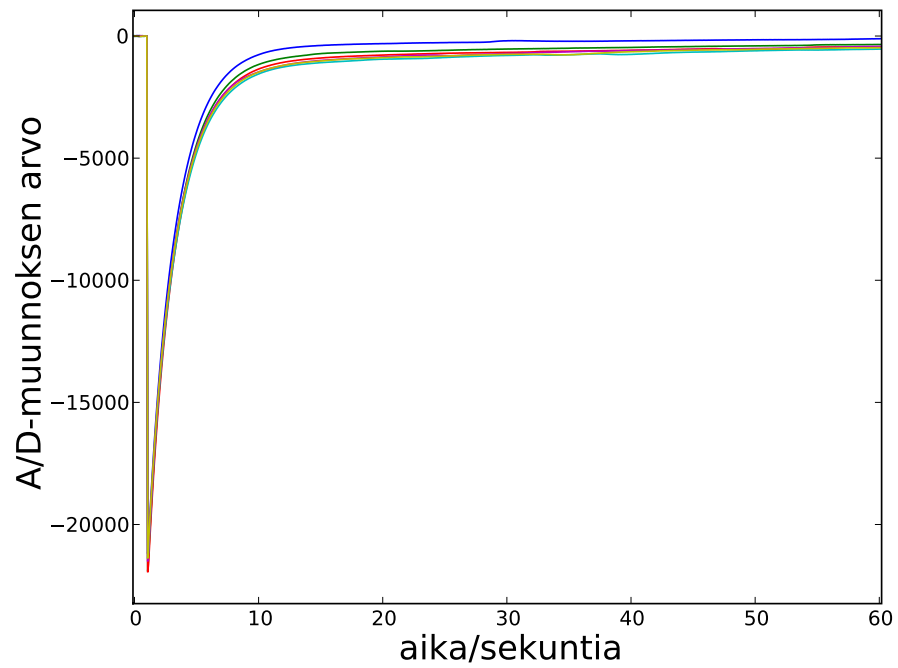
Kuva 32: Askelvaste mitattuna varausvahvistimen lähdestä, massa 363 grammaa.



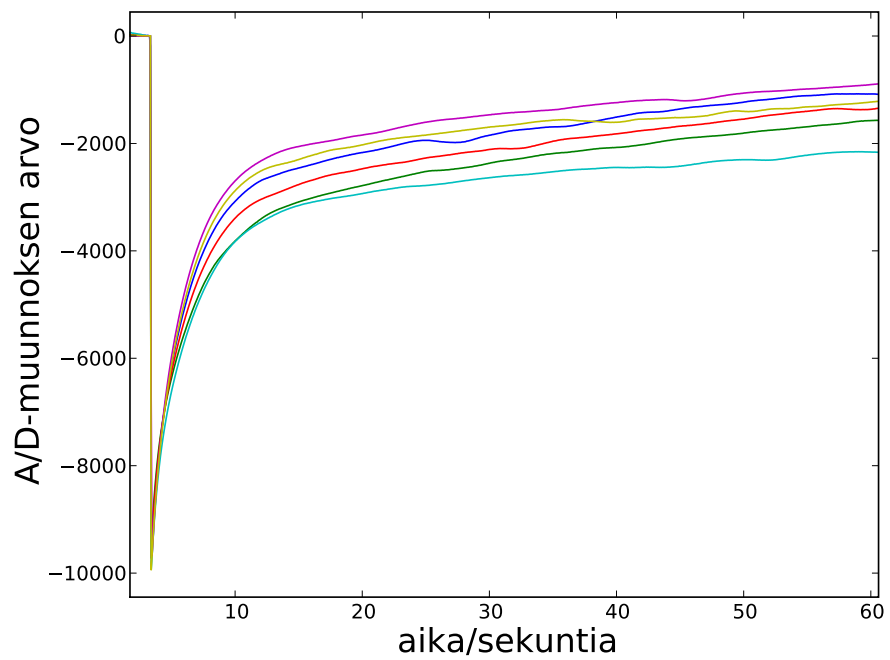
Kuva 33: Askelvaste mitattuna varausvahvistimen lähdestä, massa 142 grammaa.



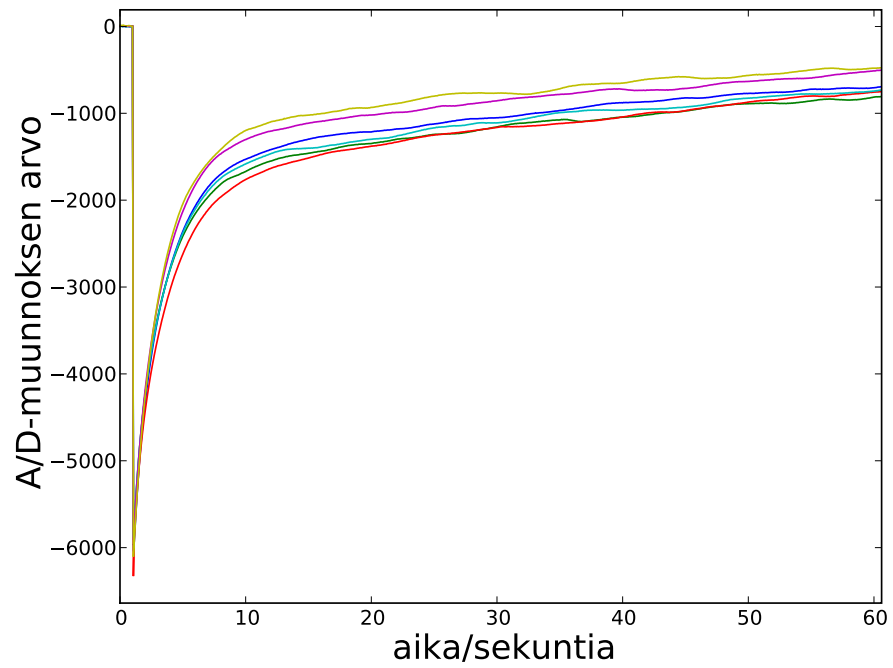
Kuva 34: Askelvaste mitattuna varausvahvistimen lähdestä, massa 72 grammaa.



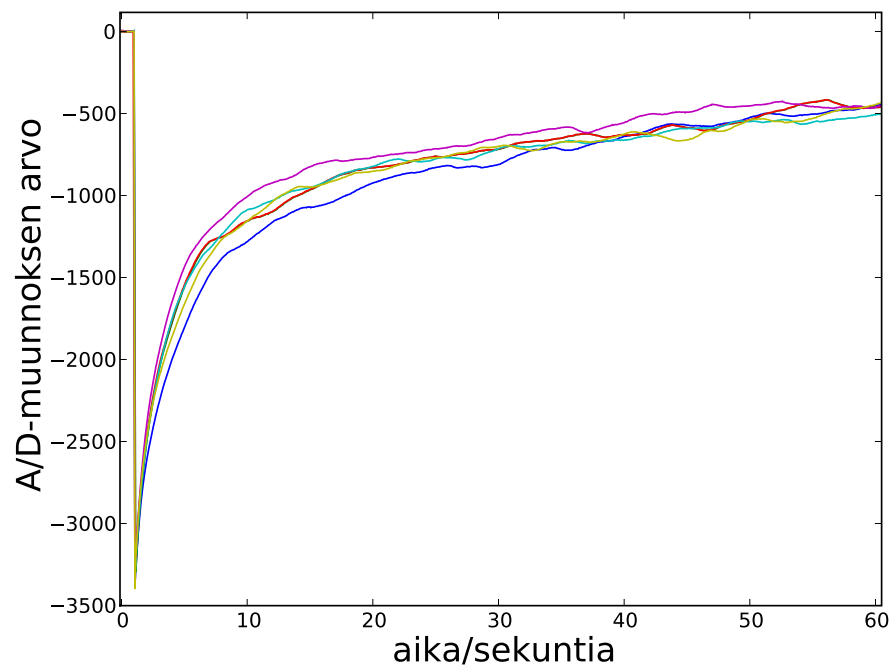
Kuva 35: Askelvaste A/D-muuntimelta, massa 2881 grammaa.



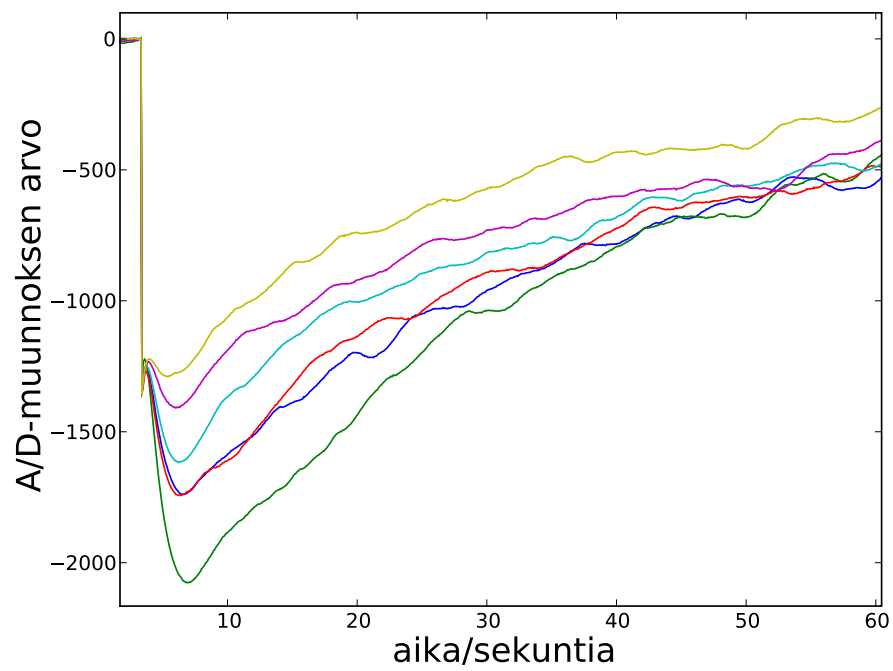
Kuva 36: Askelvaste A/D-muuntimelta, massa 1205 grammaa.



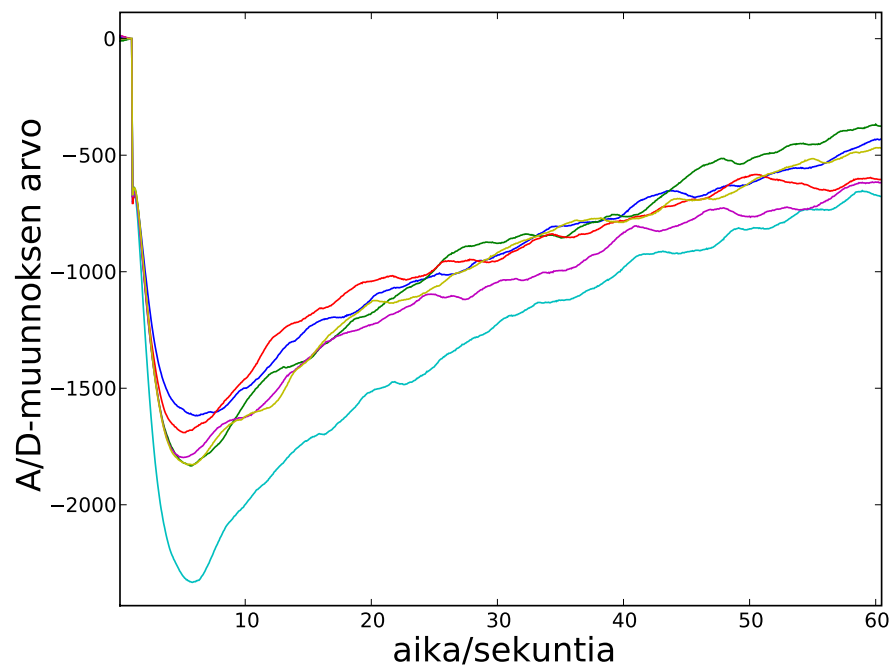
Kuva 37: Askelvaste A/D-muuntimelta, massa 711 grammaa.



Kuva 38: Askelvaste A/D-muuntimelta, massa 363 grammaa.



Kuva 39: Askelvaste A/D-muuntimelta, massa 142 grammaa.



Kuva 40: Askelvaste A/D-muuntimelta, massa 72 grammaa.

4.2 Antialiassuodatin ja sykekanavan ylipäästösuodatin

Taajuusvastemittaukset etenivät suoraviivaisesti. Piirille lisättiin oskilloskoopin kytkemistä varten johtimen pätkät, jotka juotettiin antialiassuodattimen ja sykekanavan ylipäästösuodattimen lähtöihin. Heräte luotiin signaaligeneraattorilla (taulukko 2) ja kytkettiin tavanomaisilla mittajohdoilla ja sopivilla jousikuormitteisilla mitta-koukuilla antialiassuodattimen tuloon juotettuihin johtimiin. Häiriöiden minimoimiseksi mittajohdot kierrettiin toistensa ympäri koko matkalta. Vasteet mitattiin oskilloskoopin omia johtoja ja automaattista mittaustoimintoa käyttäen, paitsi tähdellä merkityissä kohdissa, joissa käytettiin apuviivoja (ks. kuva 28) kohinan aiheuttaman virheen takia.

Sekä heräte että vaste mitattiin huipusta huippuun -arvona. Tehollisarvon mitaus olisi ollut kohinan suhteen vähemmän herkkä, mutta sitä ei voitu käyttää, koska mitattavalla ja mittalaitteilla oli yhteinen maan, mistä syystä myös mittajohtojen maat tuli kytkeä maahan. Näin ollen mittasignaaliin piti asettaa maan ja käyttöjännitteen puolivälissä oleva 2,048 voltin offset-jännite, joka vastaa piirin virtuaalimaan jännitettä, ja sen seurauksena jännitteen tehollisarvo oli vaihtojänniteosan suuruudesta riippumatta koko ajan hiukan yli kaksi voltia.

Jos käytettävissä olisi ollut differentiaaliset mittapäät, olisi mittapään maan voinut kytkeä tutkittavan laitteen virtuaalimaahan. Toinen vaihtoehto olisi ollut käyttää oskilloskoopin AC- eli vaihtovirtamittausta, joka suodattaa signaalista tasajännitteen pois, mutta sen noin 3 Hz ylipäästösuodatus olisi ollut aivan liian korkea, sillä mitattavan ylipäästösuotimen rajataajuus on 1 hertsin luokkaa ja pienin käytetty herätetaajuus 100 mHz.

Tulokset on esitetty taulukossa 4. Mittauksessa käytettiin pistetaajuuksia, jotka asetettiin käsin yksi kerrallaan, minkä jälkeen jännitteet kirjattiin ylös. Vaihe-erot laskettiin käyttäen apuna oskilloskoopin näytöllä olevaa ruudukkoa, joka on jaettu kymmeneen isoon ruutuun, joista kukin on edelleen jaettu 5 osaan. Tarkkuus oli suunnilleen neljäsosa pienemmästä jakovälistä, mikä tarkoittaa näissä mittauksissa 2...5 asteen tarkkuutta. Suodattimien -3 dB rajataajuudet selvitettiin erikseen etsimällä taajuus, jolla vahvistus oli mahdollisimman tarkasti 0,707. Ensimmäisessä sarakkeessa on herätteen taajuus, toisessa herätteen jännite, kolmannessa ja neljännessä alipäästösuodattimen lähtöjännite ja vaihe-ero herätteeseen nähden ja viimeiset kaksi ovat sykekanavan ylipäästösuodattimen jännite ja vaihe-ero. Sykekanavan signaali tulee antialiassuodattimen kautta, minkä takia on sekä yli- että alipäästösuodatettu.

Taulukko 4: Ali- ja ylipäästösuodattimien taajuus- ja vaihevastemittaukset

heräte		alipäästö		ylipäästö	
taajuus	jännite	jännite	vaihe-ero	jännite	vaihe-ero
Hz	V	V	°	V	°
100,0 m	3,61	3,62	0	40 m *	180
150,0 m	3,60	3,61	0	114 m *	160
300,0 m	3,60	3,62	0	447 m *	150
600,0 m	3,61	3,61	0	1,48	120
950,0 m	3,62	3,61	0	2,56 †	85
1,000	3,60	3,60	0	2,64	75
1,500	3,61	3,62	-2	3,24	50
3,000	3,61	3,60	-4	3,54	25
5,000	3,62	3,60	-7	3,60	10
10,00	3,61	3,60	-15	3,58	-5
20,00	3,62	3,56	-25	3,54	-20
40,00	3,62	3,45	-70	3,45	-65
80,00	3,62	3,24	-105	3,23	-105
116,0	3,61	2,56 †	-150	2,54	-150
120,0	3,61	2,41	-180	2,41	-180
180,0	3,61	651 m	-260	649 m	-260
250,0	3,60	172 m	-290	173 m	-290
500,0	3,61	11 m	-325	11 m	-325

* aaltomuoto vääristynyt (ks. luku 5.3)

† suotimen rajataajuus (-3 dB)

4.3 Kohinamittaukset

Kohina mitattiin Agilentin valmistamalla pöytämallisella yleismittarilla Agilent 34411A, josta oli valittuna todellisen tehollisarvon (true RMS) AC-jännitemittaus. Käytetyllä 100 mV alueella epävarmuus taajuusalueella on 10 Hz...20 kHz 0,02 % lukemasta plus 20 μV ja koko 3 Hz...300 kHz mittaускаistalla se on korkeintaan 1 % lukemasta plus 0,5 mV. 3 hertsin alarajataajuus estää tasajännitteen vaikutuksen mittaukseen ja pienentää niin sanotun 1/f-kohinan vaikutusta. Periaatteessa alle 3 hertsin taajuudella oleva kohina voisi haitata laitteen toimintaa, sillä hengitys on selvästi alle 1 Hz:n taajuudella, mutta A/D-muuntimen (jonka taajuuskaista menee nolnaan asti) signaalissa ei kuitenkaan ole merkittävästi kohinaa kyseisellä taajuusalueella.

Mittauksessa käytettiin pihtityyppistä mittapäätä, jotka asetettiin sopivan toisesta päästään maahan kytketyn kondensaattorin yli siten, että pihtien maapuoli oli kytketty maahan ja toinen puoli mitattavaan signaaliin. Tulos katsottiin mittarin ruudusta. Mittapään napaisuudella näytti selvästi olevan väliä, vaikka mittarin miinusnapa ei ole maassa, eikä mitattavan laitteenkaan maa ole yhteydessä sähköverkon suojamaahan. Tulokset on esitetty taulukossa 5 ja ne on saatu mittarin tilasto-ominaisuuksia hyödyntäen noin 500 mittauksen keskiarvona. Käyttöjännitteen kohina mitattiin monesta eri kohtaa, jotta nähtäisiin miten sen suuruus vaihtelee piirinlevyn eri osissa.

Voima-anturi kytkettiin mittauksen ajaksi irti katkaisemalla varausvahvistimelta antialiassuodattimelle menevä veto, koska haluttiin, että mittapäiden asettelu ei aiheuttaisi anturiin voimia ja sitä kautta häiriötä mittaukseen.

Taulukko 5: Kohinamittaukset eri kohdissa piiriä. Käyttö- ja referenssijännitteiden mittauksissa on ilmoitettu, minkä komponentin kohdalta jännite on mitattu.

mitattava kohde	kohinan tehollisjännite μV
varausvahvistimen lähtö	28
antialiassuodattimen lähtö	103
ylipäästösuodattimen lähtö	102
A/D-muuntimen tulo 0	126
A/D-muuntimen tulo 1	125
A/D-muuntimen tulo 2	120
V_{REF} , A/D-muuntimen tulo	123
V_{CC} , regulaattorin lähtö	102
V_{CC} , mikro-ohjain	114
V_{CC} , operaatiovahvistin	121
V_{BUS} , USB-liitin	2926

5 Tulosten analysointi

Mittaustuloksista mielenkiintoisimmat olivat voima-anturin askelvastemittaukset. Muut mittaukset, kuten suodatimen taajuusvasteen tai analogisten signaalikanavien pohjakohinoiden mittaukset kertoivat vain sen, mitä käyttökokemusten perusteella ajateltiin, eli että suodatukset toimivat riittävän oikein ja kohina on riittävän vähäistä. Kohinamittausten perusteella todettiin se, mikä nähdään laitteelta tulevasti signaalistakin, eli kohina on riittävän pieni muuntimen erottelukykyyntä verrattuna

5.1 Koemittaus sängyssä

Koemittaus sängyssä (kuvat 24 ja 25 osoitti, että laite toimii ja sillä saadaan syke, hengitys ja muu liikkuminen mitattua. Mittaus kertoo myös sen, että liikkumisen aiheuttamat voimat ovat moninkertaisia hengitykseen nähden. Yhden sykejakson huipusta huippuun -arvo on suurennetuissa pätkässä noin 50...75 ja hengityksen 300. Sen sijaan sängyssä liikkumisen aiheuttama huipusta huippuun -signaali on jopa 20000, eli suuruusluokaltaan satakertainen sykkeeseen ja hengitykseen nähden.

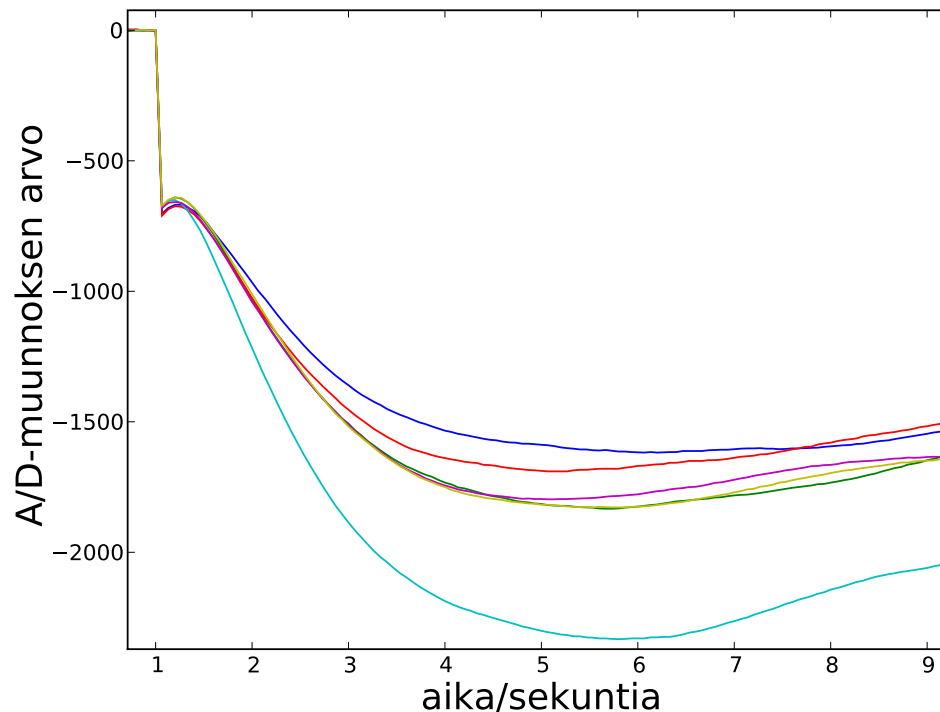
5.2 Askelvastemittaukset

142 gramman massalla oskilloskoopilla tehdyssä askelvastemittauksessa yhden toiston aikana signaali hiukan leikkaantui alalaidastaan, mikä näkyy kuvassa. Saman toiston loppupuolella oskilloskoopin säätöjä hieman muutettiin, jotta seuraavat toistot eivät leikkaantuisi, mikä näkyy äkillisenä jännitetason nousuna noin 40 sekunnin kohdalla. Epäonnistunutta mittauksista käytettiin kuitenkin herkkyyslaskemiseen. Muuten mittaukset onnistuivat hyvin.

Askelvastemittauksissa huomattiin, että välittömästi massan nostamisesta aiheutuva jännitteen muutos oli melko tarkasti toistettavissa (kuvat 41 ja ??), mikä kertoo siitä, että anturi on tässä suhteessa hyvä ja mittausmenetelmäkin itsessään on toistettava. Suurimmilla massoilla anturin vaste noudattaa hyvin tarkasti eksponenttikäyrää ja mittauksien hajonta on pieni (kuva 29), mutta keskisuurilla massoilla tulee vasteesta esiin selkeästi lineaarisesti vaimeneva osa (kuva 31, 20...60 sekunnin aikavälillä) ja kaikkein pienimmillä massoilla (kuva 34) taajuusvaste muuttuu selkeästi siten, että matalien taajuuksien herkkyys suhteessa korkeampiin kasvaa, mikä näkyy siinä, että vasteen huippu on 72 ja 142 gramman massoilla vasta 5 sekunnin pätkäillä, kun se neljässä muussa on välittömästi massan nostamisen jälkeen. 72 grammalla mitattuna herkkyys satojen millihertsien taajuuksilla noin 2,5-kertainen verrattuna kymmenien hertsien taajuuksiin.

Lineaarisen vaimenemisen osuus tulee melko selvästi esiin myös kuvassa 30, jossa noin 10 sekunnin kohdalla eksponentiaalinen vaimeneminen näyttää loppuvan ja jatkuvan lineaarisena. Jännitetaso, jossa eksponentiaalinen osa tuntuu häviävän, vaihtelee myös jokaisen toiston välillä. Mutta kun tarkastellaan koko 1205 gramman massalla tehtyä mittauksisarjaa (kuva 43) huomataan, että neljässä toistossa anturi palautuu samalla tavalla kohti poikkiviivalla merkittyä 2,048 voltin jännitettä, joka

on piirin virtuaalimaan nimellinen jännite. Yhdessä toistossa palautuminen menee selvästi tämän jännitteen yli, kun taas viimeisessä mittaus katkeaa kesken oskilloskoopin muistin tullessa täyteen. Kuvassa, jossa toistot ovat päällekkäin, johtuu ero siis ainakin osittain siitä, että mittauksen alkaessa jännite on ollut eri tasolla ja askeleen jälkeen signaali palautuu nolaa kohden.



Kuva 41: Askelvasteen laskeva reuna 72 gramman massalla on hyvin samanlainen eri toistoissa.

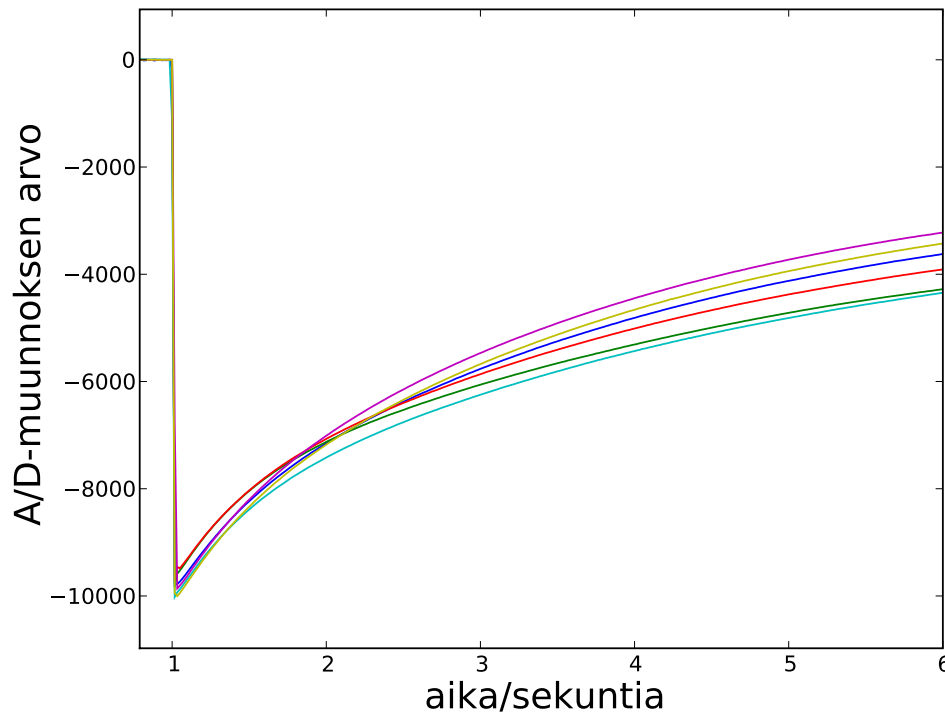
Syytä epälineaariseen käytökseen ei voi tehtyjen mittausten perusteella sanoa, vaan se vaatisi lisää tutkimusta. On kuitenkin tunnettua (viitteitä), että pietsosähköiseen ilmiöön perustuvissa antureissa yleisesti virhettä voivat aiheuttaa ainakin mekaanisen muodonmuutoksen epälineaarisuus suhteessa voimaan sekä muodonmuutokseen liittyvä hystereesi, pietsosähköisen ilmiön epälineaarisuus ja hystereesi, sekä varausvahvistimen komponenttien ominaisuudet, erityisesti vahvistimen vuotovirta ja keraamisten kondensaattoreiden dielektrisen materiaalin luontainen epälineaarisuus jännitteen, taajuuden ja lämpötilan suhteen. Mainittujen tekijöiden merkitys riippuu tilanteesta ja asian selvittäminen vaatisi sen verran tutkimusta ja perehtymistä, että siihen ei tämän työn puitteissa juurikaan käytetty aikaa, koska anturi kuitenkin suoriutuu hyvin annetusta tehtävästään, eli ihmisen elintoimintojen seuraamisesta, varsin hyvin.

Taulukossa 6 on esitetty askelvastemittauksista oskilloskoopin näytöltä mitatuista jännitteistä lasketut herkkyudet. Verrattuna edellä käsiteltyyn askelvasteen muodon selkeään muuttumiseen massan mukaan muuttuu herkkyys yllättävän vähän,

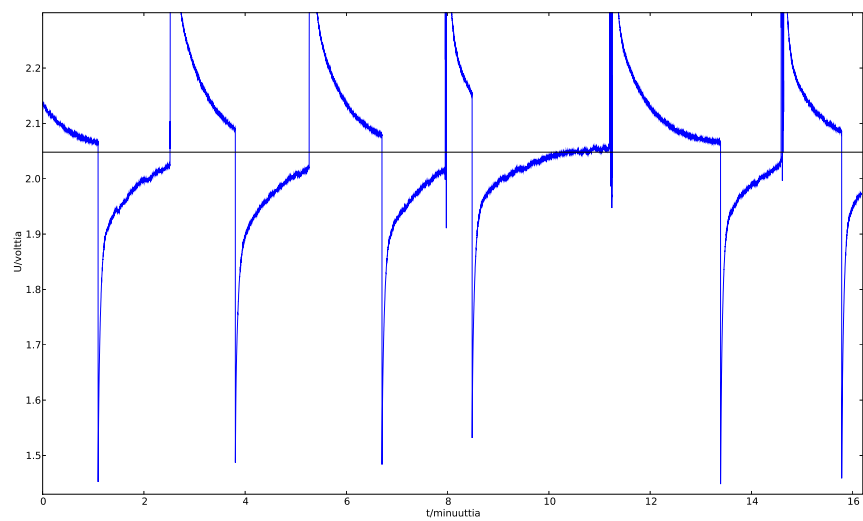
minkä lisäksi muutos on siinä mielessä suoraviivainen, että eri massoilla laskettujen herkkyysien keskiarvo koko ajan kasvaa massan pienentyessä. Kahdella pienimmällä massalla herkkyyksissä on niin vähän eroa, että kaikkien toistojen kohdalla tämä sääntö ei päde, ja suurin 1205 grammalla mitattu arvo on yhtä suuri kuin pienin 711 grammalla mitattu. Herkkyuden riippuvuus massasta ei myöskään näyttäisi noudattavan mitään yksinkertaista funktiota, ja voikin olla, että jos mitattaisiin nyt tehtyjen mittausten väliin sijoittuvilla massoilla, voisi herkkyys välillä kasvaa massan kasvaessa. Tämän selvittäminen vaatisi kuitenkin lisää mittauksia.

Taulukko 6: Anturin herkkyys eri massoilla mitattuna

voima N	herkkyys mV/N						keskiarvo mV/N
28,26	48,5	49,2	48,1	47,8	47,8	48,5	48,3
11,82	52,1	51,1	53,1	53,0	52,3	53,3	52,48
6,97	54,2	53,3	54,1	52,8	53,3	55,1	53,79
3,56	60,4	59,0	59,5	59,5	57,6	57,8	58,97
1,39	61,2	60,0	61,7	61,4	62,0	61,2	61,27
0,71	61,7	61,7	64,0	61,2	61,7	60,6	61,82



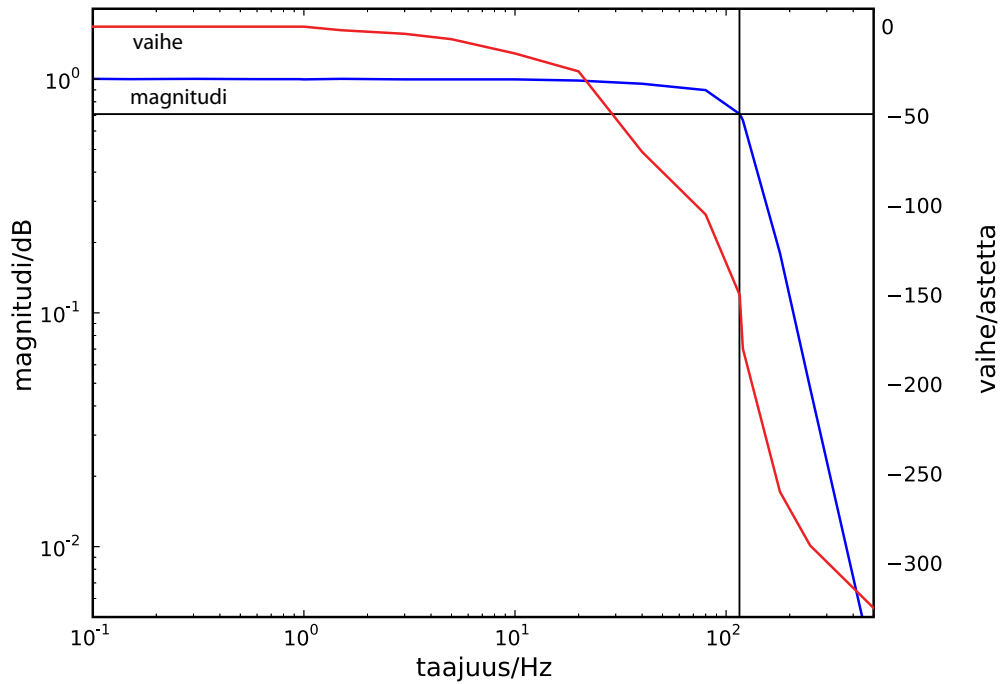
Kuva 42: Askelvasteen laskeva reuna 1205 gramman massalla on hyvin samanlainen eri toistoissa.



Kuva 43: 1205 gramman massalla tehty kokonainen mittaussarja varausvahvistimen lähdestä mitattuna.

5.3 Ali- ja ylipäästösuodattimet

Ali- ja ylipäästösuodinten mittaustuloksista piirretyt magnitudi- ja vaihevasteet on esitetty kuvissa 44 ja 45. Suotimet vastaavat riittävällä tarkkuudella suunniteltua. Sykekanavan ylipäästön rajataajuus on 0,950 hertsiä ja jyrkkyys 12 dB/oktaavi ja alipäästön rajataajuus 116 hertsiä ja jyrkkyys 24 dB/oktaavi. Ylipäästösuodattimen mittauksissa oli kaikkein pienimmillä taajuuksilla ks. taulukko 4) voimakas 2. harmoninen särökomponentti, jonka syy ei mittauksissa selvinnyt. Siltä osin kahden ensimmäisen mittauksen arvot ovat hiukan epäluotettavia.



Kuva 44: Alipäästösuodattimen magnitudi- ja vaihevasteet. -3 dB rajataajuus on 116 ja jyrkkyys 24 dB/oktaavi.

5.4 Kohinamittaukset

Tietokoneohjelmalla tallennetusta signaalista laskettu kohinan tehollisarvo on noin 0,75 vähiten merkittävää bittiä (LSB), kun anturi on kytkettynä, ja 0,73 LSB, kun antialiassuodattimen tulo on kytketty virtuaalimaahan, joten ilmeisesti anturiin ei kohdistu merkittävästi mekaanisia häiriöitä. Ero menee jo mittauserävarmuudenkin piikkiin ja lisäksi itse anturikin tuottaa jonkin verran kohinaa. Signaali-kohinasuhde SNR voidaan laskea yhtälöstä [12]

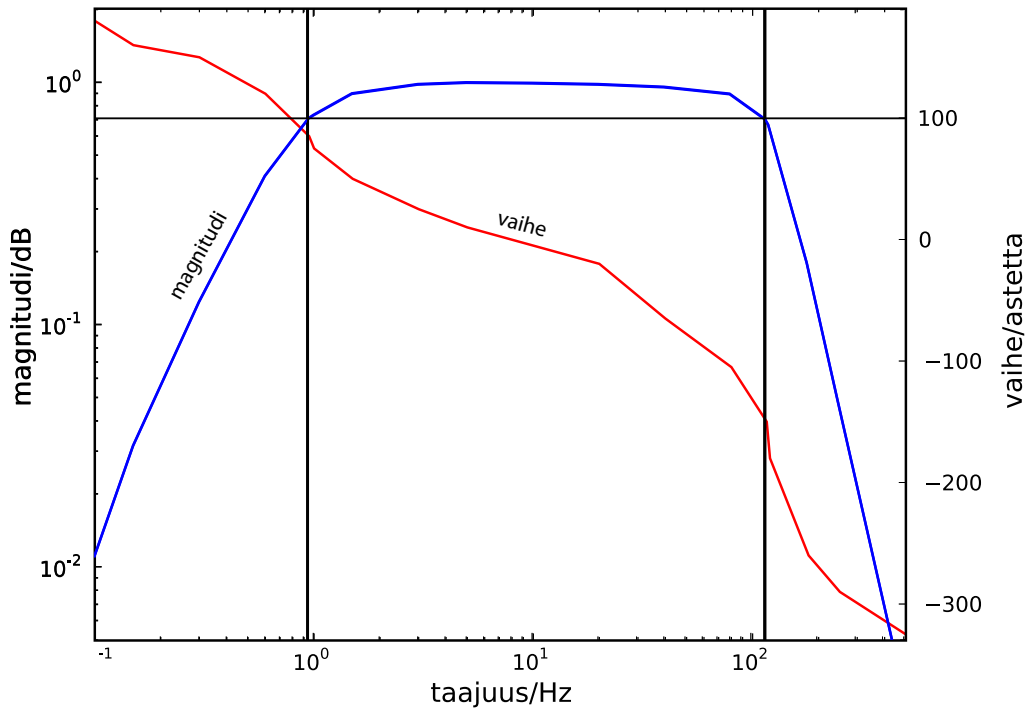
$$\text{SNR} = 20 \log \left(\frac{S_{in(RMS)}}{S_{N(RMS)}} \right) = \frac{0,5 \cdot 2^{16} \sqrt{2}}{0,75}, = 90 \text{ dB} \quad (4)$$

missä $S_{in(RMS)}$ on suurimman mahdollisen sinimuotoisen tulosignaalin tehollisarvo ja $S_{N(RMS)}$ on pohjakohinan tehollisarvo. SINAD on signaalin suhde kohinaan plus säröön, mutta koska voima-anturiin on vaikea syöttää lähellekään sinimuotoista signaalia, joudutaan tyytymään arvioon, että särö on näin pienillä taajuuksilla pieni verrattuna kohinaan, ja laskemaan tehollisten bittien määrä [2]

$$\text{ENOB} = \frac{\text{SINAD} - 1,76}{6,02} = 14,7, \quad (5)$$

eli jonkin verran nimellistä 16 bitin tarkkuutta vähemmän.

Mitatut kohinajännitteet ovat mittariin ilmoitettuun tarkkuuteen verrattuna pieniä, mutta toisaalta kun mittapäiden oikosulkeminen keskenään tuotti 0 nanovoltin jännitteen ja tulokset olivat hyvinkin toistettavia, voidaan mittauksista kuitenkin arvioida laitteen yleistä kohinaisuutta. Muuntimen tulon jännitealue on 4,096 voltia ja bittimäärä 16, joten yksi LSB vastaa tasan 62,5 mikrovoltin jännitettä. Tehollisarvoltaan 0,73 LSB:n kohina on siis jännitteenä noin $46 \mu\text{V}$. Saatu tulos on noin kolmasosa yleismittarilla mitatusta $120 \mu\text{V}$ jännitteestä. Ero johtuu ainakin siitä, että yleismittarin mittaускаista on noin 1000-kertainen, mikä tarkoittaa tehollisarvoltaan 31,6-kertaista kohinaa, jos kohina on tasaisesti jakautunutta. Näin ei kuitenkaan tässä tapauksessa ole, sillä A/D-muuntimeen syötetty jännite tulee 4. asteen Butterworth-alipäästösuotimelta, jonka -3 dB kaista on mitattuna 116



Kuva 45: Ylipäästösuodattimen magnitudi- ja vaihevasteet. -3 dB rajataajuudet ovat 0,950 ja 116 hertsiä ja jyrkkyydet vastaavasti 12 ja 24 dB/oktaavi.

Hz ja kohinan tehollinen kaistanleveys siihen nähden 1,03-kertainen, eli noin 119 Hz [?]. Tältä osin mittareiden kaistanleveyksien erolla ei pitäisi olla merkitystä, sillä molemmat ovat suotimen kaistaa selvästi suurempia. Alipäästösuodatuksen jälkeen signaaliin tulee kuitenkin kohinaa muista lähteistä, kuten piirillä olevista digitaalisista osista. Tämä kohina ei juurikaan näy A/D-muuntimen tuloksissa sen matalan näytteenottotaajuuden takia, mutta yleismittarin tuloksissa se näkyy.

Osa kohinasta saattaa johtua myös A/D-muuntimen näytteistyskondensaattorin latautumisesta näytteen ottamisen aikana. Asiaa käsiteltiin luvussa 3.3.5 ja siinä todettiin, että kondensaattorin latautuminen aiheuttaa tulojännitteeseen heilahduksen, joka kuitenkin oikein suunnitellussa piirissä vaimenee näytteenottovaiheen aikana, mistä syystä siitä johtuva kohina ei näy muunnostuloksissa. Yleismittarissa se kuitenkin näkyy. Asiaa on vaikea todeta, sillä se vaatisi mittauksia oskilloskoopilla, jotta voitaisiin aaltomuodosta havaita eri ilmiöistä johtuvia kohinan osia. Tämä vaatisi kuitenkin erityisen mittapään, jossa on sisäänrakennettu pienikapazitanssinen ja laajakaistainen vahvistin, sillä normaaleilla mittapäillä ja -johdoilla oskilloskoopin oma kohina on muutaman millivoltin luokkaa, kun taas tutkittava ilmiö olisi kenties paljon pienempi. Lisäksi tavanomaisen mittajohdon kapasitanssi on niin suuri, että se vaikuttaa mittaukseen huomattavasti.

Käyttöjännitteen kohina oli piirilevyn eri kohdissa hyvin saman suuruinen ja kohtuullisen pieni. Pienin se oli ymmärrettävästi regulaattorin lähdössä, jossa sen tehollisarvo oli $102 \mu\text{V}$ ja suurin suodattimien operaatiovahvistimen kohdalla, joka onkin kauimpana regulaattorista. Regulaattori on selkeästi hyödyllinen, sillä suoraan USB-liittimen V_{BUS} -linjasta mitattuna kohinajännite on $2,9 \text{ mV}$, eli lähes 30-kertainen, mikä luultavasti olisi jo vaikuttanut heikentävästi A/D-muunnoksiinkin.

6 Yhteenveto ja pohdinnat

6.1 Yhteenveto

Tavoitteena oli rakentaa laite, jolla voidaan mitata henkilön elintoimintoja tämän ollessa vuoteessa tai tuolissa. Tässä onnistuttiin hyvin. Laitteen kohina pieni, joten heikkojenkin signaalien mittaaminen onnistuu. Signaalikohinasuhde on 90 dB , mikä vastaa $14,7$ bittiä ja dynamiikkaa voidaan tarvittaessa lisätä käyttämällä kahta A/D-muunninkanavaa, joista toiseen signaali menee vahvistettuna ja toiseen ilman vahvistusta. Testikäytössä on tosin todettu, että 16 bitin muuntimen tarjoama dynamiikka on jo yksinäänkin yleensä riittävä. Itse voima-anturi havaittiin yllättävän epälineaariseksi, mutta tähän käyttöön kuitenkin riittävän hyväksi.

Laitteen mahdollisia käyttökohteita ovat esimerkiksi potilaiden valvonta sairaaloissa tai hoitokodeissa, erityisesti tapauksissa, joissa henkilön tilaa ei normaalisti seurata jatkuvasti, vaan ainoastaan hoitajan käydessä. Nyt toteutetulla laitteella seuranta on mahdollista ilman mitään henkilöön kiinnitettäviä antureita tai johtoja, mikä mahdollistaa jatkuvan mittauksen huomaamattomasti. Toinen käyttökohde voisi olla unitutkimus tai unenlaadun mittaaminen, jossa laite olisi kotona käyttäjän sängyssä ja analyysin avulla signaalista etsittäisiin tietoa univaiheista, unen rauhallisuudesta, palautumisesta ja muusta unenlaatuun liittyvästä. Tietoja voisi seurata

esimerkiksi tietokoneelle tehdyn käyttöliittymän avulla.

6.2 Pohdinnat

Voima-anturin perusajatus toimii hyvin, mutta kotelointi ei vielä ole täysin tyydyttävä, vaan sitä täytyy kehittää, jotta kaikki erilaisten ihmisten, asentojen ja vuoteiden yhdistelmät toimisivat luotettavasti. Yksi erityisesti esiin tullut ongelmatilanne on pienikokoinen ihminen, joka saattaa olla sängyssä hyvinkin eri kohdissa, jolloin patjan alle sijoitettava anturilaatta ei aina osu riittävästi henkilön alle. Parempi vaihtoehto näyttäisikin olevan sängyn jalan tai sairaalavuoteessa pyörän alle sijoitettava anturi.

Erillinen kanava, josta hengitys on suodatettu pois ei käyttökokemusten perusteella ole tarpeellinen. Tarvittaessa suodatus on helpointa suorittaa digitaalisesti analyysivaiheessa. Myös erillinen 16-bittinen A/D-muunnin voidaan tutkimusten perusteella korvata mikro-ohjaimen omalla 10-bittisellä muuntimella siten, että signaalia näytteistetään sekä vahvistettuna, että vahvistamattomana. Näin saadaan heikot signaalit riittävällä erottelukyvylä vahvistetusta kanavasta ja voimakkaat signaalit leikkaantumattomana vahvistamattomasta kanavasta.

Voima-anturia ei aiemmin oltu kovin tarkasti tutkittu, sillä sydämen aiheuttamat voimat sängystä tai tuolista mitattuna ovat riippuvaisia niin monista asioista, että tarkka tieto anturin voimavasteen amplitudi- ja taajuusepälinearisuuksista yleensä ei ole merkityksellistä, eikä sykkeen muodon muuttuminen oleellisesti vaikeuta sykkeen tunnistamista, vaan sykkeen tunnistamisen vaikeudet liittyvät enemmän itse tunnistusalgoritmin kehittämiseen. Anturin ominaisuuksia tulee kuitenkin tutkia tarkemmin, jotta epäideaalisuuksien vaikutusta kussakin käyttötilanteessa voidaan arvioida paremmin ja mahdollisesti korjata esimerkiksi analyysiohjelmassa.

Myös anturin palautumista hyvin suurista kuormituksista pitäisi parantaa. Ylioijautumisesta tapahtuu usein esimerkiksi henkilön tullessa sänkyyn tai poistuessa siitä. Anturin ylioijautuminen ei normaalitilanteissa haittaa, mutta se vaikeuttaa henkilön vuoteessa olemisen luotettavaa tunnistusta. Varausvahvistimeen on kuitenkin vaikea laittaa jännitettä rajoittavia osia, kuten diodeja tai zenerdiodeja, sillä ainakin kokeilujen perusteella niiden vuotovirrat vaikuttavat itse anturin toimintaan myös jännitteen ollessa normaalilla toiminta-alueella.

6.3 Jatkotutkimus

Mittausten pohjalta herännyt kysymys pietsoanturin epälinearisuuksista on mielenkiintoinen. Se vaatisi huomattavasti huolellisempaa jatkotutkimusta, vaikkakaan epälinearisuus itsessään ei juuri tässä asiayhteydessä ole ainakaan tämän hetkisen käsityksen mukaan kovin merkityksellinen. Anturin ominaisuuksien tarkempi tunteminen saattaa kuitenkin olla merkityksellistä joissain muissa käyttökohteissa.

Seuraavaksi on tarkoituksena tutkia anturia sellaisessa koejärjestelyssä, jossa sen päälle on mahdollista asettaa esimerkiksi 10...50 kilon staattinen kuorma, jonka päälle voidaan edelleen asettaa pienempi kuorma nyt tehtyjen askelvastemittausten tapaan. Tarkoituksena on myös tutkia sähköisen voimaherätelaitteen valmistamis-

ta, esimerkiksi hyödyntämällä isokokoisen kaiuttimen magneetti-puhekelasysteemiä korvaamalla kaiuttimen kalvo sopivalla kevyellä ja jäykällä (puhekelaan kiinnitettävällä, samansuuntaisella ja samankeskeisellä) varrella, jolla anturiin voidaan kohdistaa halutunlaisia tarkasti tunnettuja ja toistettavia voimaherätteitä. Näin voidaan ensinnäkin helpommin verrata eri yksilöitä ja erityyppisiä antureita keskenään ja toisaalta esimerkiksi tietystä paikasta aiemmin tallennettuja voimasignaaleita voidaan syöttää eri antureille ilman tarvetta tehdä mittaus aina tietyssä paikassa ja tilanteessa.

Viitteet

- [1] Aliasing. Wikipedia. Viitattu 30.4.2010. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Aliasing>.
- [2] Data conversion calculator. Viitattu 30.4.2010. Saatavissa: http://www.maxim-ic.com/tools/calculators/index.cfm/calc_id/maxim_sinad.
- [3] Texas Instruments FilterPro v2.0. <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/filterpro.html>.
- [4] Understanding integrating ADCs. Viitattu 30.4.2010. Saatavissa: <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/1041>.
- [5] Universal serial bus specification revision 2.0.
- [6] A. Akhbardeh, S. Junnila, M. Koivuluoma, T. Koivistoinen, ja A. Varri. The heart disease diagnosing system based on force sensitive chair's measurement, biorthogonal wavelets and neural networks. Kirjassa *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005*, ss. 676 – 681, july 2005.
- [7] Rick Downs. Designing SAR ADC drive circuitry, part I: A detailed look at SAR ADC operation. Viitattu 30.4.2010. Saatavissa: www.analogzone.com/acqt0221.pdf.
- [8] Rick Downs. Designing SAR ADC drive circuitry, part II: Input behavior of SAR ADCs. Viitattu 30.4.2010. Saatavissa: www.analogzone.com/acqt1003.pdf.
- [9] Ye fei Wu ja Wei qiu Chen. Geometrical non-linear finite element analysis of piezoelectric materials based on abaqus. Kirjassa *Joint Conference of the 2009 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA) and 2009 China Symposium on Frequency Control Technology*, ss. 8 –8, dec. 2009.
- [10] Harman Grewal. Oversampling the ADC12 for higher resolution. Viitattu 30.4.2010. Saatavissa: <http://www.ti.com/litv/pdf/slaa323>.

- [11] Y. Hu, J. L. Solere, D. Lachartre, ja R. Tutchetta. Design and performance of a low-noise, low-power consumption CMOS charge amplifier for capacitive detectors. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 45(1):119 – 123, feb 1998.
- [12] D. Johns ja K. Martin. *Analog Integrated Circuit Design*. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [13] Mallik Kandala, Ramgopal Sekar, Chenglong Zhang, ja Haibo Wang. A low power charge-redistribution ADC with reduced capacitor array. Kirjassa *11th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED), 2010*, ss. 44 –48, march 2010.
- [14] Walt Kester. ADC architectures III: Sigma-delta ADC basics. Viitattu 30.4.2010. Saatavissa: www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-022.pdf.
- [15] Kaisu Lankinen. Ballistokardiografinen mittausjärjestelmä vuodemonitorointiin. DI-työ, Teknillinen korkeakoulu, 2009.
- [16] H.P. Le, A. Zayegh, ja J. Singh. A 12-bit high performance low cost pipeline ADC. Kirjassa *ICECS 2003. Proceedings of the 2003 10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2003.*, osa 2, ss. 471 – 474 Vol.2, dec. 2003.
- [17] Sanjit K. Mitra. *Digital Signal Processing*. McGraw-Hill, kolmas laitos, 2005.
- [18] Henry W. Ott. *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- [19] Antti Räisänen ja Arto Lehto. *Radiotekniikka*. Otatieto Oy, Espoo 1993.
- [20] M.O. Shaker, S. Gosh, ja M.A. Bayoumi. A 1-GS/s 6-bit flash ADC in 90 nm CMOS. Kirjassa *MWSCAS '09. 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2009.*, ss. 144 –147, aug. 2009.
- [21] Isaac Starr ja Abraham Noordergraaf. *Ballistocardiography in Cardiovascular Research*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam 1967.
- [22] S. Talay, E. Deniz, ja G. Dundar. A sigma-delta ADC design automation tool with embedded performance estimator. Kirjassa *MIXDES 2006. Proceedings of the International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and System, 2006.*, ss. 142 –146, june 2006.
- [23] Kouhyar Tavakolian, Faranak M. Zadeh, Yindar Chuo, Tiffany Siu, Ali Vaseghi, ja Bozena Kaminska. Radar mechanocardiography: A novel analysis of the mechanical behavior of the heart. Kirjassa *EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2008.*, ss. 4863 –4866, aug. 2008.

- [24] Xihua Wang, Changhai Ru, Shuxiang Guo, ja Wei Wang. A novel model of piezoelectric ceramic hysteretic. Kirjassa *ROBIO 2008. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2008.*, ss. 252 –256, feb. 2009.
- [25] Arnold M. Weissler. *Noninvasive cardiology*. Grune & Stratton, Inc., 1974.
- [26] M. Ylilammi. *Sähkömateriaalifysiikka*. Otakustantamo, Helsinki 1989.