

# STRESSTEST 1000

Testausjärjestelmä mittalaitteiden testaamiseen

Tomi Leinonen

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2012

Ohjelmistoteknologian koulutusohjelma  
Tekniikan ja liikenteen ala





Tekijä(t) LEINONEN, Tomi Tapio	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 02.04.2012
	Sivumäärä 86	Julkaisun kieli Suomi
	Luottamuksellisuus ( ) saakka	Verkojulkaisulupa myönnetty ( X )
Työn nimi STRESSTEST 1000 – Testausjärjestelmä mittalaitteiden testaamiseen		
Koulutusohjelma Ohjelmistoteknologian koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) VÄÄNÄNEN, Olli		
Toimeksiantaja(t) Stresstech Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää testausjärjestelmä Stresstechin mittalaitteille. Testausjärjestelmän tarkoituksena on simuloida kuljetuksesta aiheutuvaa värinää, joka mahdollisesti irrottaa huolimattomasti asennetut ruuvit tai liittimet. Järjestelmän pitää myös kyetä rasittamaan mittalaitteita lämpötilan muutoksilla, jotta voitaisiin olla varmoja mittalaitteiden toimivuudesta niille määritetyllä lämpötila-alueella.</p> <p>Työ koostui elektroniikan suunnittelusta, ohjauskeskuksen rakentamisesta ja elektroniikan ohjelmoinnista. Lisäksi tietokoneelle piti tuottaa pieni ohjelmisto, jolla järjestelmän keräämät tiedot muutetaan graafiseen muotoon. Elektroniikkasuunnittelun tueksi työssä kerrotaan piirilevyn suunnittelusta, käytettyjen antureiden toimintaperiaatteesta ja käyttöönotosta sekä Fourier-muunnoksen hyödyntämisestä värinän analysoinnissa.</p> <p>Työn tavoitteena oli luoda luotettava, helppokäyttöinen ja toimiva järjestelmä, jolla tulevaisuudessa testataan kaikki maailmalle lähetettävät niin uudet kuin huoltoon tulleet mittalaitteet. Lisäksi tavoitteena oli saada järjestelmästä tietoa, jolla kehitetään mittalaitteiden laadukkuutta ja luotettavuutta.</p> <p>Työn tavoitteet saavutettiin ja järjestelmä otettiin käyttöön välittömästi. Toimeksiantaja on tyytyväinen työn tulokseen.</p>		
Avainsanat (asiasanat)		
Muut tiedot		



Author(s) LEINONEN, Tomi	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 02042012
	Pages 86	Language Finnish
	Confidential ( ) Until	Permission for web publication ( X )
Title STRESSTEST 1000 – Testing system for testing measurement devices		
Degree Programme Software Engineering		
Tutor(s) VÄÄNÄNEN, Olli		
Assigned by Stresstech Oy		
Abstract <p>The purpose of this thesis was to develop a testing system for Stresstech measuring devices. The idea of the testing system is to stimulate the vibration caused by transportation which may cause hastily installed screws or connectors to get loose. The testing system also needs to be able to stress the measuring devices with temperature changes in order to securely confirm the functionality of measuring devices on the set temperature rate.</p> <p>The thesis includes engineering the electronics, building the controlling center and programming the electronics. In addition, a computer program was needed transferring the collected data to a graphic mode. Supporting the development of the necessary electronics, this thesis also includes information on engineering a circuit board, the functioning and implementation principles of the sensors used and utilization of the Fourier transform in analyzing the vibration.</p> <p>The goal of this thesis was to create a reliable, easy-to-use and functioning system to be used in testing all the measuring devices, new and maintained, before shipping them off. In addition, the testing system needs to produce information that can be used in developing the quality and reliability of the measuring devices.</p> <p>The goals were achieved and the testing system was introduced to use immediately. The client Stresstech Oy was pleased with the results of this thesis.</p>		
Keywords		
Miscellaneous		

# SISÄLTÖ

<b>1</b>	<b>MIKSI OMA TESTAUSASEMA?</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>STRESSTECH OY</b> .....	<b>9</b>
2.1	Yritys maailmalla .....	9
2.2	Stresstechin kivijalka .....	10
<b>3</b>	<b>PIIRILEVYSUUNNITTELUN TEORIAA</b> .....	<b>12</b>
3.1	Yleisesti suunnittelusta .....	12
3.2	Johtimien leveydet ja eristevälit .....	12
3.3	Korkeat taajuudet piirilevyn suunnittelussa .....	15
3.4	Korkeat taajuudet piirilevyn suunnittelussa käytännössä .....	20
3.4.1	Läpiviennit .....	20
3.4.2	Virtojen reitit .....	21
3.4.3	Erilaiset siirtotiet .....	24
<b>4</b>	<b>JÄRJESTELMÄN KOKONAISUUS</b> .....	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>KYTKENTÄKAAVIOT JA PIIRILEVYT</b> .....	<b>27</b>
5.1	Emolevy .....	27
5.1.1	Yleistä .....	27
5.1.2	Virtalähde .....	28

	2
5.1.3	EEPROM-muistit ja reaaliaikakello ..... 31
5.1.4	UART- ja USB-liitynnät..... 32
5.1.5	Lämpötilan mittaaminen..... 34
5.1.6	Prosessori ja sen lisälaitteet..... 37
5.1.7	IO-linjat ja niiden puskurointi..... 39
5.1.8	Näppäimistö ja LCD-näyttö ..... 42
<b>5.2</b>	<b>Lämpötila-anturi..... 43</b>
<b>5.3</b>	<b>Tärinäanturi ..... 44</b>
5.3.1	Tärinäanturin rakenne..... 44
<b>6</b>	<b>OHJAUSKESKUS ..... 46</b>
6.1	Päävirtapiirin komponentit..... 46
6.2	Taajuusmuuttaja ..... 46
6.3	Pistorasiat ja hätäseispainike..... 47
6.4	Ohjauskeskuksen kannen indikaattorit ja painikkeet..... 48
6.5	Ohjauskeskuksen rakentaminen ..... 48
<b>7</b>	<b>OHJELMISTO..... 50</b>
7.1	Reaaliaikakäyttöjärjestelmä ..... 50
7.2	Ajurit..... 51
7.3	Muistin hallinta ..... 52

7.4	Tilakone .....	53
7.5	Ajastimet .....	54
7.6	Dataprotokolla tietokoneen ja testausjärjestelmän välillä.....	55
7.7	Sarjaliikenneväylien rengaspuskurit.....	56
7.8	Fourier-muunnoksen pintaraapaisu .....	57
7.8.1	Mikä on Fourier-muunnos?.....	57
7.8.2	Ikkunointi.....	58
7.8.3	DFT-muunnoksen laskeminen.....	60
8	TESTAAMINEN .....	63
8.1	Lämpötilan muutosnopeuden säätäminen .....	63
8.2	Tärinän testaaminen .....	68
9	YHTEENVETO .....	76
	LÄHTEET .....	78
	LIITTEET .....	79
	LIITE 1. PROSESSORIN OHJELMAN TILAKONEKAAVIO .....	79
	LIITE 2. ARTIKKELI KIIHTYVYYSANTURIN RAKENTEESTA.....	80
	LIITE 3. EMOLEVYN KYTKENTÄKAAVIO (SIVU 1/5).....	81
	LIITE 4. TÄRINÄANTURIN KYTKENTÄKAAVIO.....	86

## KUVIOT

KUVIO 1. Stresstech Group maailmalla.....	9
KUVIO 2. Virheellinen kytkentä tuhosi piirilevyn.....	13
KUVIO 3. Yhden megahertsin siniaalto .....	17
KUVIO 4. FFT-muunnos yhden megahertsin sinisignaalista.....	17
KUVIO 5. Säröytyneen sinisignaalin muoto.....	18
KUVIO 6. FFT-muunnos 1 MHz:n säröytyneestä sinisignaalista.....	18
KUVIO 7. Sinisignaali muokattuna puhtaaksi kanttiaalloksi.....	19
KUVIO 8. FFT-muunnos puhtaasta kanttiaallosta .....	19
KUVIO 9. Epäsymmetrisen kanttiaallon FFT-muunnos .....	20
KUVIO 10. Virran paluureitti saattaa jäädä piirilevysuunnittelijalta huomioimatta (Ahonen, J. 2010).....	22
KUVIO 11. Paluuvirta pyrkii seuraamaan menovirtaa viereisillä piirilevytasoilla (Ahonen, J. 2010).....	22
KUVIO 12. Paluuvirran leviäminen referenssitason (Ahonen, J. 2010).....	23
KUVIO 13. Erilaisia siirtolinjoja piirilevytoteutuksena (IPC-2221, 1998).....	24
KUVIO 14. Luonnos testausjärjestelmän rakenteesta .....	26
KUVIO 15. Emolevyn lohkokaaavion ensimmäinen versio .....	28
KUVIO 16. Viiden voltin jännite luodaan pienellä hakkurimuuntimella .....	29
KUVIO 17. Operaatiovahvistimien jännitteiden luonti 10 voltin vaihtosähköstä .....	29
KUVIO 18. Prosessorin ja ulkoisen AD-muuntimen jännitelähde .....	30

KUVIO 19. Prosessorin bypass-suodatus.....	31
KUVIO 20. EEPROM-muistin ja reaaliaikakellon kytkeminen I2C-väylään .....	32
KUVIO 21. TTL-tasaisen UARTin muuntaminen RS232-tasoiseksi .....	33
KUVIO 22. UARTin muuntaminen USB-väylään sopivaksi.....	33
KUVIO 23. Korjattu USB-UART-muunnin.....	34
KUVIO 24. PT100-anturin rakenne .....	35
KUVIO 25. PT100 lämpötila-anturin mittaaminen .....	36
KUVIO 26. Kelvinin mittausperiaate (allaboutcircuits, N.D.).....	37
KUVIO 27. Prosessorin lohkokaavio .....	38
KUVIO 28. Analogisten sisääntulojen puskurointi ja suodatus .....	39
KUVIO 29. IO-linjojen puskurointi .....	40
KUVIO 30. Serial-In-Parallel-Out-piiri ja sen puskurointi .....	41
KUVIO 31. Sähkökaapin kannen kytkimien keskeytysgeneraattori .....	42
KUVIO 32. Näppäinmatriisin toimintaperiaate .....	43
KUVIO 33. Lämpötila-anturin piirilevy kasattuna.....	44
KUVIO 34. Tärinäanturin piirilevy sijoitettuna alumiinikoteloon.....	45
KUVIO 35. Sähkökaapin päävirtapiirin komponentteja. ....	46
KUVIO 36. Taajuusmuuttaja asennettuna ja valmiina ohjaamaan moottoria. ....	47
KUVIO 37. Ohjauskeskuksen sijoittelukuva ulkopuolelta .....	49
KUVIO 38. Ohjauskeskuksen layoutsuunnitelma vasemmalla ja toteutus sisäpuolelta oikealta .....	49
KUVIO 39. AD7793-AD-muunnospiirin rekisterien konfigurointia ja kommentointia.	52
KUVIO 40. Rengaspuskurin rakenne .....	56



KUVIO 41. Rengaspuskurin määrittely ohjelmassa .....	57
KUVIO 42. Fourier-muunnos eräälle signaalille (Huttunen, H. 2005) .....	57
KUVIO 43. Ikkunafunktiota taajuustasossa (Wikipedia. 2012) .....	59
KUVIO 44. Neljästä AD-muuntimen näytteestä laskettu taajuusspektri .....	62
KUVIO 45. Lämpötila-antureiden paikka testauskaapissa .....	64
KUVIO 46. Testikaapin lämmitys pelkällä lämmityskaapelilla.....	65
KUVIO 47. Testikaapin lämmitys sisätilanlämmittimen kanssa .....	65
KUVIO 48. Testikaapin lämmitys teollisella lämmittimellä .....	66
KUVIO 49. Lämmittimen ja ilmankierrätyspuhaltimien lopullinen asennus.....	67
KUVIO 50. Testikaapin lämmitysprofiili, kun ilma kiertää hyvin kaapissa .....	67
KUVIO 51. Signaali värinäanturilta, kun moottoria pyöritetään 20 Hz:n taajuudella ..	68
KUVIO 52. Värinäanturin signaalin muoto, kun kaappi värisee yhden akselin suuntaisesti .....	69
KUVIO 53. Oskilloskoopilla tehty FFT-muunnos värinäanturin signaalista .....	70
KUVIO 54. Tietokoneella laskettu FFT-muunnos, kun moottorin pyörimistaajuus on noin 35 Hz.....	71
KUVIO 55. Tietokoneella laskettu FFT-muunnos, kun moottorin pyörintätaajuus on noin 50 Hz.....	71
KUVIO 56. Epäkeskomoottorin painot säädettyinä .....	72
KUVIO 57. Värinäanturi kiinnitettynä mittalaitteen alle .....	73
KUVIO 58. Spektrogrammi värinäanturin signaalista .....	73
KUVIO 59. Värinäanturin signaali zoomatulla spektrogrammilla.....	74

## TAULUKOT

TAULUKKO 1. Johtimen leveyden suhde läpikulkevaan virtaan ja lämpötilan muutokseen.....	14
TAULUKKO 2. Johtimien välisen jännitteen vaikutus johtimien etäisyyteen (IPC2221, 1998).....	15
TAULUKKO 3. Läpiviennin reiän halkaisijan vaikutus induktanssiin eri piirilevyvahvuuksilla .....	21
TAULUKKO 4. Eri piirilevymateriaalinen suhteellinen permittiivisyys (IPC2221, 1998). .....	24
TAULUKKO 5. Muistin segmentointi .....	53
TAULUKKO 6. Prosessorissa käytetyt ajastimet .....	54
TAULUKKO 7. Stresstest1000:n dataprotokolla .....	55
TAULUKKO 8. Eri ikkunafunktioiden käyttökohteita .....	59

# 1 MIKSI OMA TESTAUSASEMA?

Laadunvalvontajärjestelmiä valmistavalla Stresstech Oy:llä on ollut jonkin verran ongelmia tuotannosta lähtevien mittalaitteiden laadun kanssa. Mittalaitteita on tullut takaisin toiselta puolelta maapalloa kuljetuksen aikana irronneen liittimen tai ruuvin takia. Tämä antaa huonoa mainosta Stresstech Groupille ja aiheuttaa turhia toimituskuluja. Ongelmia on myös ollut komponenttien lämpenemisen suhteen. Osa komponenteista ei ole toiminut niille määritetyllä lämpötila-alueella tai komponentit ovat lämmenneet itsestään liikaa.

Näihin ongelmiin haluttiin ratkaisu ja siksi lähdettiin kehittämään testausympäristöä, jolla voidaan testata mittalaitteen toiminta sille määrättyllä lämpötila-alueella (0 – 40 astetta). Lisäksi testausympäristöllä pitää voida simuloida kuljetuksesta aiheutuvaa tärinää. Tällä testillä huolehditaan, että kokoaminen on tehty ohjeiden mukaisesti ja huolellisesti.

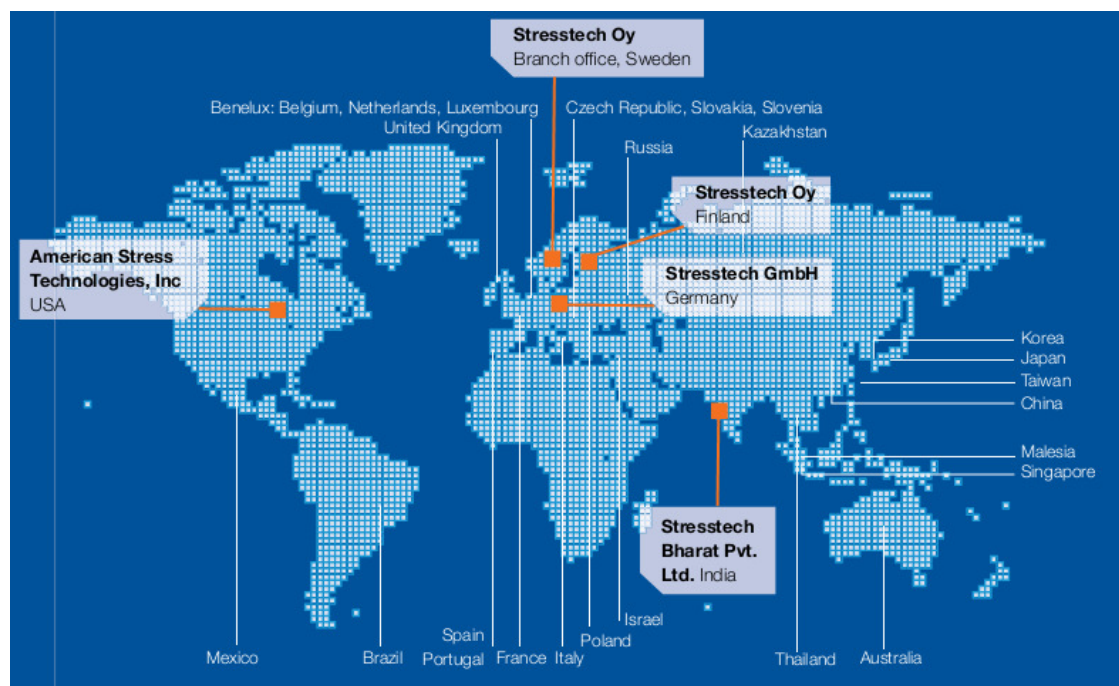
Maailmalla on jo olemassa erilaisia valmiita ratkaisuja, joilla näitä kyseisiä asioita voidaan testata. Miksi siis lähteä itse kehittämään testausympäristöä? Suurin syy tähän on valmiiden ratkaisujen korkea hinta. Valmiit ratkaisut, jotka mahdollistivat vain yhden mittalaitteen testaamisen kerrallaan, maksavat n. 100 000 €, joten edullisempi tulos tuli kehittää testausympäristö itse.

Opinnäytetyön tavoite oli saada rakennettua helppokäyttöinen ja toimiva testausympäristö, jolla testataan tulevaisuudessa kaikki maailmalle lähtevät mittalaitteet. Testausjärjestelmästä pitää saada tulostettua graafiset kuvaajat, jotka osoittavat, että lämpötilan muutokset ja tärinä eivät ole vaikuttaneet mittaus tuloksiin ratkaisevasti. Tuotteen mukana toimitettava testausdokumentti antaa luotettavan kuvan Stresstech Groupista.

## 2 STRESSTECH OY

### 2.1 Yritys maailmalla

Stresstech Oy on osa Stresstech Groupia, joka tarjoaa tuotteita ja palveluita metalliteollisuuden laadunvalvontaan. Stresstech Groupilla on toimipisteet Suomessa Jyväskylässä, Saksassa, Yhdysvalloissa ja Intiassa. Lisäksi yhtiön edustajia on yli kahdeskymmenessä maassa (ks. kuvio 1).



**KUVIO 1. Stresstech Group maailmalla**

Stresstech Group perustettiin vuonna 1983 Yhdysvaltoihin Pittsburghiin. Vuotta myöhemmin Suomi sai toimipisteensä Keski-Suomeen Muurameen, josta toimipiste siirtyi nykyiselle paikalle Vaajakoskelle Tikkutehtaantielle. Vuonna 1999 perustettiin toimipiste Saksaan, Westerborgiin ja Intian toimipiste perustettiin 2010 huhtikuussa (Stresstech Oy, 2012).

Stresstech -konserni työllisti vuoden 2011 joulukuussa yli 70 henkilöä, joista emoyhtiössä Vaajakoskella työskenteli noin 50 henkilöä. Liikevaihto oli vuonna 2011 yli 8,5 miljoonaa euroa (Stresstech Oy, 2012).

## 2.2 Stresstechin kivijalka

Stresstechin mittalaitteet jakautuvat kahteen pääryhmään: Ainetta rikkoviin ja rikkomattomiin menetelmiin. Ainetta rikkova menetelmä perustuu laserinterferometriin, ja ainetta rikkomattomat menetelmät perustuvat Barkhausenin kohinaan ja röntgendiffraktioon.

Laserinterferometrin toimintaperiaate on melko yksinkertainen. Laadukkaalla kameralla otetaan kuva mitattavasta, laservalolla valaistusta kohteesta. Tämä kuva toimii referenssikuvana. Aineeseen porataan pieni reikä suurella kierrosnopeudella, jonka jälkeen kohde kuvataan uudestaan. Reiän poraaminen kappaleeseen muuttaa sen pintajännityksiä ja nämä muutokset voidaan analysoida kuvista digitaalisen käsittelyn jälkeen.

Barkhausenin kohina perustuu ferromagneettisten aineiden ominaisuuksiin. Kun ferromagneettista ainetta, kuten terästä, magnetisoidaan ulkopuolisella, vaihtuvalla magneettikentällä, saadaan aineen dipolit kääntymään magneettikentän mukaan. Dipolien aiheuttamaa kohinaa kutsutaan Barkhausenin kohinaksi ja tämä kohina voidaan mitata anturilla. Anturina toimii kela, johon Barkhausenin magneettinen kohina indusoituu ja muuttuu sähkövirraksi. Tämä sähköinen signaali vahvistetaan, suodatetaan ja käsitellään, minkä jälkeen tulos voidaan tulostaa näytölle.

Röntgendiffraktio perustuu aineen atomihilojen välisen etäisyyksien ja niiden muutoksien mittaamiseen. Jokaisella materiaalilla on oma heijastuskulmansa, joka on vakio. Kun aineeseen kohdistuu monokromaattista röntgensäteilyä, se heijastuu takaisin atomikerroksesta tunnetussa kulmassa. Heijastuneista diffraktiopiikeistä voidaan laskea eri atomikerroksien välinen etäisyys ja tästä etäisyydestä voidaan laskea

mitattavan kappaleen jäännösjännitys. Piikeistä saadaan myös suhteellinen arvio näytteen kovuudesta.

Mittausympäristöjä on erikokoisia. Tuotekehitys- ja laboratoriokäyttöön voivat riittää mittalaite ja anturi, kun taas teollisuuden tuotantolinjalle voidaan tarjota täysin automatisoitu järjestelmä. Näillä mittalaitteilla tutkitaan metallista mm. lämpökäsittelyvikoja, hiontapalamisjälkiä, jäännösjännityksiä ja kovuuden muutoksia. Yleisimmät mitattavat kappaleet ovat hammaspyörät ja erilaiset akselit (nokka- ja kampiakseli).

Stresstechin tuotteilla laatua valvovat yritykset niin autoteollisuudesta kuin lentokoneteollisuudesta. Yhteistyö kasvaa myös muilla teollisuuden aloilla (Stresstech Oy. 2012).

## 3 PIIRILEVYSUUNNITTELUN TEORIAA

### 3.1 Yleisesti suunnittelusta

Piirilevy on komponentti, johon kiinnitetään kaikki muut komponentit. Periaatteessa piirilevy on koko tuotteen tärkein komponentti, koska piirilevyn suunnittelussa tehdyt virheet voi aiheuttaa koko tuotteen toimimattomuuden. Huonosta piirilevystä johtuvien vikojen paikantaminen on hankalaa, kallista ja aikaa vievää, joten seuraaviin suunnittelusääntöihin kannattaa kiinnittää huomiota.

- Oikeiden johdinleveyksien ja riittävien eristevälien valinta
- Ei 90 asteen kulmia johtimiin
- Kunnolliset käyttöjännite- ja maatasot EMC-häiriöiden välttämiseksi
- Mikropiireille kunnollinen bypass-suodatus
- Laajakaistaisen dataväylän johtimien pituuden sovittaminen
- Komponenttien fyysisen koon huomioiminen
- Paluuvirtojen ohjaaminen mahdollisimman helppoa reittiä pitkin takaisin
- Yleisen siisteyden noudattaminen. Piirilevyn tulee näyttää siistiltä ja selkeältä.

Yllä olevan listan viimeinen kohta ei ehkä suoranaisesti vaikuta toimivuuteen, mutta kun se piirilevy ei kuitenkaan toimi ensimmäisellä kerralla, on huomattavasti mukavampaa ruveta etsimään suunnitteluvirheitä siistiltä ja jäsennellyltä levyiltä.

### 3.2 Johtimien leveydet ja eristevälit

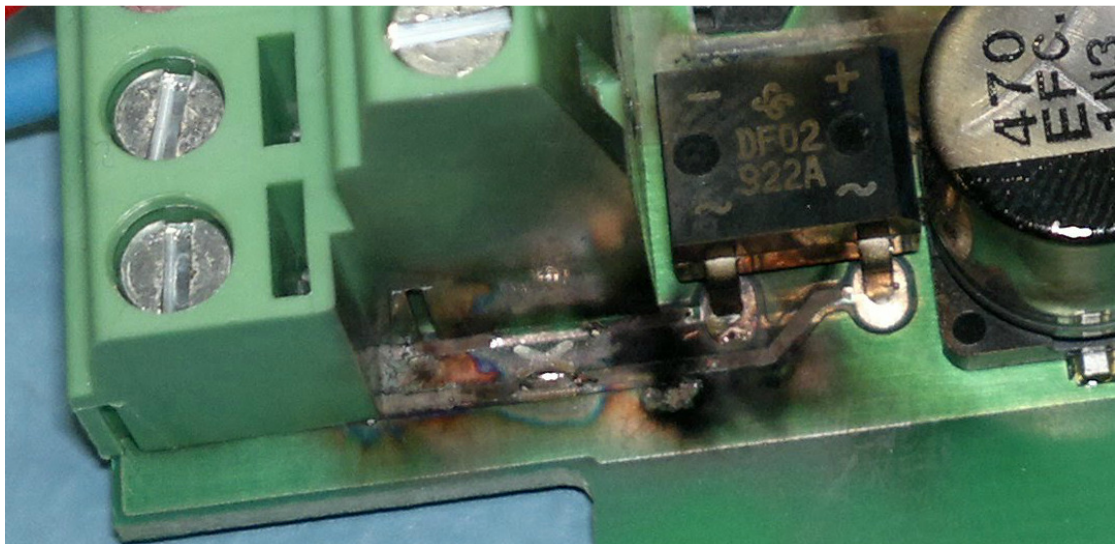
Piirilevyn veto tai johdin ei ole ideaalinen, eli se sisältää resistanssia, kapasitanssia ja induktanssia. Resistanssin aiheuttamat ongelmat ovat kuparifolion hallitsematon

lämpeneminen, johon tässä luvussa puututaan. Ohmin laki määrää, että jännite on virran ja resistanssin tulo ja että teho on jännitteen ja virran tulo.

$$U = R * I$$

$$P = U * I$$

Johtimen resistanssi saa aikaan jännitehäviön aina, kun johtimen läpi kulkee virta. Tämä virta ja jännite muuttuvat tehohäviöksi, joka muuttuu useimmiten lämmöksi. Kun johtimen lämpötila nousee tarpeeksi suureksi, johdin rikkoutuu. Toisin sanoen, kun vedon läpi kulkee liikaa virtaa, se lämpenee ja sulaa poikki. Piirilevyn johdin voi palaa myös poikki ulkoisen kytkentävirheen tms. vuoksi. Kuviossa 2 on esimerkki, mitä kytkentävirhe voi aiheuttaa.



**KUVIO 2. Virheellinen kytkentä tuhosi piirilevyn**

Johtimen leveyden laskemiseen on olemassa laskukaava, joka määrittää suurimman sallitun tasavirran tietyn leveydelle vedolle tai minimi leveyden tietylle tasavirralle.

$$I = K * dT^{0.44} * (W * H)^{0.725} ,$$

jossa



- I on suurin virta ampeereina
- K on vakio, joka on 0,024 sisäisillä kuparikerroksilla ja 0,048 ulkoisilla kuparikerroksilla
- dT on lämpötilan muutos
- W on johtimen leveys tuuman tuhannesosina
- H on johtimen paksuus tuuman tuhannesosina.

Tällä kaavalla laskettuna yhden ampeerin virta nostaa johtimen lämpötilaa 5,0 astetta, kun johtimen leveys on 0,46 mm ja paksuus 35 um. Toisin päin ajateltuna, jos johtimen lämpötila saa nousta vain 5 astetta ja johtimen läpi kulkee 10 ampeerin virta, on johtimen leveyden oltava minimissään noin 11 mm. Taulukkoon 1 on laskettu valmiiksi muutamia johtimen leveyksiä eri ympäristössä.

**TAULUKKO 1. Johtimen leveyden suhde läpikulkevaan virtaan ja lämpötilan muutokseen.**

Lämpötilan muutos	Johtimen läpikulkeva virta (A)									
	0,1	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	10,0	15,0
1,0	0,05	0,47	0,74	1,21	2,13	3,16	5,53	11,19	29,10	50,90
5,0	0,02	0,18	0,28	0,46	0,80	1,19	2,08	4,21	10,96	19,17
10,0	0,01	0,12	0,18	0,30	0,53	0,78	1,37	2,77	7,19	12,59
20,0	0,01	0,08	0,12	0,20	0,35	0,51	0,90	1,82	4,72	8,26
40,0	0,01	0,05	0,08	0,13	0,23	0,34	0,59	1,19	3,10	5,43
80,0	0,00	0,03	0,05	0,09	0,15	0,22	0,39	0,78	2,04	3,56

Jos piirilevylle tulee korkeita jännitteitä, ne on huomioitava johtimien eristevälissä. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että yhden kilovoltin jännite aiheuttaa läpilyönnin noin yhden millimetrin etäisyydeltä, kun väliaineena on ilma. Tämä ei kuitenkaan päde piirilevysuunnitteluun, koska väliaineena yleensä on FR4 lasikuituepoksi. Lisäksi piirilevyllä on otettava huomioon jänniteryömintä. Taulukossa 2 on laskettu johtimien eristevälejä, kun jännitteet ovat alle 500 voltia.

**TAULUKKO 2. Johtimien välisen jännitteen vaikutus johtimien etäisyyteen (IPC2221, 1998).**

Voltage Between Conductors (DC or AC Peaks)	Minimum Spacing						
	Bare Board				Assembly		
	B1	B2	B3	B4	A5	A6	A7
0-15	0.05 mm	0.1 mm	0.1 mm	0.05 mm	0.13 mm	0.13 mm	0.13 mm
16-30	0.05 mm	0.1 mm	0.1 mm	0.05 mm	0.13 mm	0.25 mm	0.13 mm
31-50	0.1 mm	0.6 mm	0.6 mm	0.13 mm	0.13 mm	0.4 mm	0.13 mm
51-100	0.1 mm	0.6 mm	1.5 mm	0.13 mm	0.13 mm	0.5 mm	0.13 mm
101-150	0.2 mm	0.6 mm	3.2 mm	0.4 mm	0.4 mm	0.8 mm	0.4 mm
151-170	0.2 mm	1.25 mm	3.2 mm	0.4 mm	0.4 mm	0.8 mm	0.4 mm
171-250	0.2 mm	1.25 mm	6.4 mm	0.4 mm	0.4 mm	0.8 mm	0.4 mm
251-300	0.2 mm	1.25 mm	12.5 mm	0.4 mm	0.4 mm	0.8 mm	0.8 mm
301-500	0.25 mm	2.5 mm	12.5 mm	0.8 mm	0.8 mm	1.5 mm	0.8 mm
> 500 See para. 6.3 for calc.	0.0025 mm /volt	0.005 mm /volt	0.025 mm /volt	0.00305 mm /volt	0.00305 mm /volt	0.00305 mm /volt	0.00305 mm /volt

B1 - Internal Conductors  
 B2 - External Conductors, uncoated, sea level to 3050 m  
 B3 - External Conductors, uncoated, over 3050 m  
 B4 - External Conductors, with permanent polymer coating (any elevation)  
 A5 - External Conductors, with conformal coating over assembly (any elevation)  
 A6 - External Component lead/termination, uncoated  
 A7 - External Component lead termination, with conformal coating (any elevation)

Jos Johtimien jännite nousee yli 500 voltin, voi pienimmän eristevälin laskemiseen käyttää seuraavaa kaavaa.

$$W = ((X - 500 V) * 0,0025 \text{ mm}) + 0,25 \text{ mm},$$

jossa

- W on kapein mahdollinen eristeväli
- X on johtimien välinen jännite.

Jos johtimien jännite-ero on 1000 voltia, pitää johtimien eristeväli olla yllä olevan kaavan mukaan 1,5 mm.

### 3.3 Korkeat taajuudet piirilevyn suunnittelussa

Kun piirilevyllä käytettävien signaalien taajuudet pysyvät alle 1 MHz:n ja signaalien reunojen jyrkkyys pysyy alle 1 V / us, ei suunnittelussa juurikaan tarvitse ottaa huomioon johtimien aiheuttamia induktansseja ja kapasitansseja. Jos kuitenkin signaalin taajuus alkaa tästä nousta, tulevat nämä edellä mainitut parasittiset ominaisuudet

vaikuttamaan signaalin kulkuun radikaalisesti, ja jos näitä ilmiöitä ei ota huomioon ollenkaan, pahimmassa tilanteessa piirilevy ei vain toimi.

Kuinka sitten kapasitanssi ja induktanssi vaikuttavat signaaliin? Kapasitanssi ja induktanssi luovat johtimeen LC-alipäästösuotimen, jonka rajataajuuteen vaikuttavat johtimen induktanssi ja kapasitanssi seuraavasti.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

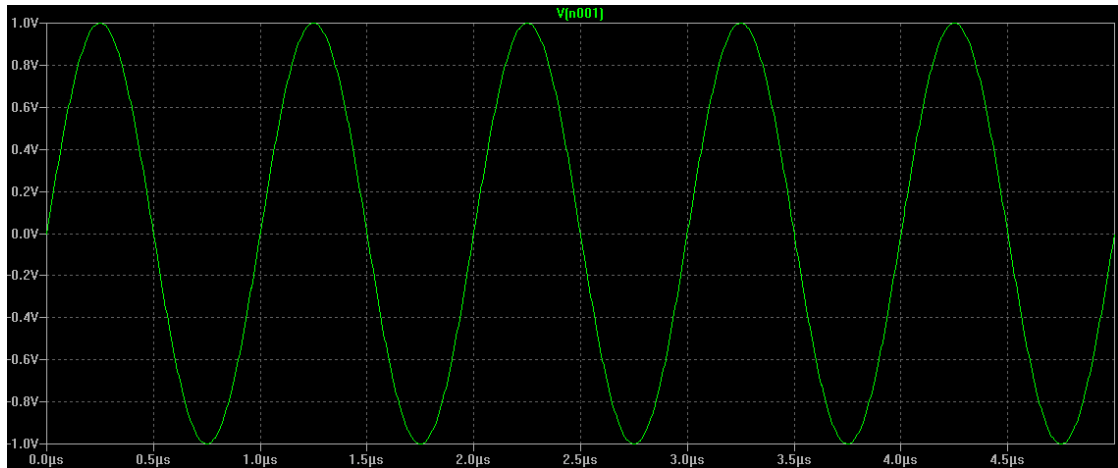
jossa

- $f_r$  on suotimen rajataajuus
- $L$  on induktanssi
- $C$  on kapasitanssi.

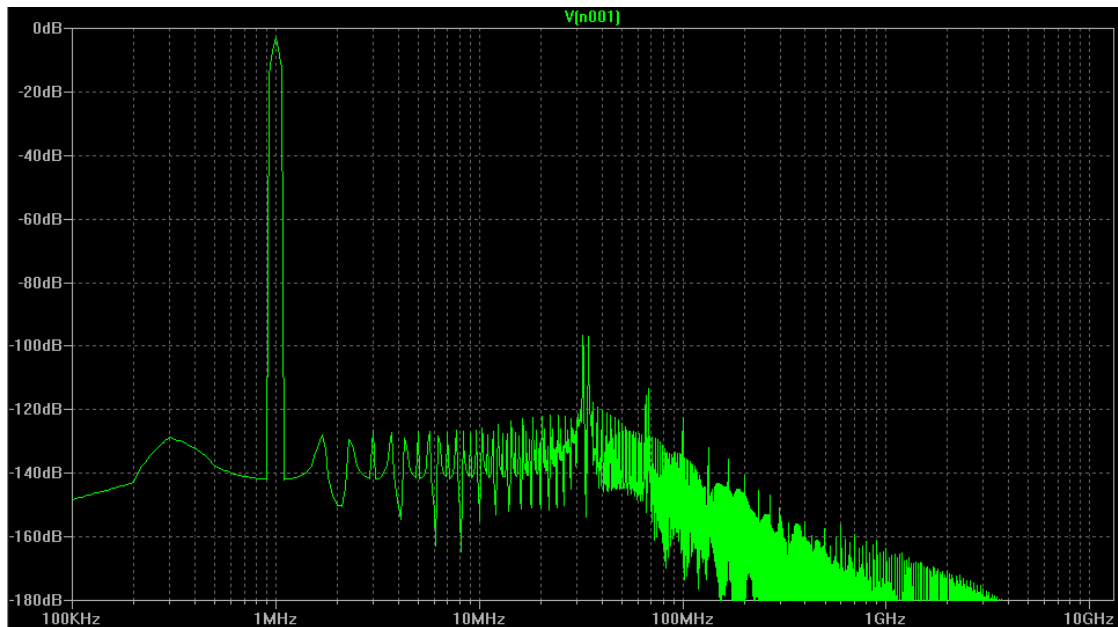
Rajataajuus ilmoittaa taajuuden, jolloin hyötysignaalin teho on vaimentunut puoleen.

Kapasitanssi ja induktanssi aiheuttavat vaihtosähkölle vaihtovirtavastuksen, jota kutsutaan reaktanssiksi. Reaktanssia ja resistanssia yhdessä kutsutaan impedanssiksi.

Piirilevyn suunnittelussa ei pitäisi pelkästään kiinnittää huomiota signaalin taajuuteen. Todellinen signaalin vaatima kaistanleveys koostuu signaalin perustaajuudesta ja reunan jyrkkyydestä. Jos hyötysignaalin taajuus olisi muodoltaan puhdasta siniaaltoja, olisi signaalin kaistanleveys pienin mahdollinen. Kuvioissa 3 - 9 tutkitaan signaalin reunan nousu- ja laskunopeuden vaikutusta kaistanleveyteen.



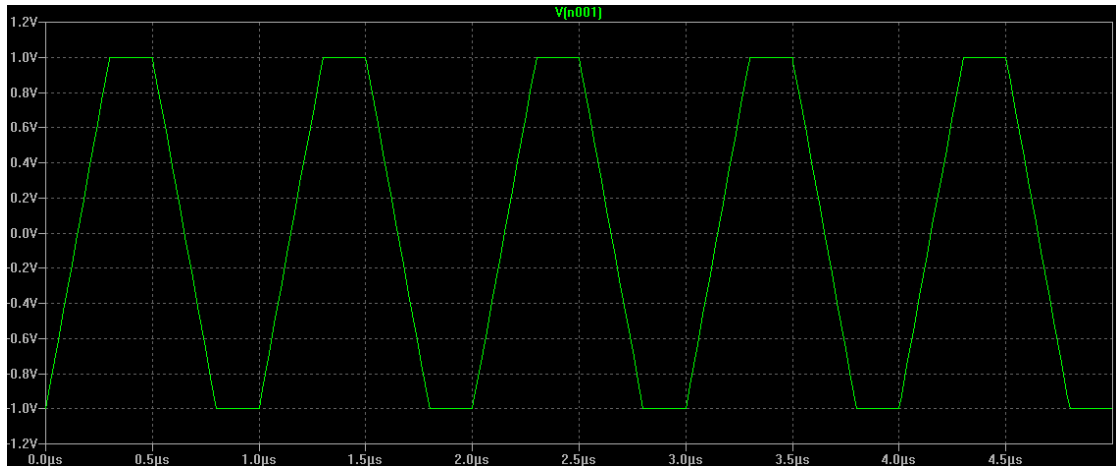
**KUVIO 3. Yhden megahertsin siniaalto**



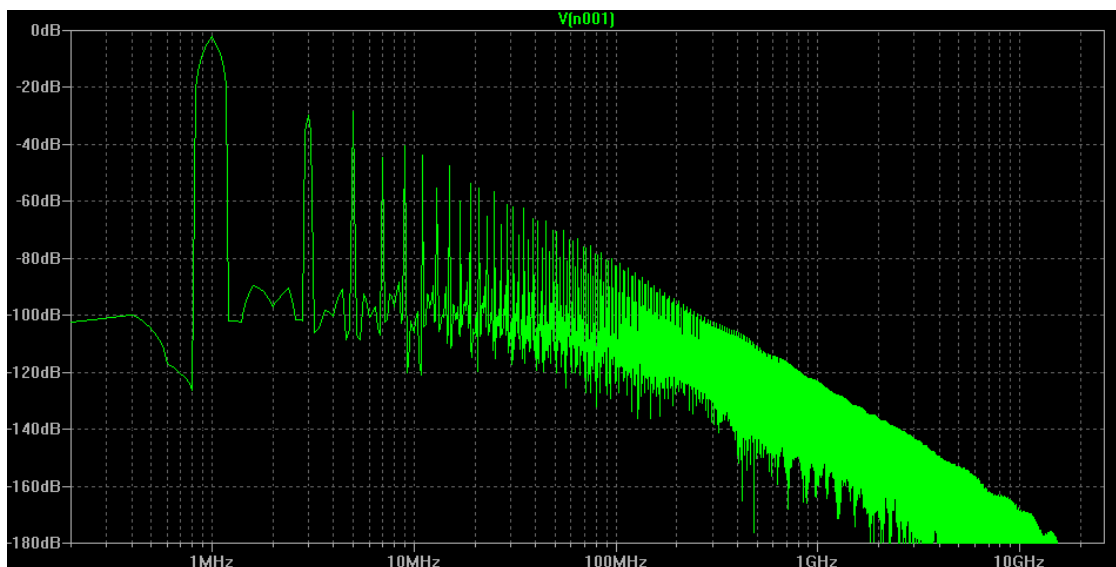
**KUVIO 4. FFT-muunnos yhden megahertsin sinisignaalista**

Kuviosta 4 nähdään, että puhdas siniaalto ei aiheuta mitään huomion arvoisia häiriöitä korkeilla taajuuksilla. Kuvaajassa on yksi piikki, joka sijoittuu sinisignaalin perustaaajuudelle. Seuraavaksi korkein piikki yltää noin -95 dB:n tasolle taajuudella 33 MHz.

Muokataan siniaaltoa kantikkaammaksi siten, että signaalin reunan nousu- ja laskunopeus on 300 ns. Taajuus on edelleen 1 MHz.



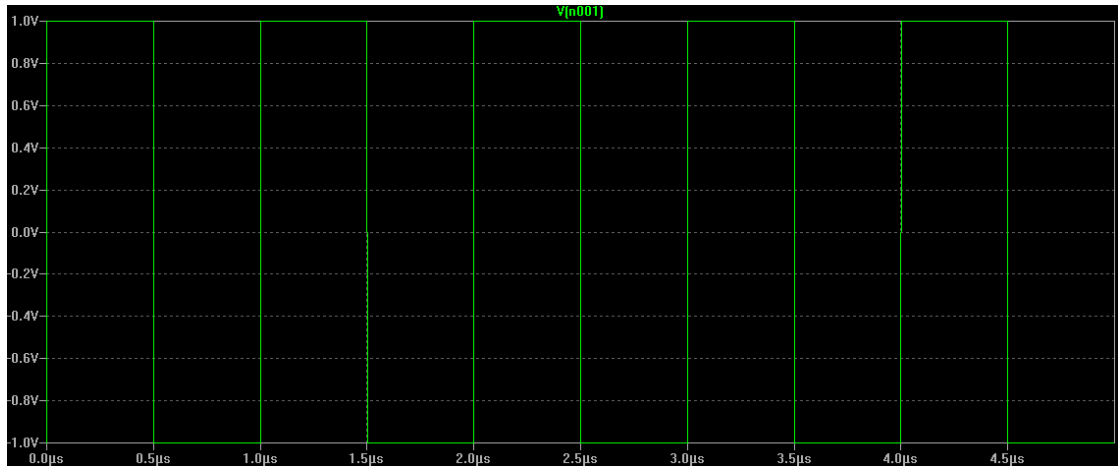
**KUVIO 5. Säröytyneen sinisignaalin muoto**



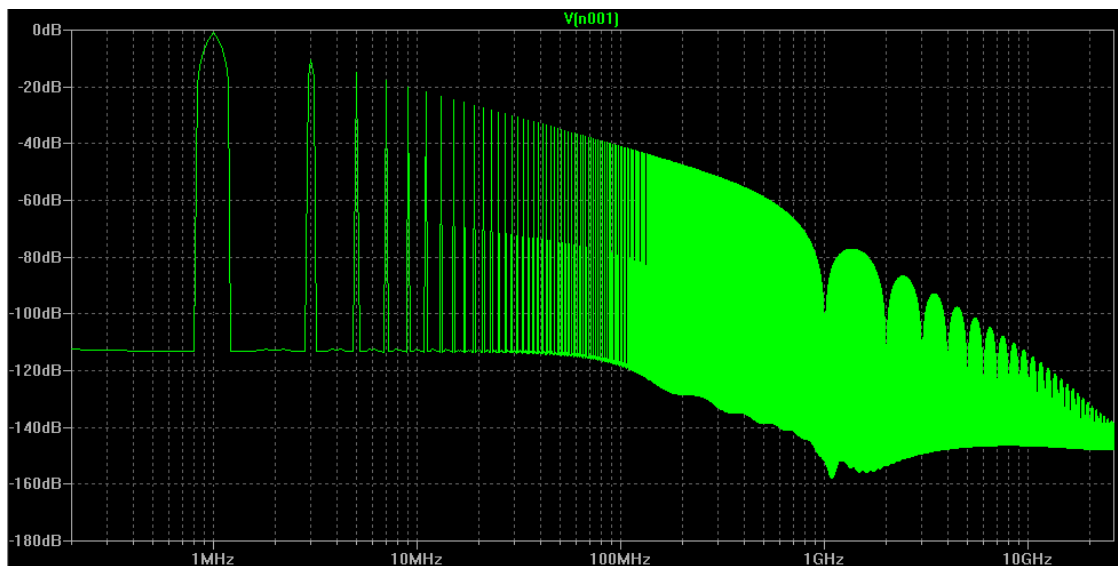
**KUVIO 6. FFT-muunnos 1 MHz:n säröytyneestä sinisignaalista**

Kun kuvioita 4 ja 6 verrataan keskenään, huomataan, että kuvion 6 signaali on huomattavasti laajakaistaisempi. Perustaajuuden harmonisten kerrannaisten kohdalla piikit ovat huomattavan korkealla.

Muokataan sinisignaali puhtaaksi kantiaalloksi, jonka reunojen nousu- ja laskunopeudet ovat 1 ns.

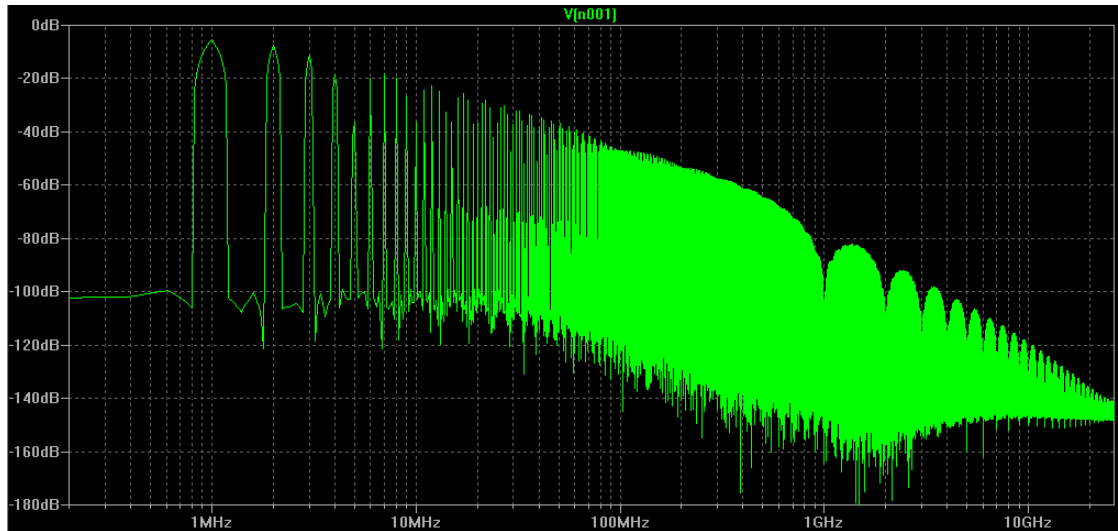


**KUVIO 7. Sinisignaali muokattuna puhtaaksi kanttiaalloksi**



**KUVIO 8. FFT-muunnos puhtaasta kanttiaallosta**

Kuvioista 3- 8 voidaan päätellä, että yhden megahertsin puhdas siniaalto ei vaadi kaistaa juuri lainkaan verrattuna yhden megahertsin kanttiaaltoon. Kuvion 7 kanttiaallosta tehty FFT-muunnos on vielä verrattain siistin näköinen, koska nousu- ja laskunopeudet ovat symmetriset ja pulssisuhde on 50 %. Jos signaali muutetaan epäsymmetriseksi siten, että pulssisuhde on 20 %, nousevan reunan nopeus 1 ns ja laskevan reunan nopeus 10 ns, näyttää FFT-muunnos seuraavalta (ks. kuvio 9).



**KUVIO 9. Epäsymmetrisen kanttiaallon FFT-muunnos**

Kuvioissa 3 - 9 on käsitelty vain yhtä signaalia kerrallaan. Todellisuudessa näitä signaaleja voi olla piirilevyllä useita ja ne kytkeytyvät keskenään ristiin rastiin, mikäli suunnittelusääntöjä ei noudateta.

Johtopäätöksenä kuvioista 3 - 9 voidaan todeta, että digitaalisissa hyötysignaaleissa on järkevintä käyttää mahdollisimman pientä reunan jyrkkyyttä, jotta saadaan minimoitua häiriötä aiheuttava harmoniset signaalit. Lisäksi analogiset linjat kannattaa pitää erillään digitaalisista signaaleista, koska digitaalisten signaalien korkeataajuuksiset häiriöt kytkeytyvät analogiseen linjaan aiheuttaen kohinaa analogiseen signaaliin.

### **3.4 Korkeat taajuudet piirilevyn suunnittelussa käytännössä**

#### **3.4.1 Läpiviennit**

Läpiviennillä tarkoitetaan sitä, kun piirilevyn johdin siirretään levyn toiselta puolelta toiselle puolelle. Läpiviennin sähköisillä ominaisuuksilla ei juurikaan merkitystä matalammilla taajuuksilla. Kuitenkin, jos taajuudet nousevat yli 100 MHz, on läpiviennin

parasiittiset ominaisuudet otettava huomioon. Läpiviennistä aiheutuva induktanssi voidaan laskea kaavalla

$$L = 0,2h \left[ \ln \left( \frac{4h}{d} \right) + 1 \right],$$

jossa

- H on halkaisija (mm)
- d on piirilevyn paksuus (mm)
- L on induktanssi (nH)

Taulukkoon 3 on laskettu muutamien yleisempien läpivientien induktanssi em. kaavalla.

**TAULUKKO 3. Läpiviennin reiän halkaisijan vaikutus induktanssiin eri piirilevyvahvuuksilla**

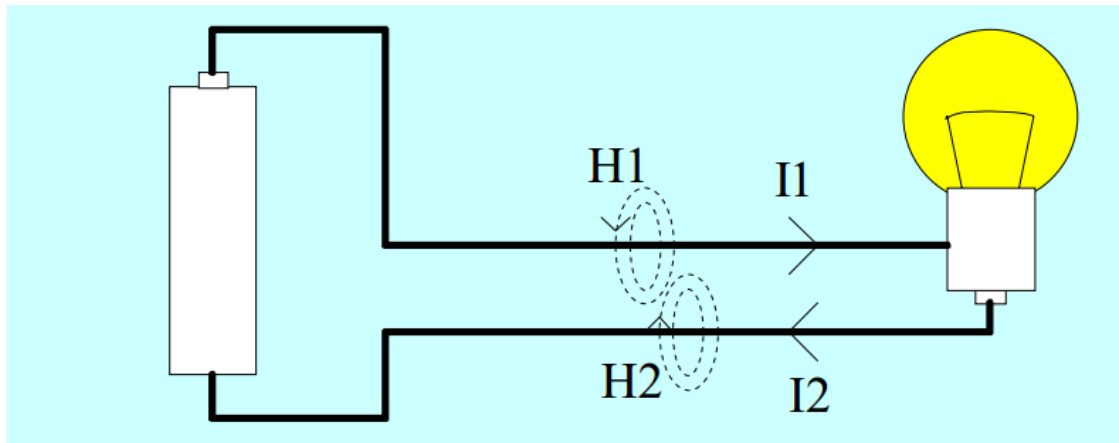
Piirilevyn paksuus (mm)	Läpiviennin reiän halkaisija (mm)							
	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
0,5	0,29	0,26	0,24	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17
0,8	0,54	0,49	0,46	0,43	0,40	0,38	0,36	0,35
1,0	0,72	0,66	0,62	0,58	0,55	0,52	0,50	0,48
1,6	1,30	1,21	1,14	1,08	1,03	0,99	0,95	0,91

Taulukosta voidaan päätellä, että mitä ohuempi piirilevy ja suurempi läpiviennin reiän halkaisija, sitä pienempi induktanssi. Ja koska induktanssi on pahasta, niin pitää käyttää mahdollisimman suuria läpivientejä. Mielellään ei käytetä läpivientejä ollenkaan, kun viedään laajakaistaista signaalia piirilevyllä paikasta toiseen.

### 3.4.2 Virtojen reitit

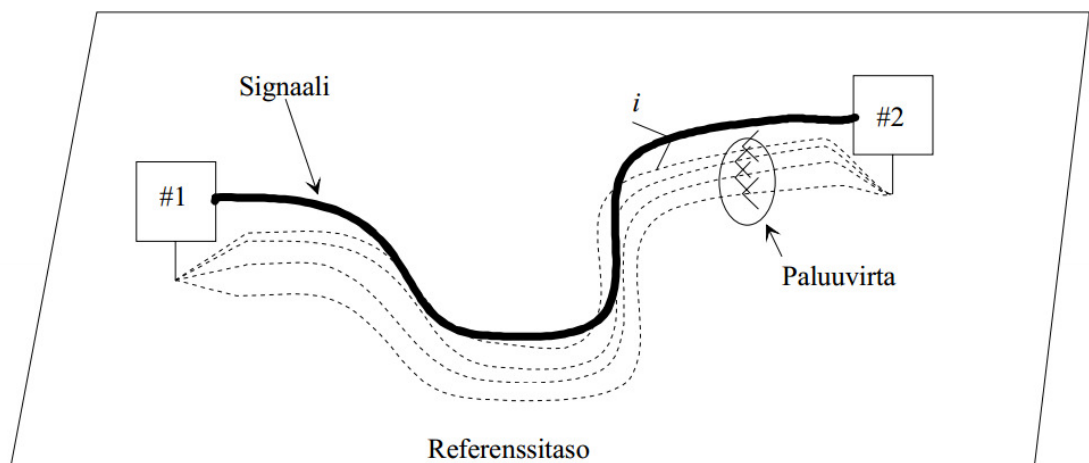
Piirilevyn suunnittelun tärkeimpiä asioita on kytkennän virtojen suunnittelu. Virta aiheuttaa magneettikentän ja tämä magneettikenttä voi indusoida viereiseen johtimeen signaalin. Toisin sanoen signaali ylikuuluu toiseen signaaliin. Tämä on ongelma varsinkin suurilla taajuuksilla. Kuvio 10 selventää asiaa.





**KUVIO 10. Virran paluureitti saattaa jäädä piirilevysuunnittelijalta huomioimatta (Ahonen, J. 2010)**

Kun meno- ja paluuvirran johtimet kulkevat vierekkäin, magneettikentät H1 ja H2 kumoavat toisensa. Yleensä menevän virran reitti suunnitellaan järkevästi, koska se on myös piirretty kytkentäkaavioon, mutta paluuvirta unohdetaan. Paluuvirran magneettikenttä voi kytkeytyä samalla tavalla muihin signaaleihin ja aiheuttaa häiriöitä. Jos paluuvirta kuljetetaan maatasen kautta, seuraa paluuvirta menovirran fyysistä reittiä, kuten kuvio 11 esittää.



**KUVIO 11. Paluuvirta pyrkii seuraamaan menovirtaa viereisillä piirilevytasoilla (Ahonen, J. 2010)**

Paluuvirroille pitää aina tarjota mahdollisimman pieni-impedanssinen reitti. Yhteinen maataso viereisellä kerroksella on hyvä vaihtoehto. Tällöin jokainen signaali,

joka on maa- tai käyttöjännitetason vieressä, on siirtolinja, tarkemmin mikroliuska.

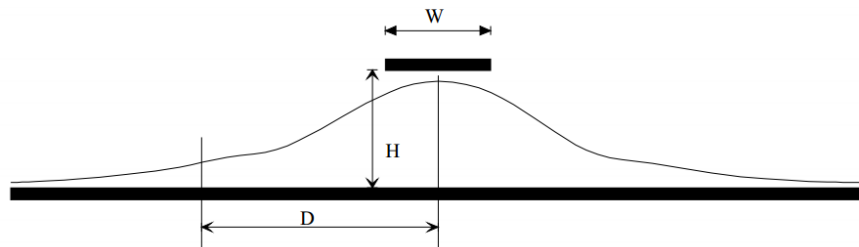
Mikroliuskan paluuvirran jakautuminen voidaan laskea kaavalla

$$i(D) = \frac{I_0}{\pi H} * \frac{1}{1 + \left(\frac{D}{H}\right)^2},$$

jossa

- $I_0$  on virran suuruus
- $H$  on referenssi tason ja signaalitason välinen etäisyys
- $D$  on paluuvirran leviäminen referenssitason

Kuvio 12 selventää edellä mainittua kaavaa.



**KUVIO 12. Paluuvirran leviäminen referenssitason (Ahonen, J. 2010)**

Mikroliuskalle voidaan myös laskea impedanssi. Impedanssisovitus on todella tärkeää siirtolinjoille. Väärin mitoitettu siirtolinja voi estää signaalin kulkemisen kokonaan.

Ominaisimpedanssi lasketaan kaavalla

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \ln \left[ \frac{5,98h}{0,8w + t} \right],$$

jossa

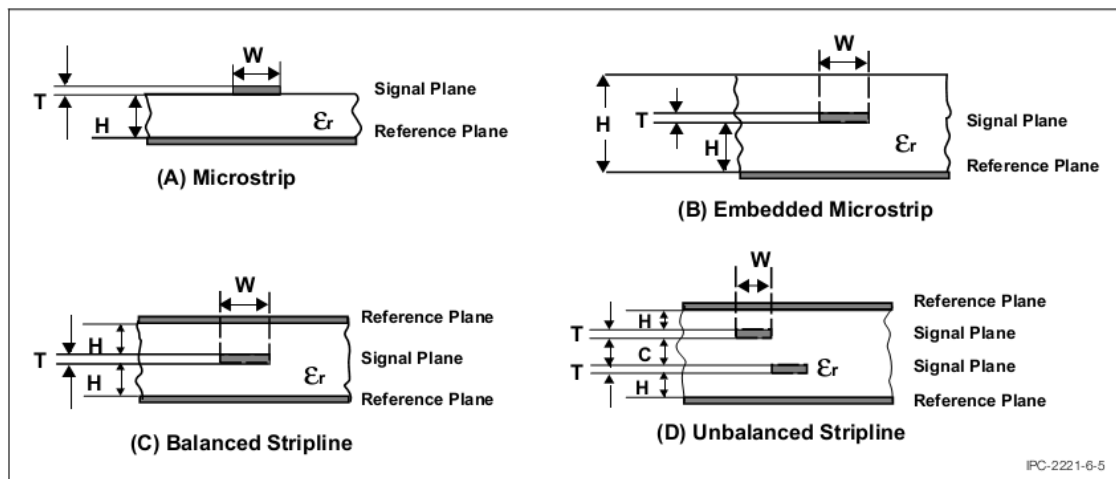
- $h$  on eristävän aineen paksuus tuumissa
- $w$  on liuskan leveys tuumissa
- $t$  on liuskan paksuus tuumissa
- $\epsilon_r$  on väliaineen suhteellinen permittiivisyys (Ks. Taulukko 4)
- $Z_0$  on liuskan impedanssi ohmeissa

**TAULUKKO 4. Eri piirilevymateriaalinen suhteellinen permittiivisyys (IPC2221, 1998).**

Designator		Material Reinforcement/Resin	Dielectric Constant $\epsilon_r$
ANSI	MIL-S-13949		
FR-4	GF	Woven Glass/Epoxy	4.2-4.9
FR-5	GH	Woven Glass/Epoxy	4.2-4.9
	GP	Non-woven Glass/PTFE	2.2-2.4
	GR	Non-woven Glass/PTFE	2.2-2.4
	GT	Woven Glass/PTFE	2.6-2.8
	GX	Woven Glass/PTFE	2.4-2.6
GPY	GI	Woven Glass/Polyimide	4.0-4.7
	GY	Woven Glass/PTFE	2.1-2.45
	AF	Woven Aramid/Epoxy	3.8-4.5
	BF	Non-woven Aramid/Epoxy	3.8-4.5
	AI	Woven Aramid/Polyimide	3.6-4.4
	BI	Non-woven Aramid/Polyimide	3.6-4.4
	QI	Woven Quartz/Polyimide	3.0-3.8
	GFT or GIJ	Woven Glass/BT	4.0-4.7
	CF	Non-woven Polyester/Epoxy	3.8-4.9
	GC	Woven Glass/Cyanate Ester	4.0-4.7
	*P/*T/*R/*X/*Y	Non-supported PTFE	2.2
	*IN/*IL or *IJ	Non-supported Polyimide	3.5

### 3.4.3 Erilaiset siirtotiet

Edellisessä luvussa tutustuimme yleisimpään siirtotiehen eli mikroliuskaan. Piirilevyille voidaan myös tehdä erilaisia siirtoteitä (ks. kuvio 13).



**KUVIO 13. Erilaisia siirtolinjoja piirilevytoteutuksena (IPC-2221, 1998)**

Näille siirtolinjoille voidaan laskea ominaisimpedanssit eri kaavoilla. Haudatun mikroliuskan (kuvio 13.B) impedanssi lasketaan samalla kaavalla, kuin normaalin mikroliuskan impedanssi, muuttamalla suhteellisen permittiivisyyden arvoa.

Kuvion 13.C rakennetta kutsutaan liuskajohdoksi. Se eroaa mikroliuskastasta siten, että referenssitaso on liuskan molemmilla puolilla yhtä kaukana. Tällaisen systeemin ominaisimpedanssi lasketaan kaavalla

$$Z_0 = \frac{60 \ln \left[ \frac{1,9(2H+T)}{0,8W+T} \right]}{\sqrt{\epsilon_r}},$$

jossa

- H on liuskan ja referenssitason välinen etäisyys tuumissa
- T on liuskan paksuus tuumissa
- W on liuskan leveys tuumissa
- $\epsilon_r$  on väliaineen suhteellinen permittiivisyys
- $Z_0$  on liuskan impedanssi ohmeissa.

Kuvion 13.D rakenne on asymmetrinen liuskajohto. Siinä referenssitasojen välissä on liuskajohtoja useammassa kerroksessa. Tämä johtaa siihen, että liuskajohdon ja referenssitasojen väliset etäisyydet eivät ole symmetriset. Tällaisen systeemin ominaisimpedanssi voidaan laskea kaavalla

$$Z_0 = \frac{80 \ln \left[ \frac{1,9(2H+T)}{0,8W+T} \right] * \left[ 1 - \frac{H}{4(H+C+T)} \right]}{\sqrt{\epsilon_r}},$$

jossa

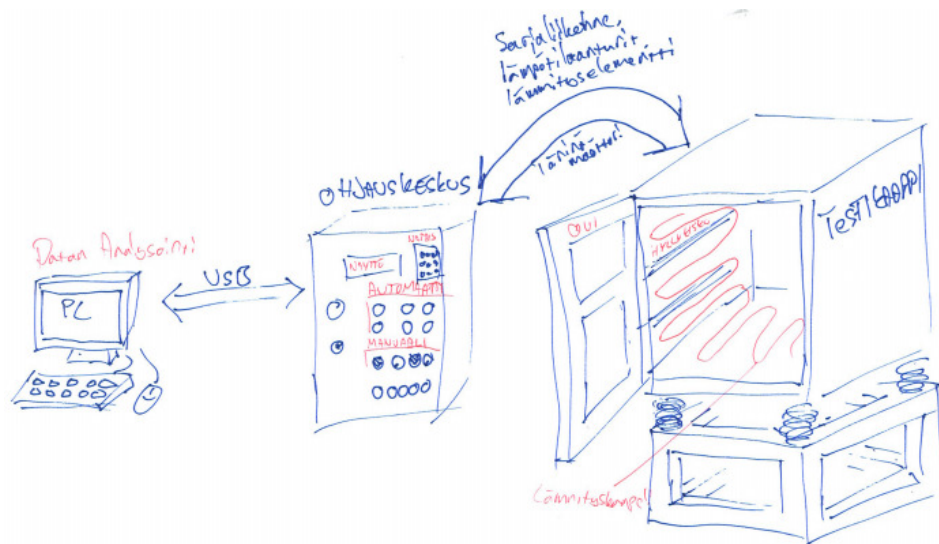
- H on liuskojen ja referenssitasojen etäisyys tuumissa
- C on liuskojen välinen etäisyys tuumissa
- T on liuskojen paksuus tuumissa
- W on liuskojen leveys tuumissa
- $\epsilon_r$  on väliaineen suhteellinen permittiivisyys
- $Z_0$  on ominaisimpedanssi ohmeissa.

## 4 JÄRJESTELMÄN KOKONAISUUS

Testausjärjestelmä tulee koostumaan lähtökohtaisesti tietokoneesta, ohjauskeskuksesta ja testauskaapista. Tietokone on lähinnä testin tulosten analysointia varten, mutta se kykenee myös ohjaamaan testikaappia. Esiohjelmoidut testit luodaan tietokoneella, mutta kun testiä ajetaan, ei tietokoneen tarvitse olla kytkettynä.

Testauskaappi tulee olemaan noin kaksi metriä korkea ja se koostuu kahdesta osasta. Alaosa toimii testauskaapin jalustana ja yläosa, johon mittalaitteet, anturit yms. tulee kiinni, lepää alaosan päällä jousien varassa. Jousilla pyritään estämään värinämoottorin aiheuttaman värinän siirtymistä alaosan kautta testaushuoneen rakenteisiin.

Ohjauskeskus toimii linkkinä tietokoneen ja testauskaapin välillä. Tietokone kytketään ohjauskeskukseen USB-kaapelilla. Ohjauskeskuksen ytimenä toimii emolevy (ks. luku 5.1), joka ohjaa testauskaappia. Kuviossa 14 on luonnos järjestelmän rakenteesta.



KUVIO 14. Luonnos testausjärjestelmän rakenteesta

## 5 KYTKENTÄKAAVIOT JA PIIRILEVYT

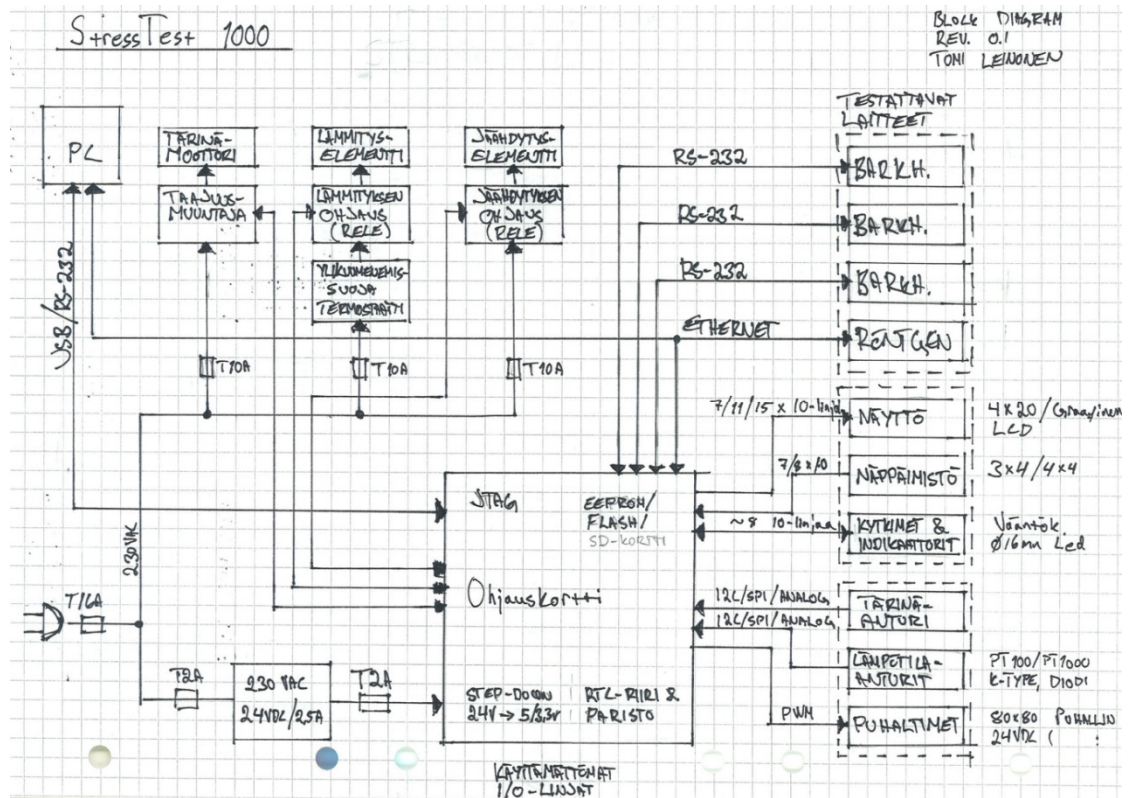
### 5.1 Emolevy

#### 5.1.1 Yleistä

Emolevy, joka on koko järjestelmän ydin, koostuu useista eri lohkoista. Eri lohkot yhdistyvät yhteen ydinlohkoon, joka tässä tapauksessa on prosessori (AtMega2560). Prosessori käyttää jokaisen lohkon ”palveluita” ja muodostaa niiden avulla toimivan järjestelmän. Emolevy on tehty 4-kerrospiirilevylle mm. EMC-häiriöiden välttämiseksi. Emolevy on saman ohjauskeskuksen sisällä, jossa tärinämoottorin ohjaamiseen käytetty taajuusmuuttaja on. Taajuusmuuttajat ovat itsestään melko voimakkaita häiriölähteitä. 4-kerrospiirilevy mahdollistaa huomattavasti paremman häiriösuojan EMC-häiriöitä vastaan ja täten nostaa piirilevyn luotettavuutta.

Emolevyn kerrokset jaettiin siten, että ensimmäinen ja viimeinen kerros ovat signaalikerrokset ja toinen ja kolmas käyttöjännitekerroksia. Näin käyttöjännitekerros saadaan mahdollisimman lähelle maatasoa, joka suurentaa näiden välistä kapasitanssia. Suurempi kapasitanssi johtaa pienempiin häiriöihin piirilevyllä. Lisäksi piirilevyn signaalikerrokset on täytetty maakerroksella, jolla on häiriöitä suodattava vaikutus ja piirilevyn tasapaino kuparin suhteen on parempi.

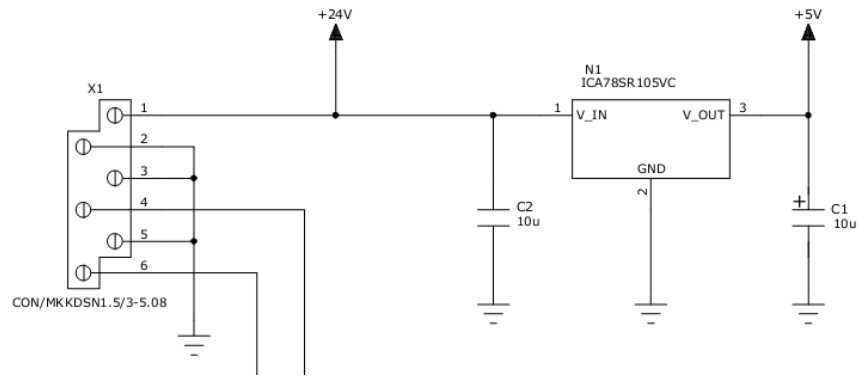
Emolevyn suunnittelu alkoi piirtämällä lohkokaavio kuvaamaan järjestelmän toimintaa. Tämä helpotti mahdollisten ongelmakohtien havaitsemisen ajoissa ja näin ehkäisi turhaa työtä. Muutenkin isommat järjestelmät on helpompi suunnitella moduuleissa ja kasata lopuksi yhdeksi järjestelmäksi. Kuviossa 15 on ensimmäinen luonnos emolevyn lohkokaaviosta.



KUVIO 15. Emolevyn lohkokaavion ensimmäinen versio

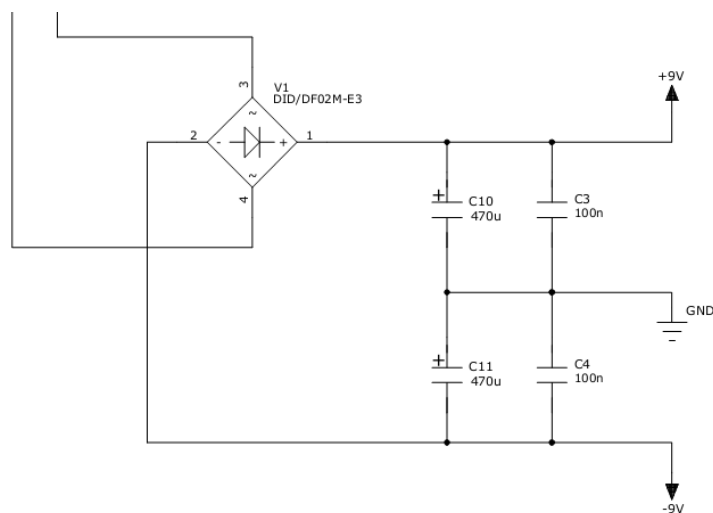
### 5.1.2 Virtalähde

Virtalähteellä tarkoitetaan emolevyn jännitteiden regulointia haluttuun käyttöjännitteeseen. Tarvittavat käyttöjännitteet ovat +24 V, +9 V, -9 V ja +5 V. +24 V:n jännite tuodaan ulkopuolelta, josta generoidaan +5 voltin jännite. Tämä jännite luodaan pienellä hakkuriteknologiaan perustuvalla regulaattorilla. Hakkuriregulaattoriin päädyttiin, koska muunnos 24 voltista viiteen volttiin aiheuttaa 3,8 W hukatehon lineaarisella regulaattorilla silloin kun järjestelmä ottaa virtaa viidestä voltista noin 0,15 ampeeria. Tällainen hukateho ei tunnu kovin suurelta, mutta kun se kohdistuu pienelle alalle, tarkoittaa se jopa 50 °C asteen lämpötilan nousua regulaattoriipiirissä. Jos tuota lämpötilannousua ei saada rajoitettua, voi regulaattori tuhoutua. Hakkuriteknologiaan perustuvalla regulaattorilla hukateho jää alle yhteen wattiin. Kuviossa 16 on hakkuriregulaattorin kytkentä.



**KUVIO 16. Viiden voltin jännite luodaan pienellä hakkurimuuntimella**

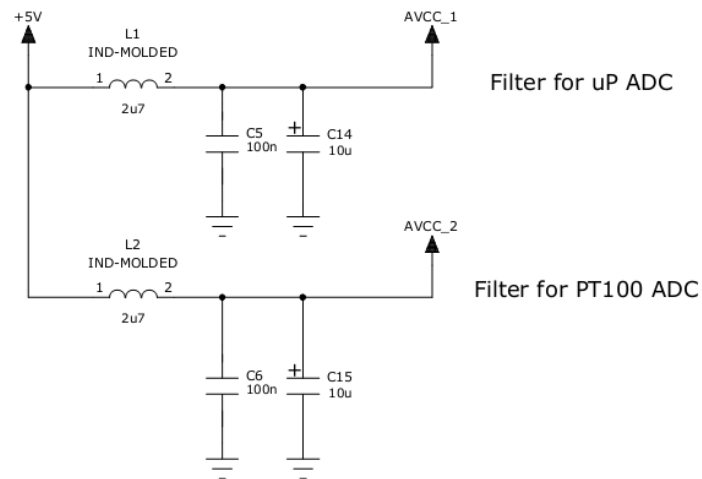
Muut jännitteet, eli +9 V:n ja -9 V:n jännitteet, luodaan 10 voltin vaihtosähkölinjasta. Operaatiovahvistimet, joita tässä työssä käytetään, tarvitsevat kaksipuoleisen käyttöjännitteen toimiakseen luotettavasti. Kaksipuoleinen käyttöjännite luodaan kokoal-  
tosuuntaamalla ja suodattamalla vaihtosähköä kuvion 17 kytkennällä.



**KUVIO 17. Operaatiovahvistimien jännitteiden luonti 10 voltin vaihtosähköstä**

Koska emolevyllä tarvitaan laadukasta AD-muunnosta, pitää niiden käyttöjännite suodattaa erilleen digitaalisesta käyttöjännitteestä (ks. Luku 3). Prosessorin AD-muuntimelle ja PT100 antureiden lukemiseen käytetylle AD-muuntimelle suunniteltiin kuvion 18 tyylliset virtalähteet.





### KUVIO 18. Prosessorin ja ulkoisen AD-muuntimen jännitelähde

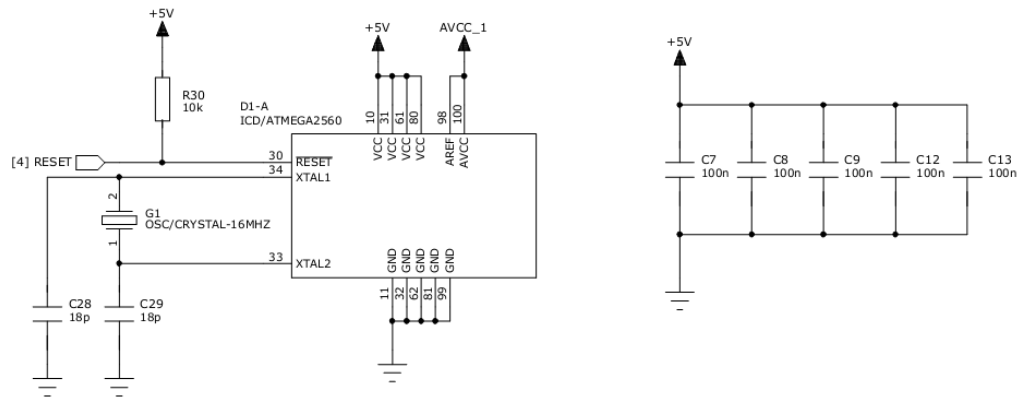
Periaatteessa kuviossa 18 oleva virtalähde toimii vain alipäästösuotimena, joka suodattaa korkeataajuiset häiriöt pois AD-muuntimien käyttöjännitteestä.

Virtalähteeseen kuuluu myös ympäri piirilevyä sijoitetut bypass-kondensaattorit.

Bypass-kondensaattorit

- Estävät piirin omien häiriöiden siirtymisen ulkopuolelle
- Estävät ulkoisten piirien häiriöiden siirtymisen suojattavaan piiriin
- Pienentävät häiriövirran pinta-alaa
- Vaimentavat EMC-häiriöitä (immunitetti, emissio)
- Toimivat pieni-impedanssisina energiatankkeina piirille (estää piiriä joutumasta värähtelevään tilaan)

Jos bypass-suodatusta ei tehdä kunnolla, voivat piirit alkaa käyttäytyä ennustamattomasti. Tällaisten vikojen haku on työlästä varsinkin, jos asianmukaisia mittalaitteita ei ole käytettävissä (piiri- tai spektrianalysointilaitteita). Bypass-kondensaattorit tulee piirilevyllä laittaa piiriin käyttöjännitteenastojen välittömään läheisyyteen ja jokaiseen käyttöjännitelinjaan pitää laittaa oma kondensaattori (ks. kuvio 19).



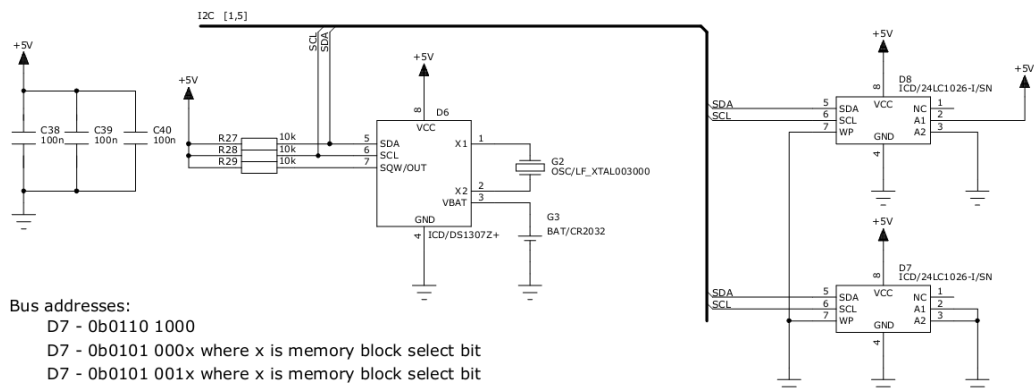
**KUVIO 19. Prosessorin bypass-suodatus**

### 5.1.3 EEPROM-muistit ja reaaliaikakello

Mittausjärjestelmän luoneeseen kuuluu, että se kykenee tallentamaan testaussektion omaan muistiinsa aikaleimalla varustettuna. Tätä varten tarvittiin reaaliaikakello, joka pitää kalenterin ja kellonajan tarkasti tiedossa sekä EEPROM-muistia, johon tallennetaan datanäytteet. Muistiksi valittiin kaksi kappaletta yhden megatavun EEPROM-muistipiirejä, jotka liittyvät prosessoriin I2C-väylän kautta.

Reaaliaikakellon virkaa toimittaa DS1307-piiri, joka saa tarkkuutensa 32 kHz kellokriestä. Tämä piiri liitetään samaan I2C-väylään muistipiirien rinnalle. Piireillä on eri osoite, joten kun kellopiiriä luetaan, muistipiirit eivät mene sekaisin. Kellopiirillä on oma muistinvarmennusparisto, jolla luvataan kellon ajan pysyminen tarkkana 10 vuotta. Kuviossa 20 on esitetty I2C-väylään kytkettävien laitteiden kytkentäkaavio.

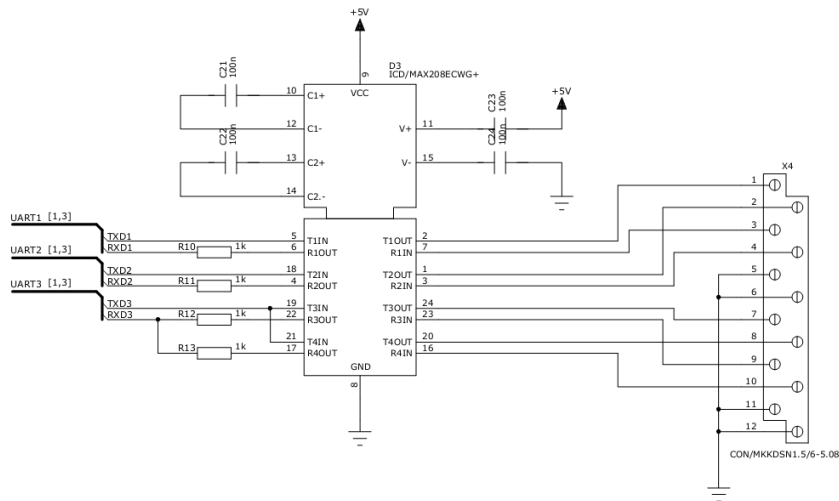
## Real Time Clock &amp; EEPROM Memory



## KUVIO 20. EEPROM-muistin ja reaaliaikakellon kytkeminen I2C-väylään

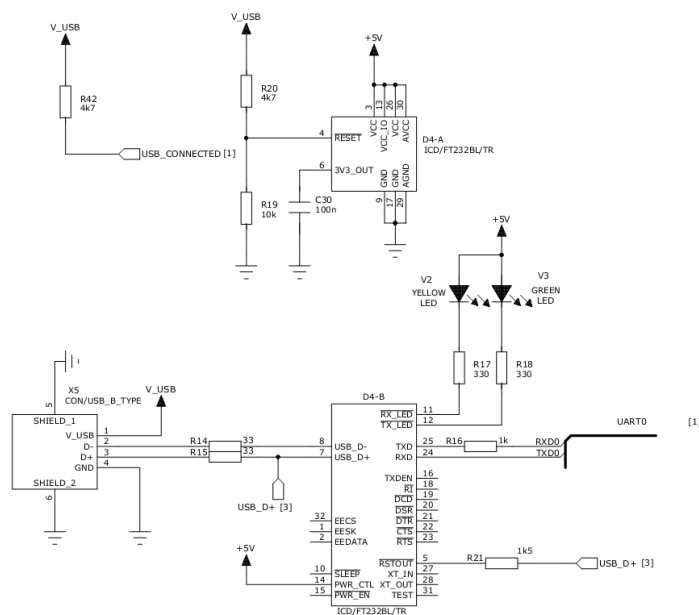
## 5.1.4 UART- ja USB-liittynät

Testattavat mittalaitteet liitetään pääsääntöisesti testiasemaan sarjaliikenneväylää (UART) pitkin ja isäntätietokone USB-väylää pitkin. Prosessorilta tuleva UART-väylä on TTL-tasoinen ja se pitää muuntaa RS232-tasoiseksi. Tämä RS232-signaali voidaan sitten muuttaa jälkeinpäin vaikka ethernetiksi-väyläksi, joka mahdollistaa röntgenmittalaitteen kytkemisen järjestelmään. RS232-tasoinen signaali tarkoittaa sitä, että signaali vaihtelee -10 voltin ja + 10 voltin välillä. Nämä jännitteet luodaan MAX208-piirin sisäisellä jännitepumpulla. Kuviossa 21 on esitetty TTL-tasaisen UARTin muuntaminen RS232-tasoiseksi sarjaliikenneväyläksi.



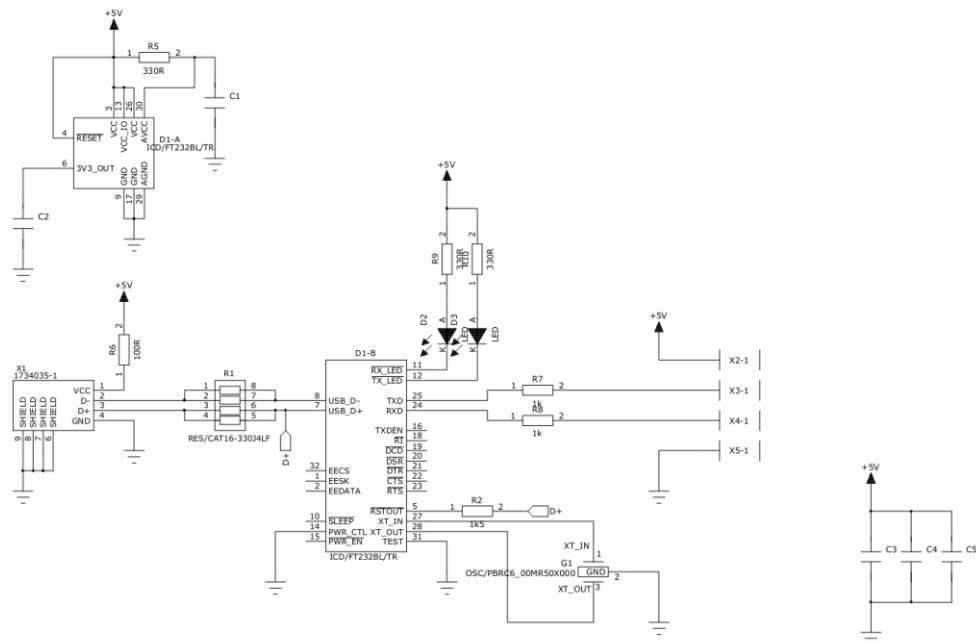
### KUVIO 21. TTL-tasoisien UARTin muuntaminen RS232-tasoiseksi

Tietokoneen USB-liityntä on oikeasti sarjaliikenneväylä, mutta se muunnetaan FTDI:n piirillä USB-väylään sopivaksi. Tällöin testausympäristö näkyy tietokoneella virtuaalisena sarjaliikenneväylänä, jota pitkin tiedonsiirto tapahtuu. Kuvio 22 osoittaa USB -> UART muunnoksen.



### KUVIO 22. UARTin muuntaminen USB-väylään sopivaksi

Kuvion 22 kytkentäkaavio osoittautui virheelliseksi, minkä takia USB-UART-muunnos suunniteltiin uudestaan. Uuden kytkennän kytkentäkaavio on kuviossa 23.

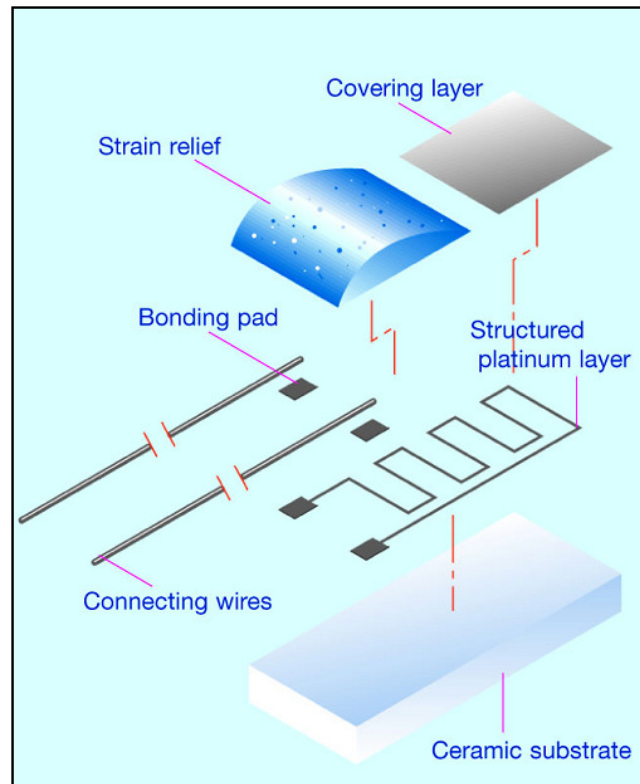


**KUVIO 23. Korjattu USB-UART-muunnin**

### 5.1.5 Lämpötilan mittaaminen

Lämpötilan mittaaminen toteutetaan neljällä PT100-anturilla, joista kolme mittaa testikaapin sisälämpötilaa ja yksi ulkoilman lämpötilaa. Näiden antureiden arvot luetaan ratiometrisellä Kelvinin nelijohdinmittausmenetelmällä, joka kompensoi lämpötila-anturin johdon resistanssin pois mittaustuloksesta. Tämä mittaussuunnitelma on erittäin tehokas ja yhdistettynä 24-bittiseen AD-muuntimeen sillä voidaan mitata lämpötilaa jopa asteen sadasosan tarkkuudella. Tässä sovelluksessa tarvitaan kuitenkin vain 0,1 asteen lämpötilaresoluutio.

PT100-anturi on resistanssin muutokseen perustuva lämpötila-anturi, jonka valmistukseen käytetään ohutta platinaliuskaa. Tämän platinaliuskan resistanssi muuttuu PT100-anturissa  $0,385 \Omega/^{\circ}\text{C}$  ja kun lämpötila on nolla astetta, on liuskan resistanssi  $100 \Omega$ . Tässä työssä PT100 -anturina käytetään Jumon valmistamaa pienikokoista lämpötila-anturia (tyyppi nro: 90/00089203). Kyseisen anturin rakenne selviää kuvista 24.



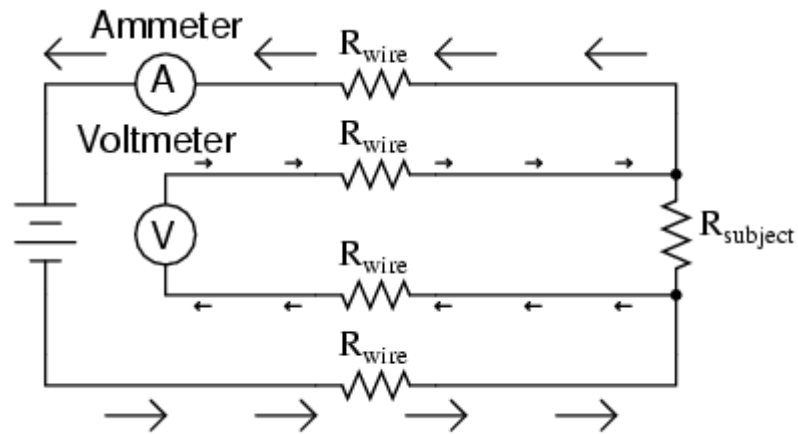
**KUVIO 24. PT100-anturin rakenne**

Platinakerros siirretään keraamisen alustan päälle käyttäen optista litografiamenetelmää. Tämän jälkeen platinaliuska kalibroidaan oikeaan perusresistanssiin laserin avulla. Kun anturin perusta on valmis, lisätään suojaava kerros, kytkentälangat ja kytkentälankojen vedonpoisto.

PT100-anturi on hyvin yleinen lämpötila-anturi teollisuudessa johtuen sen suuresta lämpötilan mittausalueesta, edullisuudesta ja luotettavuudesta. Tämän anturin lämpötila-alue on -70 asteesta +400 asteeseen ja hinta on viiden euron paikkeilla.

AD-muunninpiirinä käytetään Analog Devicesin AD7793-piiriä. Tässä piirissä on kolme kanavaa, joista yhtä voi käyttää ulkoisen referenssjännitteen tuomiseen piirille. Lisäksi piirissä on kaksi ohjelmoitavaa vakiovirtageneraattoria ja piiriä käskytetään SPI-väylän kautta. Koska tarvitsemme neljä lämpötila-anturia ja piirissä on vain kaksi AD-muunnoskanavaa käytettävissä (kolmas varataan ulkoiselle referenssjännitteelle), pitää yksi kanava multipleksata neljäksi kanavaksi. Tähän käytetään analogista multi-





**KUVIO 26. Kelvinin mittauseriaate (allaboutcircuits, N.D.)**

Kuinka tämä periaate parantaa mittaustarkkuutta? Volttimittarin impedanssi on hyvin suuri, yleensä jopa kymmeniä megaohmeja, joten volttimittarin johdoissa ei kulje virtaa juuri ollenkaan. Jos virtaa ei kulje, ei synny jännitehäviöitä, jolloin volttimittari näkee saman jännitteen pitkienkin mittajohtojen päästä. Tällä tavalla saadaan kompensoitua anturin johtojen resistanssit pois mittaustuloksesta.

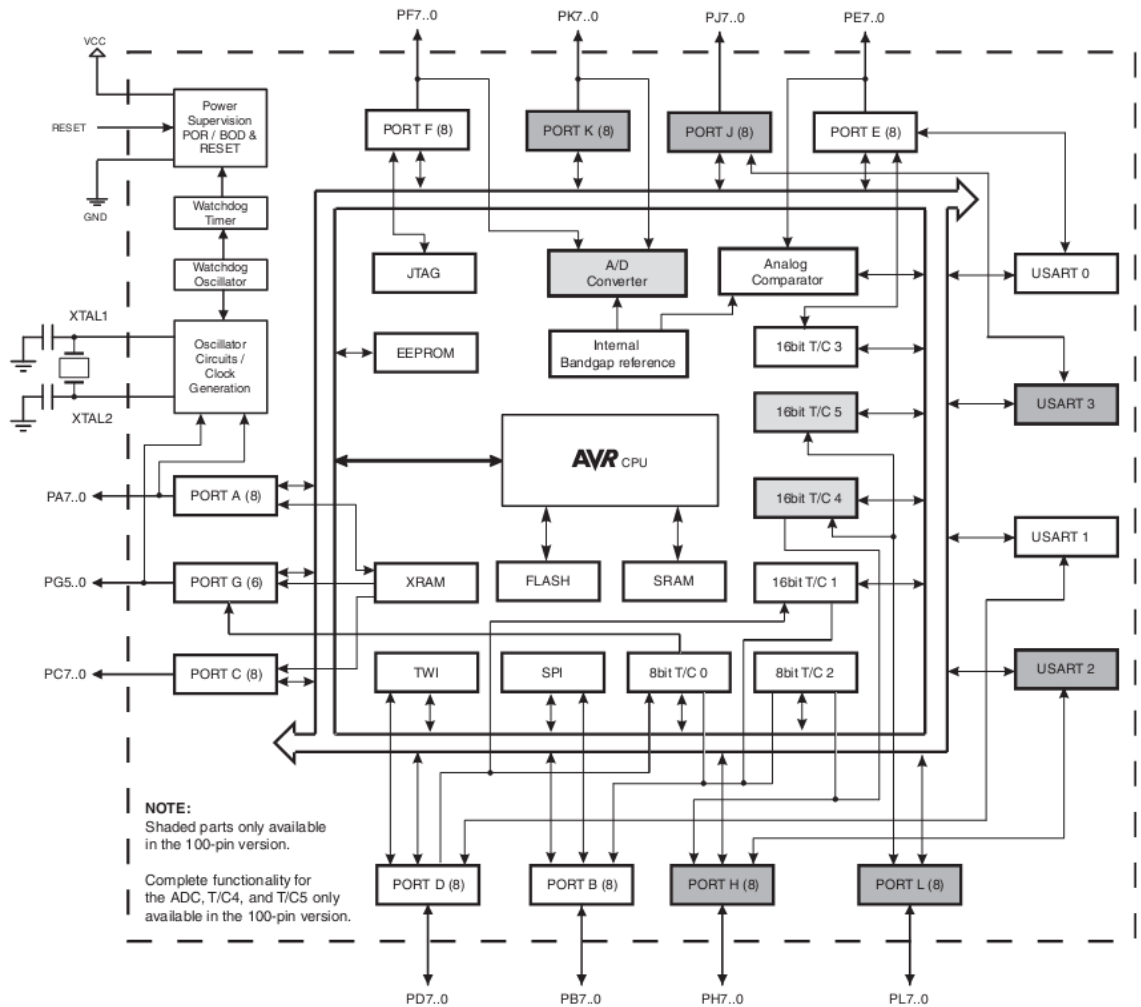
### 5.1.6 Prosessori ja sen lisälaitteet

Prosessori on koko emolevyn ydin. Se hakee, lähettää, käskyttää ja lukee kaikki muut lohkot ja toimii niiden antamien viestien mukaan. Prosessori on ohjelmoitu C-kielillä ja ohjelmasta ja ohjelmoinnista kerrotaan tarkemmin luvussa 7.

Prosessoriksi valittiin Atmelin AtMega2560 sen muistin suuruuden ja tähän soveltuvan suorituskyvyn takia. Lisäksi AtMega-sarja on itselleni hyvin tuttu monien vuosien ajalta. Prosessoria tahdittaa 14,3765 MHz kide. Kiteen erikoinen kellotaajuus mahdollistaa sarjaliikennedatan siirtymisen virheettömänä.

Prosessorin sisältää monia erilaisia lisälaitteita, joita hallitaan prosessorin rekisterien välityksellä. Kuviossa 27 on esitelty prosessorin sisäiset lohkot.

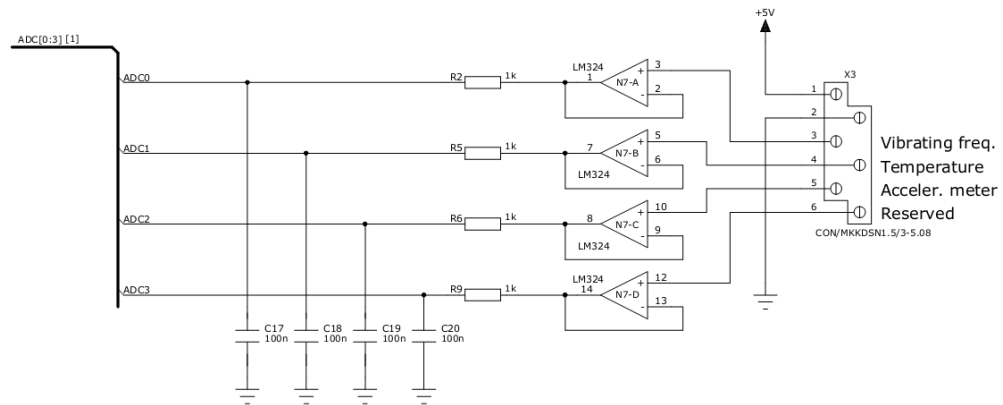




**KUVIO 27. Prosessorin lohkoakaavio**

Kuten kuvioista 27 näemme, nykyaikainen 8-bittinen prosessori on melko kompleksinen rakennelma.

Yksi prosessorin sisäisistä lisälaitteista, on 10-bittinen AD-muunnin. Sillä luetaan lämpötila- ja värinääsäätöpotentiometriä arvoita. Lisäksi sillä luetaan värinäanturin kiihtyvyyden arvot Z-akselin suuntaisesti. Tällaiset analogiset sisääntulot kannattaa puskuroida kuvion 28 osoittamalla tavalla. Puskurissa on myös alipäästösuodin, joka rajoittaa kaistanleveyden noin 1,6 kHz:iin.



**KUVIO 28. Analogisten sisääntulojen puskurointi ja suodatus**

Proessorissa on myös kuusi kappaletta ajastin-laskureita, joita hyödynnetään eri tavoin. Yksi ajastin hoitaa ohjelman synkronoinnin, toinen tahdittaa AD-muunninta ottamaan näytteitä signaalista jne. Nämä ovat erittäin tärkeitä prosessorin toimivuuden kannalta mahdollistaen prosessorin synkronisen toiminnan.

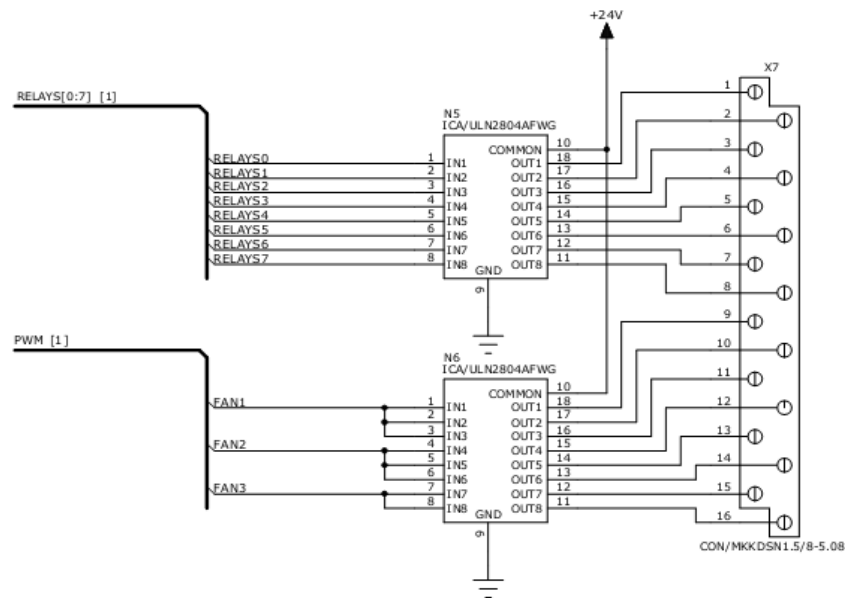
SPI-, I2C- ja UART-väylien ohjaimet ovat rakennettu prosessorin sisälle, jolloin niitä ei tarvitse toteuttaa ohjelmallisesti. Tämä nostaa prosessorin suorituskykyä, koska nyt ohjelman ei tarvitse odottaa, milloin data on lähetetty esim. sarjaliikenneväylään.

### 5.1.7 IO-linjat ja niiden puskurointi

Yksi syy, miksi tähän projektiin valittiin prosessoriksi AtMega2560, on vaadittavien IO-linjojen (input / output) määrä. Kyseisessä prosessorissa niitä on 86 kpl. Osa näistä linjoista on varattu mm. väylille, AD-muuntimelle, lcd-näytölle ja näppäimistölle ja loput on jätetty vapaaseen käyttöön. Nämä pinnit ohjaavat releitä, ohjauskeskuksen indikaattoreita ja puhaltimia ja lukevat ohjauskeskuksen painikkeita.

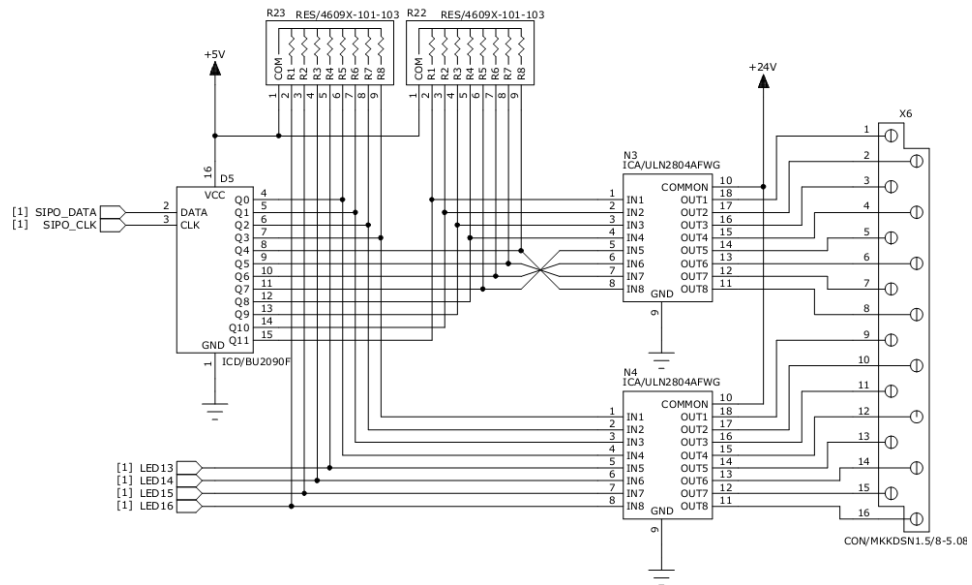
Koska lamput, releet ja puhaltimet vaativat 24 V jännitteen, pitää prosessorin IO-linjat puskuroida siten, että ne kykenevät ohjaamaan 24 voltin laitteita. Puskurointi tehdään tässä tapauksessa ULN2803-transistoriverkkopiirillä, jonka lähdöt ovat open collector-tyylisiä. Tästä avoin kollektori lähdöstä on kytketty piiriin sisäisesti suojadiodi, joka ohjaa kuormasta syntyvät jännitepiikit käyttöjännitelinjaan. Ilman sisäistä

suojadiodia, jännitepiikit voivat olla kilovolttien suuruisia ja voivat tuhota puskuripiirin. Kuviossa 29 on esitelty puskuroidin kytkentäkaavio.



**KUVIO 29. IO-linjojen puskuroidinti**

Vaikka prosessorissa onkin paljon IO-linjoja, loppuivat ne kuitenkin kesken. Tästä syystä Serial-In-Parallel-out-siirtorekisteripiiriä käytetään laajentamaan ulostulojen määrää. Tämä BUF2090F-piiri laajentaa kaksi ulostuloa 12 ulostuloksi. Tämän BUF2090F-piirin ulostulot ovat puskuroidu kestämään 24 voltin ohjausjännitteet samalla periaatteella, kuin kuviossa 29 (ks. Kuvio 30).

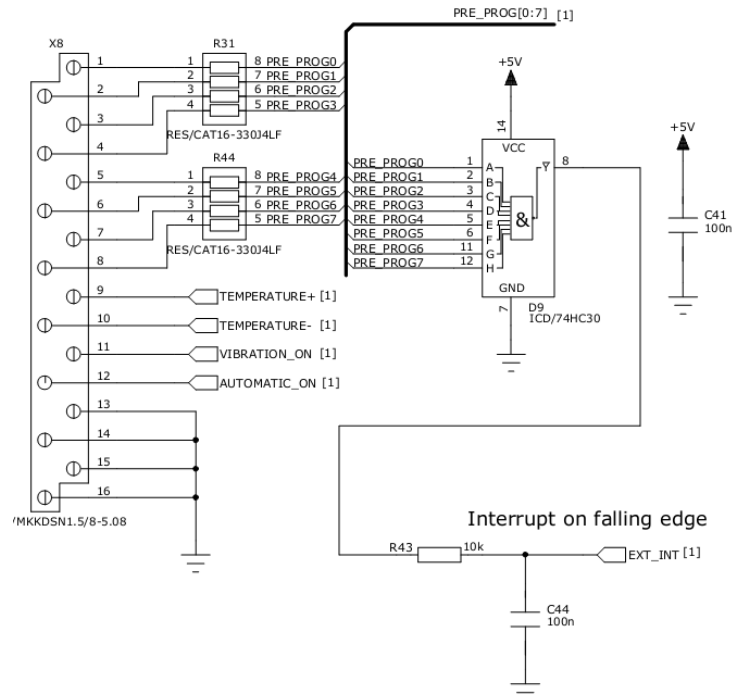


**KUVIO 30. Serial-In-Parallel-Out-piiri ja sen puskurointi**

Sisääntulolinjat on suojattu 33 ohmin sarjavastuksella. Kun prosessorin pinni kytketään sisäisesti sisäänmenoksi, menee pinni korkeaimpedanssiseen tilaan, joka tarkoittaa sitä, että pinni ei kuormita kytkintä tms. luettavaa laitetta juuri ollenkaan. Sisääntulolinjassa on kuitenkin hyvä käyttää sarjavastusta tahattomien oikosulkujen estämiseksi.

Kytkimien lukemiseen ohjelmallisesti on muutama eri tapa. Pollaavalla ohjaustyyliä tarkoitetaan sitä, että isäntälaitte, eli prosessori, käy kysymässä näppäimeltä ”onko sinua painettu?”. Jos kytkintä on painettu, suoritetaan tarvittavat toimenpiteet. Tällainen jatkuva kyseleminen käyttää prosessorin resursseja turhaan, joten siksi on järkevämpää käyttää keskeyttävää ohjaustyyliä. Keskeyttävällä ohjaustyyliä tarkoitetaan sitä, että kytkin sanoo prosessorille ”Minua on painettu. Tule lukemaan minun tilani!”. Nyt prosessori voi itse priorisoida kytkimen lukemisen ja käydä lukemassa kytkimen tilan, kun se ennättää. Kuviossa 31 on esitelty, kuinka ohjauskaapin näppäimien painallukset luovat keskeytyksen 74HC30-piiriin avulla.

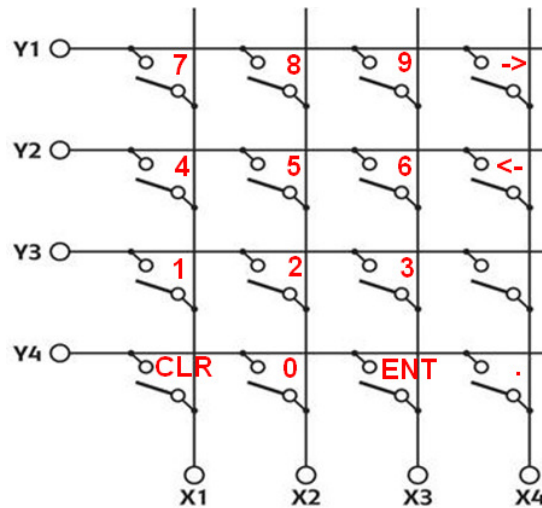
## BUTTONS AND SWITCHES



**KUVIO 31. Sähkökaapin kannen kytkimien keskeytysgeneraattori**

### 5.1.8 Näppäimistö ja LCD-näyttö

Näppäimistönä tässä työssä käytettiin Apemin valmistamaa 16 näppäimistä kalvonäppäimistöä, johon saa vaihdettua näppäinten tekstit. Nämä 16 näppäintä on kytketty 4x4 matriisiin, joka vähentää prosessorilta tarvittavien pinnien määrää, ja näin voidaan hyödyntää prosessoria paremmin. Kuviossa 32 on esitetty näppäinmatriisin toimintaperiaatetta.



**KUVIO 32. Näppäinmatriisin toimintaperiaate**

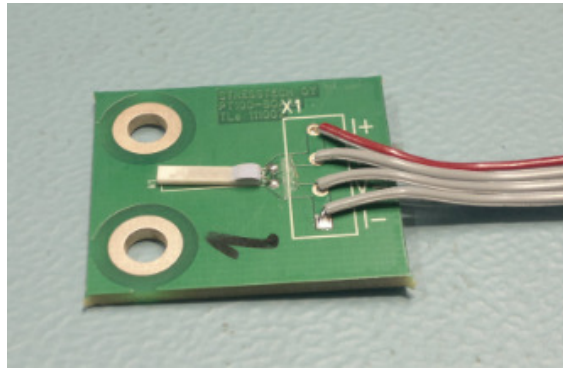
Näppäinmatriisin lukeminen tapahtuu seuraavasti. Prosessori ohjaa linjan Y1 tilaan yksi ja linjat Y2 – Y4 tilaan nolla. Linjat X1-X4 on asetettu sisääntuloiksi, joita prosessori kuuntelee. Kun Y1 on asetettu tilaan yksi ja prosessori lukee X2-linjasta tilan yksi, on näppäintä 8 painettu. Kun taas Y4 on asetettu tilaan yksi ja prosessori lukee linjasta X3 tilan yksi, on ENT-näppäintä painettu.

LCD-näyttöä ohjataan 8-bittisen rinnakkaisväylän ja viiden ohjaussignaalin avulla.

LCD-näytön koko 4x40 merkkiä, joka riittää tämän järjestelmän käyttämiseen hyvin.

## 5.2 Lämpötila-anturi

Lämpötila-anturin piirilevy ei sisällä mitään muuta kuin pädit anturikaapelin juottamiselle ja itse anturille. Lisäksi levyllä on 3 mm kiinnitysreiät, joista levyn saa tarvittaessa testauskaappiin kiinni (ks. kuvio 33).

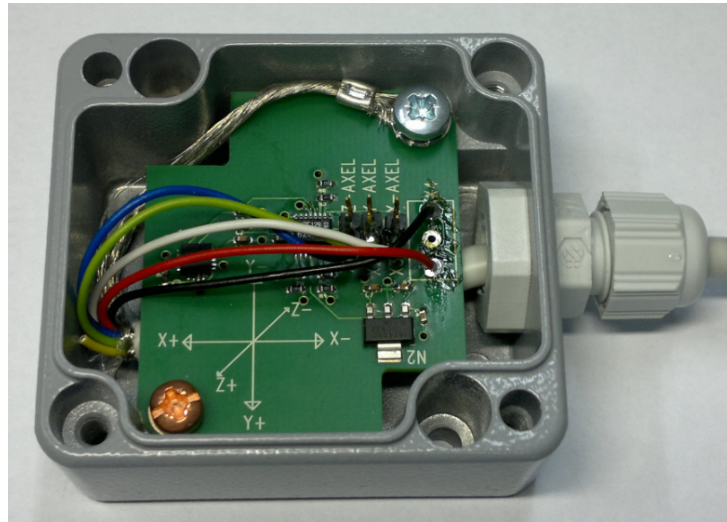


**KUVIO 33. Lämpötila-anturin piirilevy kasattuna**

## **5.3 Tärinäanturi**

### **5.3.1 Tärinäanturin rakenne**

Tärinäanturin piirilevy koostuu pienestä regulaattorista, tärinäanturista ja tasomuunninvahvistimesta. Tärinäanturi antaa kiihtyvyydestiedon jännitearvona, jossa jännitealue  $0 - 3 \text{ V}$  vastaa  $-4 - 4 \text{ g}$ :n kiihtyvyyttä. Tämä jännitesignaali pitää vahvistaa siten, että jännitealue on  $0 - 5$  voltia. Näin saadaan suurempi resoluutio kiihtyvyyden mittaamiseen. Tärinäanturilevy sijoitetaan pieneen alumiiniseen koteloon, joka kiinnitetään testauskaapin runkoon (ks. kuvio 34). Tällöin tärinämoottorin aiheuttamat tärinät eli kiihtyvyydet siirtyvät mahdollisimman suoraan kiihtyvyyssanturille.



**KUVIO 34. Tärinäanturin piirilevy sijoitettuna alumiinikoteloon**

Koska tärinäaiheuttajana on epäkeskomoottori, (tärinä aiheutuu pyörivästä liikkeestä) on tärinäsignaalin muoto sinisignaali, jonka taajuus ja amplitudi muuttuvat. Taajuutta ei tarvitse mitata, koska moottorin pyörimisnopeus on sama, kuin moottoria pyörittävän vaihtosähkön taajuus. Jos moottori kytketään 50 Hz vaihtosähköön, pyörii moottori 50 Hz:n taajuudella eli 3000 rpm. Todellisuudessa tärinän taajuus ei ole näin yksiselitteinen asia. Kun systeemiin kohdistetaan tärinää ulkopuolelta, alkavat systeemin omat osat tärinästä omalla resonanssitaajuudella. Tätä voidaan selventää kitarankieliesimerkillä. Muusikkokaan ei kuule kitarasta 10 Hz taajuutta näppäilemällä kieltä 10 Hz taajuudella, vaan kitarasta kuuluu kielen resonanssitaajuus. Jotta systeemin tärinät ja niiden taajuudet voitaisiin kartoittaa kunnolla, on perehdyttävä signaalin käsittelyyn, tarkemmin FFT-muunnokseen, josta kerrotaan luvussa 7.8 lisää.

Tärinän voimakkuus voidaan mitata suoraan kiihtyvyyssanturilta tulevan signaalin amplitudista, mutta tästä tiedosta emme saa selville, millä taajuudella voimakkain tärinä on. Tästä syystä voimakkuus luetaan FFT-muunnoksen tuloksesta.

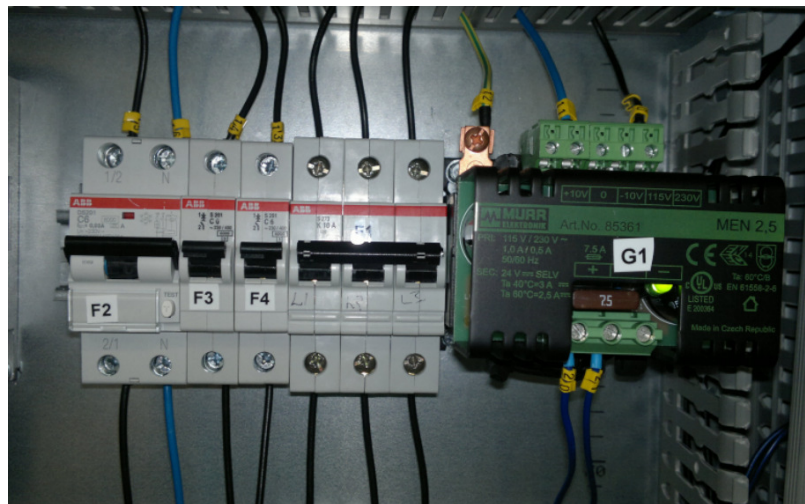
Kiihtyvyyssanturiksi valitsin mems-pohjaisen (Micro Electronic Mechanic Sensor) anturin. Tekniikan julkaisun 3T:n numerossa 11 on kuvattu kiihtyvyyssanturin rakenne ja valmistaminen melko selkeästi (ks. Liite 2).



## 6 OHJAUSKESKUS

### 6.1 Päävirtapiirin komponentit

Päävirtapiiri koostuu päävirtakytkimestä, pääsulakkeesta ja muuntajasta, joka luo emolevylle tarvittavan 24 voltin jännitteen. Päävirtakytkimen virrankesto on 25 ampeeria ja pääsulake, eli johdonsuojakatkaisin laukeaa, kun 10 ampeerin virta ylittää. Kaikki sähkötk kulkevat päävirtakytkimen kautta, joten jos järjestelmä pitää saada sähköttömäksi, niin se onnistuu päävirtakatkaisimesta. Kuviossa 35 on esitelty pääsulakkeet, pistorasioiden sulakkeet ja 24 voltin muuntaja.



KUVIO 35. Sähkökaapin päävirtapiirin komponentteja.

### 6.2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja (ks. kuvio 36) on laite, jolla ohjataan vaihtovirtamoottoreiden roottorin pyörimisnopeutta muuttamalla vaihtovirran taajuutta ja amplitudia. Roottorin pyörimisnopeus on suoraan verrannollinen vaihtovirran taajuuteen. Yksinapainen vaihtovirtamoottori kytkettynä suomalaiseen sähköverkkoon pyörii 50 Hz:n taaju-

della, eli 3000 kierrosta minuutissa. Tässä työssä tärinän taajuutta pitää säätää 10 hertsistä 80 hertsiin.



**KUVIO 36. Taajuusmuuttaja asennettuna ja valmiina ohjaamaan moottoria.**

Taajuusmuuttaja aiheuttaa paljon EMC-häiriöitä, minkä takia taajuusmuuttajan ja moottorin välinen sähkökaapeli on suojattu kuparipunoksella. Tämä punos maadoteetaan huolellisesti. Lisäksi moottorin ja taajuusmuuttajan välinen liitin on metallirunkoinen, joka mahdollistaa EMC-suojan jatkumisen katkeamattomana moottorille asti.

### 6.3 Pistorasiat ja hätäseispainike

Sähkökaapin kylkeen laitettiin neljä kappaletta pistorasioita, joihin kytketään lämmitys- ja jäähdytys-elementit ja mittalaitteet. Nämä pistorasiat ovat suojattu kuuden ampeerin automaattisella johdonsuojakatkaisijalla. Lisäksi lämmityselementti on suojattu vikavirtasuojalla. Jokaista pistorasiaa ohjataan omalla releellä. Näin voidaan prosessorilta ohjata jokaiseen pistorasiaan erikseen virta.

Releiden käyttöjännite kulkee hätäseiskytkimen kautta. Kun kytkintä ei ole painettu, kulkee virtalähteen 24 voltin jännite releille. Jos kytkin painetaan alas, menee edellä

mainittu releiden jännitelinja poikki ja kaikki releet palaavat OFF-tilaan. Taajuusmuuttajan START-komento kulkee neljännen releen kautta, ja tämän releen ohjausjännite tulee myös hätäseispainikkeen kautta. Näin saamme myös moottorin pysähtymään hätätilanteessa.

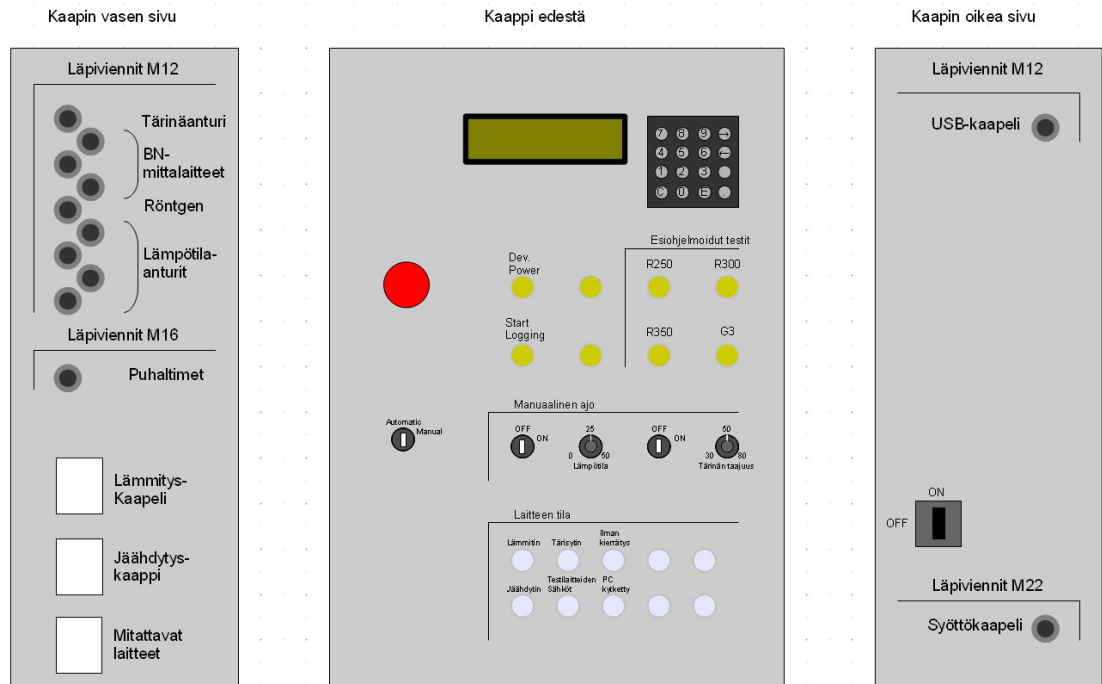
#### **6.4 Ohjauskeskuksen kannen indikaattorit ja painikkeet**

Ohjauskeskuksen kanteen laitettiin useita kytkimiä ja indikaattoreita, joilla voidaan ohjata keskuksen toimintoja. Siitä voidaan ohjata kaappi manuaaliseen tai automaattiseen tilaan. Manuaaltilassa värinän ja lämpötilan ohjaus tapahtuu potentiometreillä. Lämpötilaa voidaan säätää nolasta asteesta 50 asteeseen ja värinää 10 hertsistä 80 hertsiin. Manuaaltilassa voidaan erikseen käynnistää datan näytteenotto. Tallennotettu manuaalinen testausseisio voidaan myöhemmin siirtää tietokoneelle analysointia varten.

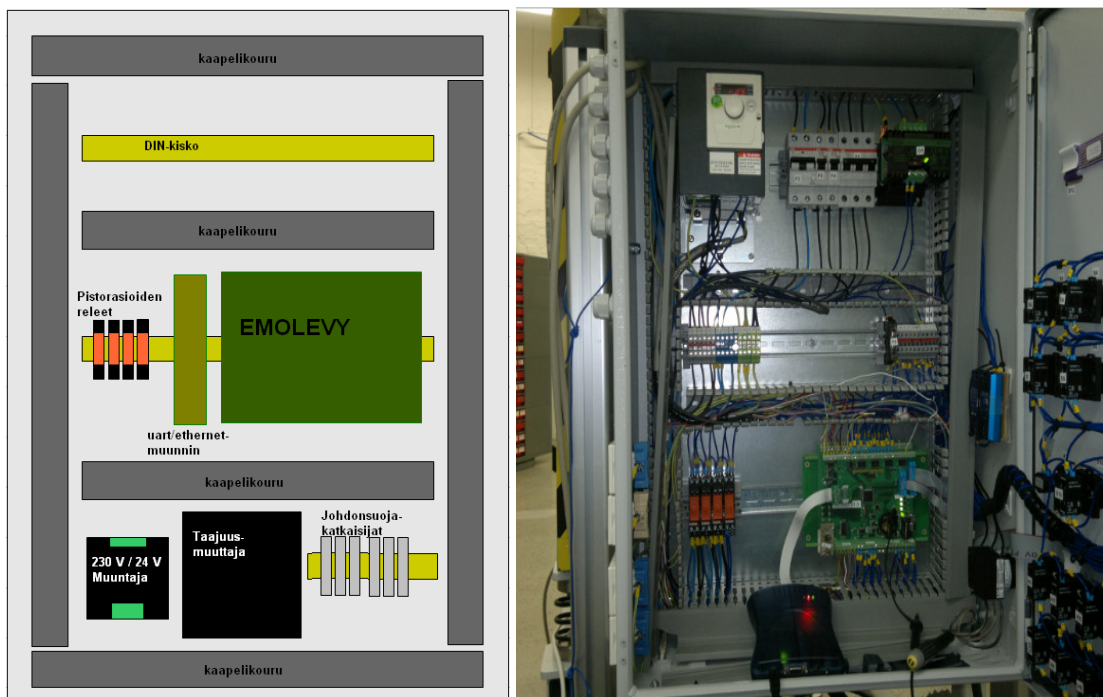
Automaattisessa moodissa voidaan ajaa esiohjelmoituja testejä. Nämä esiohjelmoituidut testit on luotu tietokoneella. Yhdessä testissä voi olla 40 parametria, joka mahdollistaa monipuolisten värinäsekvenssien tai lämpötilasykliä ajamisen.

#### **6.5 Ohjauskeskuksen rakentaminen**

Ohjauskeskus pyrittiin rakentamaan yleisten sähköstandardien mukaisesti. Keskuksen kytkennästä piirrettiin johdotuskaavio ja kaikki johdot numeroitiin. Tämä helpottaa mahdollista vianhakua tai muutoksien tekemistä tulevaisuudessa. Kuviossa 37 on esitelty hahmotelma, miltä kaappi näyttää ulkopuolelta. Kaapin reiät joko porattiin askelporalla tai tehtiin 22,5 mm lävistäjällä. Jokaiselle kaapelille asennettiin läpivientiholkki, joka toimii vedonpoistajana ja tiivisteenä. Näytön reikä tehtiin kuviosahalla ja viilalla.



KUVIO 37. Ohjauskeskuksen sijoittelukuva ulkopuolelta



KUVIO 38. Ohjauskeskuksen layoutsuunnitelma vasemmalla ja toteutus sisäpuolelta oikealta

## 7 OHJELMISTO

### 7.1 Reaaliaikakäyttöjärjestelmä

Reaaliaikakäyttöjärjestelmä (myöhemmin RTOS) on käyttöjärjestelmä, jolta vaaditaan todella nopeaa, eli reaaliaikaista vastetta herätteelle. Tämä tarkoittaa sitä, että kun esimerkiksi auto törmää johonkin, on turvatyynyjen laukeaminen välittömästi. Eli törmäysanturi aiheuttaa herätteen ja vasteena on turvatyynyn laukeaminen. Jos autossa käytettäisiin normaalia käyttöjärjestelmää, siirtyy törmäysanturin aiheuttama heräte johon jonnekin käyttöjärjestelmän ytimeen, josta prosessori käy joskus käsittelemässä herätteen. Tähän voi mennä aikaa jopa sekunteja, joten turvatyynyn laukeaminen voi jopa aiheuttaa enemmän vahinkoa.

Reaaliaikakäyttöjärjestelmän yksi tunnusmerkeistä on se, että koko ajan tiedetään, kuinka paljon aikaa tietyn tehtävän suorittamiseen prosessorilta kuluu. Tätä prosessoriajan jakamista suorittaa skeduleri, joka vaihtaa suoritettavaa tehtävää, mikäli uudella tehtävällä on suurempi prioriteetti, kuin jo suorituksen alla olevalla tehtävällä. Tästä syystä RTOS:n tärkein osa on skeduleri.

Tietokoneen käyttöjärjestelmä ei periaatteessa voi olla RTOS, koska tietokoneella voidaan tehdä niin paljon erilaisia asioita. On mahdotonta ennustaa tarkasti, kuinka paljon aikaa joidenkin operaatioiden suorittamiseen kuluu. Esimerkiksi kun aukaiset Internet-selaimen ja siirryt jollekin sivulle, ei tietokone voi tietää, kuinka nopeasti sivu latautuu. Sivun latautumiseen vaikuttaa mm. sivun koko ja nettiyhteyden nopeus. Täten RTOS yleensä rakennetaan yhden pienen sovelluksen ympärille. Toisin sanoen RTOS on todella tehokas omassa pienessä ympäristössään.

Onko sitten järkevää käyttää RTOS:a jokaisessa mikrokontrollerilla tehtävässä projektissa? Ei välttämättä. Se, milloin RTOS valitaan, riippuu projektin luonteesta ja arvioidusta koodin määrästä. RTOS:illa on helpompi hallita suurempaa järjestelmää, jossa on älykkäämpi käyttöliittymä tai monimutkaisempia mittauksia. Toisaalta sitten RTO-

Sin konfigurointi jokaiselle projektille sopivaksi vaatii aikaa. Itse päädyin tämän opin-  
näytetyön osalta siihen, että en käytä RTOSia. Päädyin tähän ratkaisuun seuraavien  
syiden takia:

- Järjestelmässä ei ole mitään aikakriittistä
- Jos joku mittaus myöhästyy, kukaan ei ole hengenvaarassa
- Arvioitu koodin määrä on alle 10 000 riviä
- En ollut juurikaan tutustunut eri RTOSien toimintaan, joten minulta olisi kulunut kohtuuttoman paljon aikaa sen konfiguroimiseen.

## 7.2 Ajurit

Ajureilla tarkoitetaan tässä yhteydessä lisälaitteiden konfiguroimista. Lisälaitteita ohjataan rekistereiden avulla ja näitä rekistereitä on lisälaitteesta riippuen parista rekisteristä yli kymmeneen rekisteriin. Lisälaitteella tarkoitetaan prosessorin sisäisiä ja piirilevylle tulevia ulkoisia laitteita. Koska prosessori on kahdeksanbittinen, ovat ohjausrekisteritkin 8-bittisiä muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta, esimerkiksi AD-muuntimen tulosrekisteri, joka pitää sisällään 10-bittisen tuloksen AD-muunnoksesta. Tämä nopeuttaa tuloksen lukemista, koska kahden 8-bittisen rekisterin sijaan tarvitsee lukea vain yksi 16-bittinen rekisteri.

Kun ajureita tehdään, on koodin kommentointi tärkeää. Kun koodin kommentoi koodia kirjoittaessa kunnolla, on myöhemmin helpompi tehdä ajuriin muutoksia. Kuviossa 39 on esimerkki, millä tyylillä tämän työn ajurit on ohjelmoitu ja kommentoitu.

```

// Configuration register (RS2 = 0, RS1 = 1, RS0 = 0, PWR_ON_RST = 0x0710)
/* [15:14] VBIAS          Bias voltage generator enable.
// [13]      BO          Burnout current enable bit.
// [12]      U/_B_       Unipolar/Bipolar bit.
// [11]      BOOST       Gain Select Bits.
// [10:8]    GAIN        Reference select bit. 0 = is external
// [7]       REFSEL      These bits must be written to zero
// [6:5]     0           If written to 1, ADC operates buffered mode
// [4]       BUF         This bit must be written to zero
// [3]       0           Channel selection bits      */
// [2:0]    CH_SEL

// Configure CONFIG_REGISTER
// [00]     Bias voaltage generator disabled
// [0]      No burn out currents
// [1]      Unipolar ADC
// [0]      No boost
// [000]    Gain to x1

// [0]      External reference
// [00]     Must be written to 0
// [1]      Use buffered mode
// [0]      Must be 0
// [000]    Use channel 0
tempArray[0] = 0b00010000;
tempArray[1] = 0b00010000;
WriteRegisterAD7793(tempArray, CONFIG_REGISTER);

```

### KUVIO 39. AD7793-AD-muunnospiirin rekisterien konfigurointia ja kommentointia

Kun koodi on kommentoitu vähintään yhtä hyvin, kuin kuviossa 39, voi rekistereihin tehdä muutoksia ilman datalehden lukemista. Lisäksi muiden ohjelmistokehittäjien on helpompi ymmärtää alkuperäisen ohjelmoijan ajatuksen juoksua. Tämäntasoinen kommentointi on alkuun hidasta, mutta myöhemmin kommentointiin käytetty aika saadaan nopeasti takaisin.

## 7.3 Muistin hallinta

Muistinhallinta on tärkeä osa tätä ohjelmistoa, koska koko testisession data tallennetaan I2C-väyläiseen EEPROM-muistiin. Muisti on segmentoitava itse, jotta prosessorin on helppo löytää tarvittava data nopeasti. Taulukossa 5 on esitelty, kuinka tässä työssä muisti segmentoitiin.

TAULUKKO 5. Muistin segmentointi

Muistin segmentointi	
Käyttötarkoitus	Muistin osoite
Testisessio 1	0x0000
Testisessio 2	0x0100
Testisessio 3	0x0200
Testisessio 4	0x0300
Laitteen 1 tiedot	0x0400
Laitteen 2 tiedot	0x0420
Laitteen 3 tiedot	0x0440
Datan tallentamisen aloittamisaika	0x0460
Tallennettujen näytteiden määrä	0x0470
Datan ensimmäinen näyte	0x0500

Ohjelmallisesti tuo segmentointi ei ollut vaikea toteuttaa, kunhan ensin saatiin muistinpiiriin ajuri toimimaan oikein. Tämän jälkeen määritetään vain #define-komennolla eri segmenttien muistiosoitteet, joten muistiin kirjoittaminen on melko yksinkertaista.

## 7.4 Tilakone

Koska tätä ohjelmistoa ei ole rakennettu reaaliaikakäyttöjärjestelmän päälle, piti kehittää joku toinen ratkaisu, jolla ohjelman kulku on helposti hallittavissa. Tilakone toimii tässä tarkoituksessa erittäin hyvin. Tilakoneen perusajatus on se, että ohjelma jaetaan useisiin eri tiloihin. Jokainen pienikin asia, esim. ledin vilkuttaminen kolme kertaa, voi olla oma tilansa. Tiloja vaihdetaan joko ulkopuolisten tai sisäisten herätteiden avulla. Ulkoisia herätteitä ovat mm.

- Näppäinpainallukset
- Tietokoneelta tulevat ohjauskäskyt
- Lämpötila tms. rajan ylittyminen

ja sisäisiä herätteitä on mm.



- Ajastin / laskurin pyörähtäminen ympäri
- Muut sisäiset keskeytykset
- Tila on suorittanut sille tarkoitetun tehtävän

Ohjelman rakenne on helppo esittää tilakonekaavion avulla, josta näkee kaikki ohjelman toiminnot (tilat) ja tilojen väliset riippuvuudet. Kun tämän kaavion pitää päivitettynä, on ohjelmavirheiden korjaaminen helpompaa ja koko ohjelman logiikan voi nähdä yhdellä silmäyksellä. Lisäksi, kun tekee ensin ohjelman rungon tilakonekaavion muodossa, on ohjelman ohjelmointikin helpompi tehdä. Liitteessä 1 on esitelty tämän projektin tilakonekaavion ensimmäinen versio.

## 7.5 Ajastimet

Tämän laitteen perustoiminnot, kuten kellonajan lukeminen RTC-piiriltä ja lämpötilantureiden luku, tapahtuvat synkronoidusti. Taulukko 6 esittää prosessorin eri ajastin/laskureiden ominaisuuksia ja käyttötarkoituksia tässä työssä.

**TAULUKKO 6. Prosessorissa käytetyt ajastimet**

<b>Ajastimet ja niin käyttökohteet</b>			
<b>Ajastin</b>	<b>Bitit</b>	<b>Keskeytystaajuus</b>	<b>Käyttötarkoitus</b>
Timer / Counter 0	8	Ei käytössä	Ei käytössä
Timer / Counter 1	16	4 kHz	Käynnistää AD-muuntimen, jolla luetaan mm. tärinäanturin signaali
Timer / Counter 2	8	Ei aiheuta keskeytyksiä	Puhaltimien PWM-ohjaus
Timer / Counter 3	16	100 Hz	Koko järjestelmän runko tai skeduleri. Tahdittaa lämpötilamittaukset, datan loggaamisen yms.
Timer / Counter 4	16	1 Hz	Tällä tahditetaan mitattavien laitteiden kyselyt.
Timer / Counter 5	16	Ei käytössä	Ei käytössä

## 7.6 Dataprotokolla tietokoneen ja testausjärjestelmän välillä

Dataprotokollalla tarkoitetaan ”kieltä”, jolla tietokone ja testausjärjestelmä kommunikoivat keskenään. Protokollalle ominaista on aloitus- ja lopetusmerkki. Tämä kertoo protokollan molemmille osapuolille, mistä kohdasta tietovirtaa oikeaa tietoa pitää alkaa lukea.

Tämän työn protokollaan aloitusmerkiksi valitsin merkin # ja lopetusmerkiksi merkin ;. Jokainen käsky siis on muotoa #xxxxxxx;, jossa x on siirrettävää dataa. Taulukkoon 7 on merkitty kaikki järjestelmän ohjaamiseen tarkoitetut komennot.

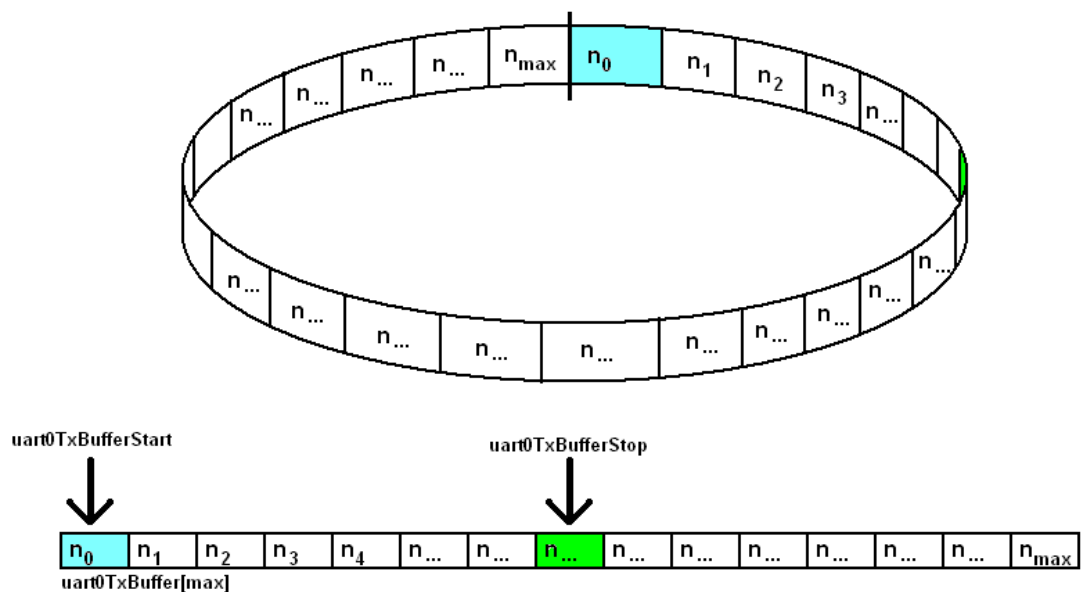
**TAULUKKO 7. Stresstest1000:n dataprotokolla**

<b>Stresstest1000 Dataprotokolla</b>			
<b>Suunta</b>	<b>Lähetys</b>	<b>Vastaus</b>	<b>Mitä tapahtuu</b>
PC > SS	#H;	#H;	Kättelysignaali, jolla tarkistetaan, onko yhteys kunnossa.
PC > SS	#WTD<>;	#WTD;	WriteTimeDate, eli kirjoittaa ajan ja päivämäärän järjestelmään. Datan muoto: #WTD150910090212; > 15:09:10 9.2.2012
PC > SS	#WTS<>;	#WTS;	WriteTestSequence, eli kirjoittaa testisession muistipaikkaan.
PC > SS	#RTD;	#RTD<>;	ReadTimeDate, eli pyyntö lukea järjestelmän aika ja päivämäärä. Vastaus on muotoa: #RTD15:09:10 09.02.2012;
PC > SS	#RDM;	#RDM<>;	ReadDataMemory, eli pyyntö lukea EEPROM-muistiin tallennettu data.
SS > PC	#S<>;	#S;	Sensordata, eli Stresstest lähettää lämpötila-anturien arvot PC:lle. Data siirtyy muodossa: "S213256235224;
SS > PC	#D1<>;	#D;	Kytkeyt mittalaitteet. D:n jälkeinen numero määrää, mistä mittapaikalta data tulee.. Data siirtyy muodossa: #DR250;
SS > PC	#X<>;	#X;	Releiden ja sähkökaapin vääntökytkimien asento.
SS > PC	#i1<>;	#I;	Kytkeytyn mittalaitteen ohjelmistoversio yms. I:n jälkeinen numero määrää, minkä mittapaikan laitteen infot lähetetään.

## 7.7 Sarjaliikenneväylien rengaspuskurit

Proessori ei osaa ennustaa, milloin esimerkiksi tietokone lähettää sille jotain dataa, joka pitäisi vastaanottaa. Proessori saattaa olla tekemässä jotain aikakriittistä tehtävää, jolloin se ei kerkeä käsittelemään tietokoneelta tullutta dataa. Tästä syystä sarjaliikenteen tuleva ja lähtevä data puskuroidaan. Kätevä tapa tämän datan puskuroimiseen on käyttää rengaspuskuria.

Rengaspuskurin toimintaperiaate on yksinkertainen. Luodaan taulukko, joka varastoi saapuvan datan. Lisäksi pitää luoda osoittimet, jotka osoittavat rengaspuskurin ensimmäiseen ja viimeiseen alkioon, joissa on dataa ja lippumuuttuja, joka aktivoituu aina, kun puskurin tyhjennys on käynnissä. Kuviot 40 ja 41 selventävät rengaspuskurin toimintaa.



KUVIO 40. Rengaspuskurin rakenne

```

#ifndef USE_UART0
#define UART0_TX_BUFFER_SIZE 500
#define UART0_RX_BUFFER_SIZE 500
// Uart global variables. Create Ring-buffer for transmitting
volatile char uart0TxBuffer[UART0_TX_BUFFER_SIZE];
volatile unsigned int uart0TxBufferStart=0, uart0TxBufferStop=0, uart0RxBufferIndex=0;
volatile char uart0RxBuffer[UART0_RX_BUFFER_SIZE];
#endif // USE_UART0

```

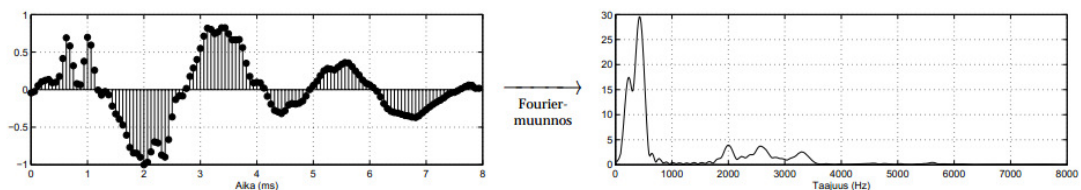
### KUVIO 41. Rengaspuskurin määrittely ohjelmassa

Kuviot 40 ja 41 kuvaavat tässä esimerkissä lähetyspuskuriä. Kun prosessorille tulee tarve lähettää dataa tietokoneelle (UART0), kirjoittaa prosessori datan lähetyspuskuriin. Lähetyspuskurin osoittimet muuttavat tilaansa aina, kun uutta dataa kirjoitetaan puskuuriin (stop-osoitin kasvaa) tai vanhaa dataa kirjoitetaan PC:lle (start-osoitin kasvaa). Jos stop-osoitin kasvaa suuremmaksi, kuin puskurin max-arvo, aloittaa stop-osoitin alusta. Lisäksi koodiin pitää kirjoittaa ehtolauseet, jotka varmistavat, että puskuuriin ei tule ylivuotoja. Kun puskurin data on lähetetty tietokoneelle (start-osoitin saavuttaa stop-osoittimen), nollataan molemmat osoittimet.

## 7.8 Fourier-muunnoksen pintaraapaisu

### 7.8.1 Mikä on Fourier-muunnos?

Kun halutaan tutkia signaalista, mitä taajuuksia se sisältää, pitää signaalille tehdä Fourier-muunnos. Toisin sanoen Fourier-muunnos muuttaa signaalin aikatasosta taajuustasoon. Kuviossa 42 vasemmalla puolella on aikatasossa mitattu signaalin amplitudia tietyllä näytteenottotaajuudella ja oikealla puolella tästä tuloksesta FFT-muunnettu kuvaaja (Huttunen, H. 2005).



KUVIO 42. Fourier-muunnos erälle signaalille (Huttunen, H. 2005)

Fourier-muunnoksella perustuu siihen olettamukseen, että jokainen signaali voidaan esittää sinin ja kosinin avulla. Eulerin kaavan mukaan siis

$$e^{ikt} = \cos(kt) + i \sin(kt).$$

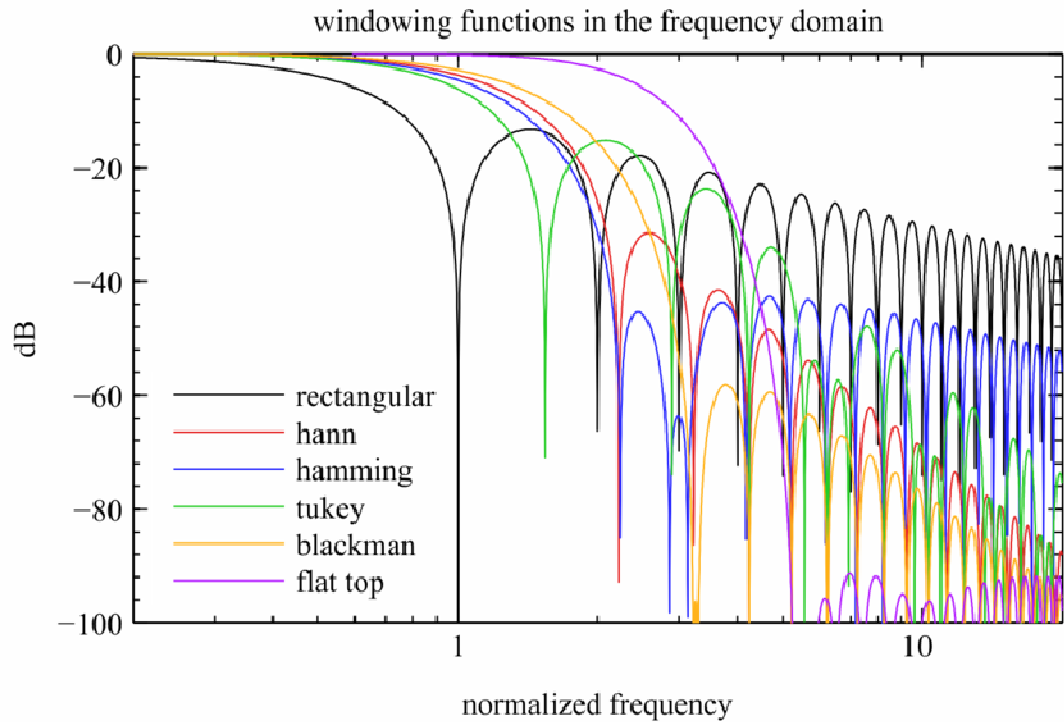
Fourier-muunnos esittää signaalin kompleksisten eksponenttifunktioiden avulla eli

$$\dots, e^{-3it}, e^{-2it}, e^{-it}, e^0, e^{it}, e^{2it}, e^{3it}, \dots$$

FFT-muunnos toimii myös toiseen suuntaan, eli taajuustasoisesta signaalista voidaan luoda aikatasoinen signaali (Huttunen, H. 2005).

### 7.8.2 Ikkunointi

Ikkunoinnilla tarkoitetaan signaalin suodattamista jonkun tunnetun kaavan mukaan. Toisin sanoen signaalinäytettä painotetaan painokertoimen (ikkunafunktion) mukaan. Ikkunointia käytetään, kun halutaan korostaa jonkun tunnetun kohteen tiettyä ominaisuutta. Kuviossa 43 esitellään muutama yleinen ikkunafunktio taajuustasossa.



**KUVIO 43. Ikkunafunktiota taajuustasossa (Wikipedia. 2012)**

Yksinkertaisin ikkunafunktio on rectangular-ikkuna, koska sen painotuskerroin on yksi. Se ei siis painota muunnettavaa signaalia ollenkaan. Ikkunafunktion valinta voi olla hankalaa ja ikkunan valinta riippuukin muutettavasta herätesignaalista. Taulukossa 8 on esitelty muutamia signaaleja ja niille soveltuvia ikkunafunktioita.

**TAULUKKO 8. Eri ikkunafunktioiden käyttökohteita.**

MIHIN TARKOITUKSEEN	SOVELTUVAT IKKUNAFUNKTIOT
Transientti, jonka pituus on pienempi, kuin ikkunan pituus	RECTANGULAR
Transientti, jonka pituus on suurempi, kuin ikkunan pituus	EXPONENTIAL, HANN
Yleiseen käyttöön	HANN
Spektrianalysiin	HANN
Kahden vierekkäisen taajuuden, joilla on eri amplitudi, erotte- luun	KAISER-BESSEL
Kahden vierekkäisen taajuuden, joilla on melkein sama ampli- tudi, erotte- luun	RECTANGULAR
Yhden taajuuden tarkkaan amplitudimittaukseen	FLAT TOP

### 7.8.3 DFT-muunnoksen laskeminen

Jotta voisi ymmärtää FFT-muunnosta, on tiedettävä kuinka DFT-muunnos eli diskreetti Fourier-muunnos lasketaan. DFT-muunnos lasketaan kaavalla

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n * e^{-i2\pi\frac{k}{N}n},$$

jossa

- $X_k$  on vastevektori
- $k$  on vastevektorin alkion osoitin
- $x_n$  on herätevektori
- $n$  on herätevektorin alkion osoitin
- $N$  on herätevektorin alkioiden määrä

Edellä mainittuun kaavaan syötetään herätevektori  $x_n$ , jonka DFT-muunnos lasketaan vastevektoriin  $X_k$ . Seuraava esimerkki selventää, kuinka kaavaa käytetään. DFT-muunnos lasketaan neljällä kuvitteellisella AD-muuntimella mitatulla arvolla ( $x_n$ ).

$$x_n = [-4, 3, 1, 5]$$

Vastevektorin ( $X_k$ ) ensimmäinen alkio lasketaan seuraavasti:

$$\begin{aligned} X_0 &= -4 * e^{-i2\pi\frac{0}{4}0} + \\ & 3 * e^{-i2\pi\frac{0}{4}1} + \\ & 1 * e^{-i2\pi\frac{0}{4}2} + \\ & 5 * e^{-i2\pi\frac{0}{4}3} = 5 \end{aligned}$$

Toinen alkio:

$$\begin{aligned} X_1 &= -4 * e^{-i2\pi\frac{1}{4}0} + \\ & 3 * e^{-i2\pi\frac{1}{4}1} + \\ & 1 * e^{-i2\pi\frac{1}{4}2} + \\ & 5 * e^{-i2\pi\frac{1}{4}3} = -5 + i2 \end{aligned}$$

Kolmas alkio:

$$\begin{aligned} X_2 &= -4 * e^{-i2\pi\frac{2}{4}0} + \\ & 3 * e^{-i2\pi\frac{2}{4}1} + \\ & 1 * e^{-i2\pi\frac{2}{4}2} + \\ & 5 * e^{-i2\pi\frac{2}{4}3} = -11 \end{aligned}$$

Neljäs alkio:

$$\begin{aligned} X_3 &= -4 * e^{-i2\pi\frac{3}{4}0} + \\ & 3 * e^{-i2\pi\frac{3}{4}1} + \\ & 1 * e^{-i2\pi\frac{3}{4}2} + \\ & 5 * e^{-i2\pi\frac{3}{4}3} = -5 - i2 \end{aligned}$$

DFT-muunnoksen tulos, eli vastevektori on

$$X_k = [5, -5 + i2, -11, -5 - i2].$$

Muunnoksen tulos sisältää nyt reaalisia ja imaginaarisia arvoja, joten taajuusspektriä tuloksesta ei vielä voida piirtää. Tulos pitää normalisoida, jotta magnitudispektri voidaan muodostaa. Normalisoinnilla tarkoitetaan vektorin pituuden laskemista. Normalisointi voidaan tehdä esimerkiksi hyödyntäen pythagoraan lausetta (Wikipedia, 2010).

$$A_k = |X_k| = \sqrt{\text{Re}(X_k)^2 + \text{Im}(X_k)^2},$$

Jossa

- $A_k$  on normalisoitu vektori
- $X_k$  on DFT:n vastevektori
- $\text{Re}()$  on vektorin reaaliosa
- $\text{Im}()$  on vektorin imaginaariosa

Muunnoksen normalisoitu vektori on siis vektorin hypotenuusan itseisarvo. Normalisoinnin jälkeen signaalia ei voida käänteismuuntaa takaisin aikatasoiseksi signaaliksi,

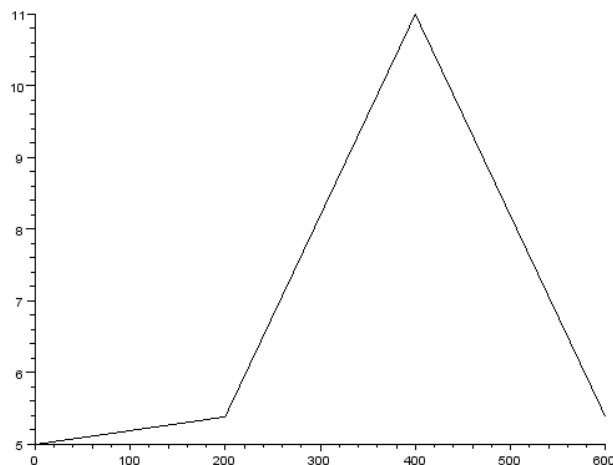


koska pythagoraan lauseessa häviää signaalin vaihetieto, eli missä kulmassa hypotenuusa on reaaliakselin suhteen.

Normalisoitu DFT-muunnos näyttää tältä:

$$A_k = [5, 5.385, 11, 5.385]$$

Kun normalisointi on suoritettu, pitää määrittää taajuusakseli piirrettävään kuvaajaan. Taajuusakseli määräytyy siten, että magnitudispektrin ensimmäinen alkio vastaa taajuutta 0 Hz ja viimeinen alkio vastaa näytteenottotaajuuden puolikasta (Nyquistin teoreema). Eli jos edellä laskettu DFT-muunnos on näytteistetty taajuudella 1,2 kHz, vastaa magnitudispektrin viimeinen alkio taajuutta 600 Hz. Kuvioon 44 on piirretty edellä mainittujen lähtökohtien pohjalta taajuusspektri.



**KUVIO 44. Neljästä AD-muuntimen näytteestä laskettu taajuusspektri**

Yleensä taajuusspektrin kuvaaja piirretään logaritmiseen asteikkoon. Tämä selkeyttää kuvaajan lukemista varsinkin silloin, kun taajuusalue on laaja (esim. 10 Hz – 10 MHz). Taajuuden voimakkuus esitetään myös yleensä desibeleinä.

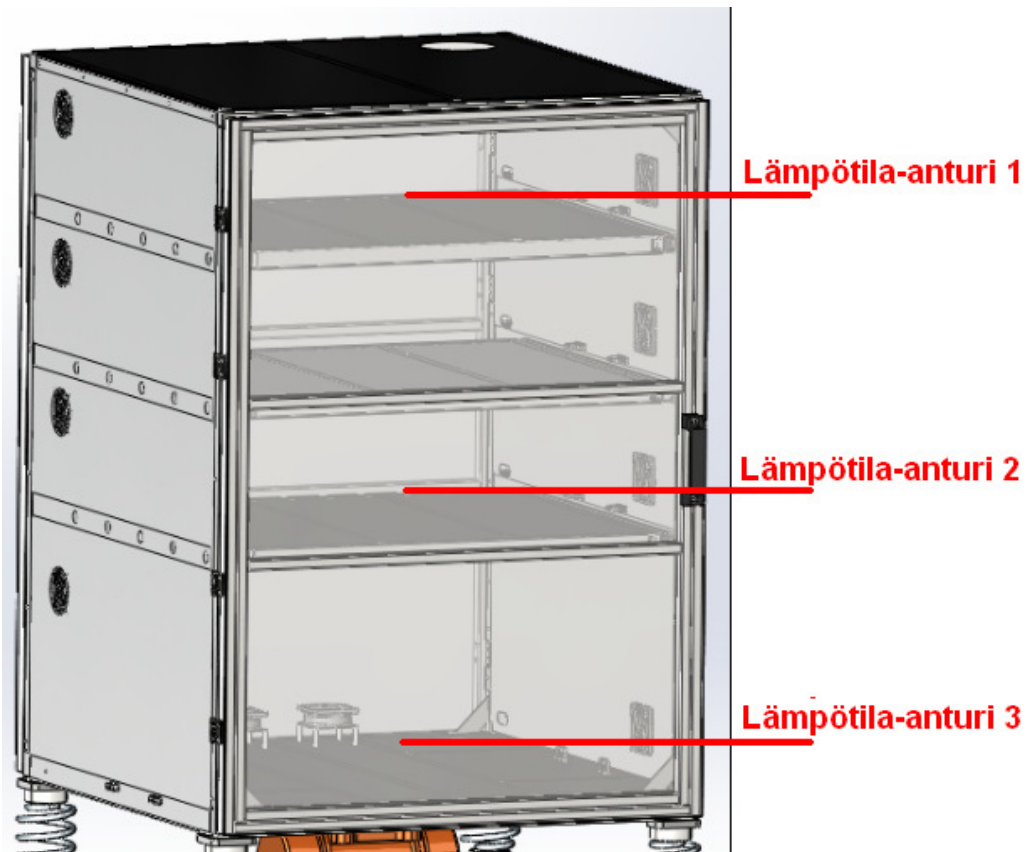
Laskuesimerkistä voidaan todeta, että DFT-muunnoksen laskemiseen tarvitaan  $N^2$  kertolaskua ja  $N(N-1)$  yhteenlaskua. Tämä tekee DFT-muunnoksen laskemisesta hidasta suurilla datamäärillä. Jos näytteitä on vaikka 1024 kappaletta, joudutaan DFT-

laskemiseen käyttämään yli miljoona kerto- ja yhteenlaskua. Ratkaisu tähän löytyy FFT-algoritmista. FFT-muunnoksen odotusarvo, eli laskutoimitusten määrä, on  $N \log N$ . Tämä tarkoittaa sitä, että 1024 näytteen muunnoksen laskemiseen tarvitaan vähän yli 3000 laskutoimitusta. Nopeusero on siis huikea, jonka takia DFT-muunnosta ei juuri käytetä missään (Huttunen, 2005).

## **8 TESTAAMINEN**

### **8.1 Lämpötilan muutosnopeuden säätäminen**

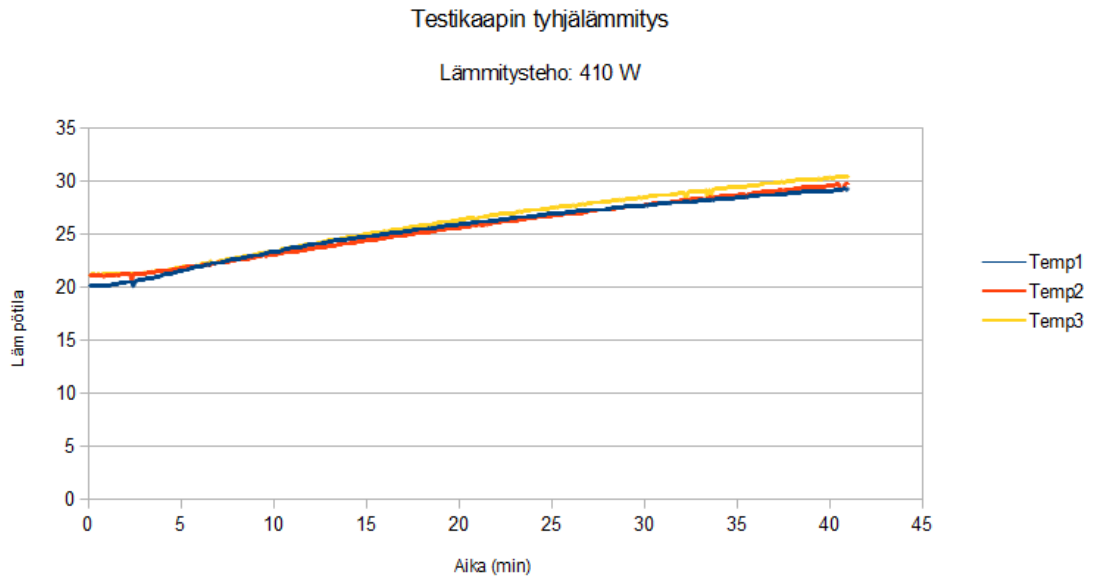
Kun testikaappi oli mekaanisesti ja sähköisesti valmis, aloitettiin testaaminen helpoimmasta testistä eli kuinka nopeasti n. 400 W:n lattialämmityskaapeli lämmittää kaapin sisätilan 50 asteeseen. Testauskaappiin kytkettiin lämpötila-anturit kuvion 45 osoittamille paikoille. Näille paikoille asetetaan Barkhausen-mittalaitteet todellisessa testaustilanteessa.



**KUVIO 45. Lämpötila-antureiden paikka testauskaapissa**

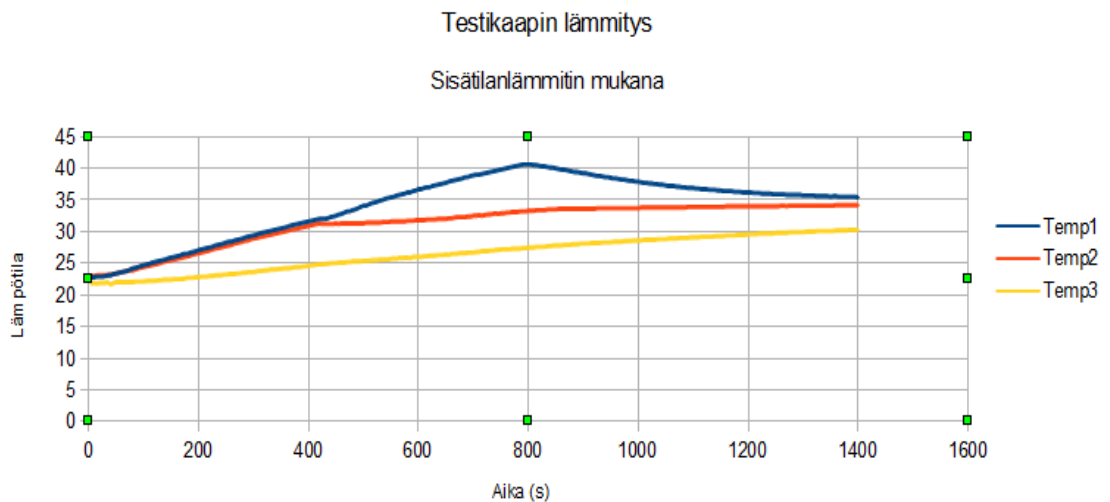
Kun kaikki järjestelyt oli valmiina, kytkettiin lämmitys päälle ja kohdelämpötila säädettiin 50 asteeseen.

Ensimmäinen testi osoitti, että lämpötilanmuutos pelkällä lämmityskaapelilla oli noin 10 °C tunnissa. Lisäksi havaittiin, että ilman sisäilmankierrättämistä kaapin yläosa lämpeni nopeammin kuin alaosa. Kaappiin lisättiin kaksi 80 x 80 mm puhallinta kierättämään sisäilmaa. Kuten kuvio 46 osoittaa, ilmankierrätys paransi lämmön jakautumista tasaisesti, mutta kaappi lämpeni edelleen liian hitaasti.



**KUVIO 46. Testikaapin lämmitys pelkällä lämmityskaapelilla.**

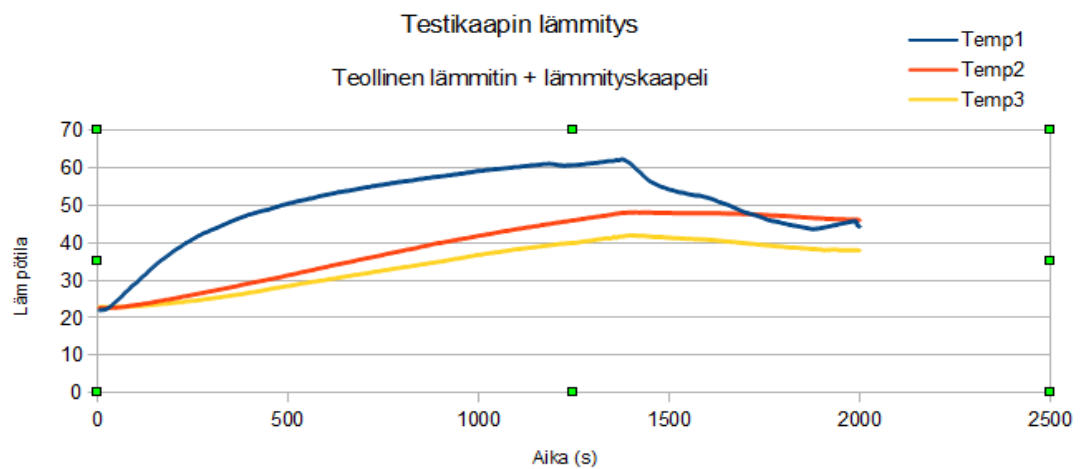
Kaappiin lisättiin kokeilumielessä auton sisätilanlämmitin, joka nosti kaapin lämmitystehon noin 1,5 kW:iin. Sisäilmankierrätystä jatkettiin, jotta lämpö jakautuisi tasaisesti. Kuvio 47 osoittaa, kuinka sisätilanlämmittimen lisääminen kasvatti lämmön muutosnopeutta.



**KUVIO 47. Testikaapin lämmitys sisätilanlämmittimen kanssa**

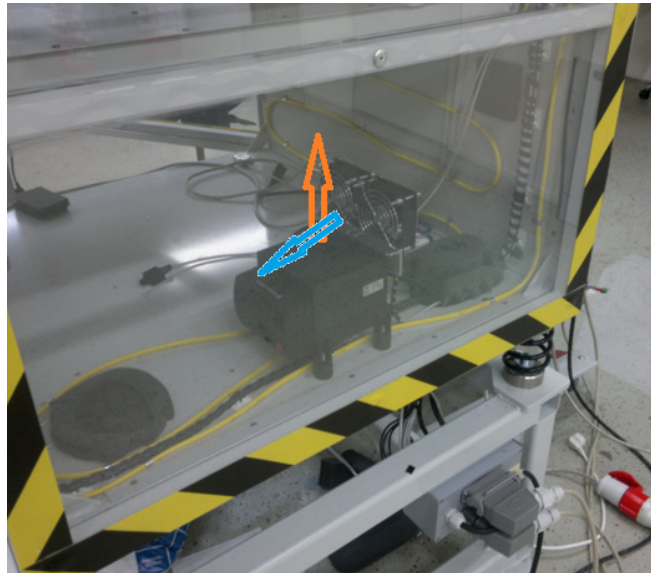
Kuviosta 47 nähdään, että kaapin yläosassa olevan anturin mittaama lämpötila nousi noin 18 astetta 13 minuutissa. 13 minuutin kohdalla kuitenkin sisätilanlämmittimen sisäinen lämpösuoja laukesi ja kaapin lämpötilat alkoivat tasaantua. Tällä ratkaisulla Kaapin lämpötilannousu saatiin riittävän nopeaksi.

Koska sisätilanlämmitin ei ole tarkoitettu tällaisiin kohteisiin, vaihdettiin tilalle teollisuuteen tarkoitettu lämmityslaite. Lämmityslaitteessa on säädettävä termostaatti ja suuri puhallin, joka edisti sisäilmankiertoa testikaapissa. Kuviosta 48 voidaan todeta, että lisälämmittimen ansiosta kaappi lämpenee nopeasti, mutta epätasaisesti.



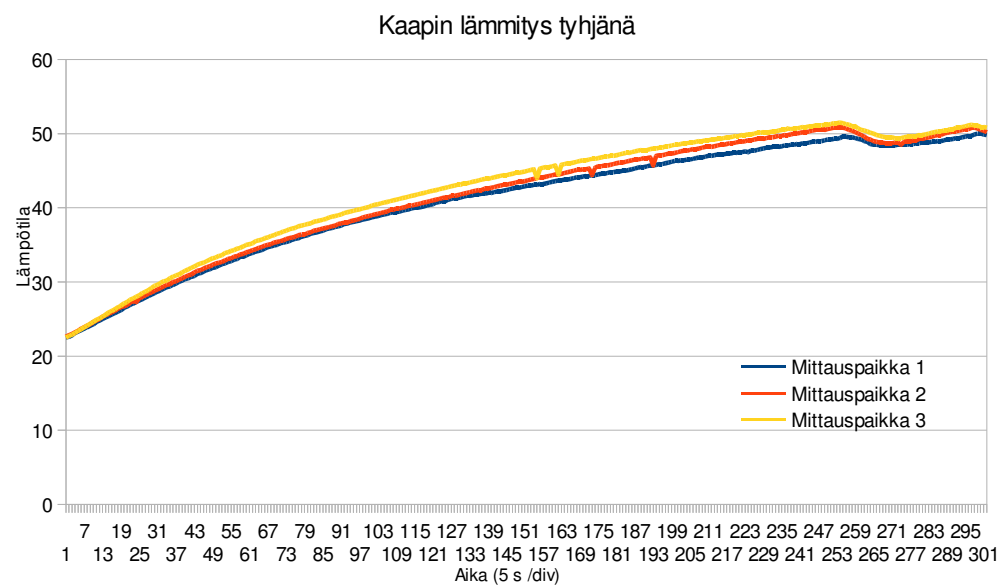
#### KUVIO 48. Testikaapin lämmitys teollisella lämmittimellä

Lämpötilan jakautumista säädettiin sisäilmankierrätyspuhaltimien avulla. Toimivaksi ilmankierros havaittiin, kun lämmityslaite puhaltaa kuumaa ilmaa ylöspäin ja kaksi puhallinta työntää tätä kuumaa ilmaa kaapin alaosaan (ks. kuvio 49).



**KUVIO 49. Lämmittimen ja ilmankierrätyspuhaltimien lopullinen asennus**

Kuviosta 50 osoittaa, että edellä mainittu järjestely toimi erittäin hyvin.

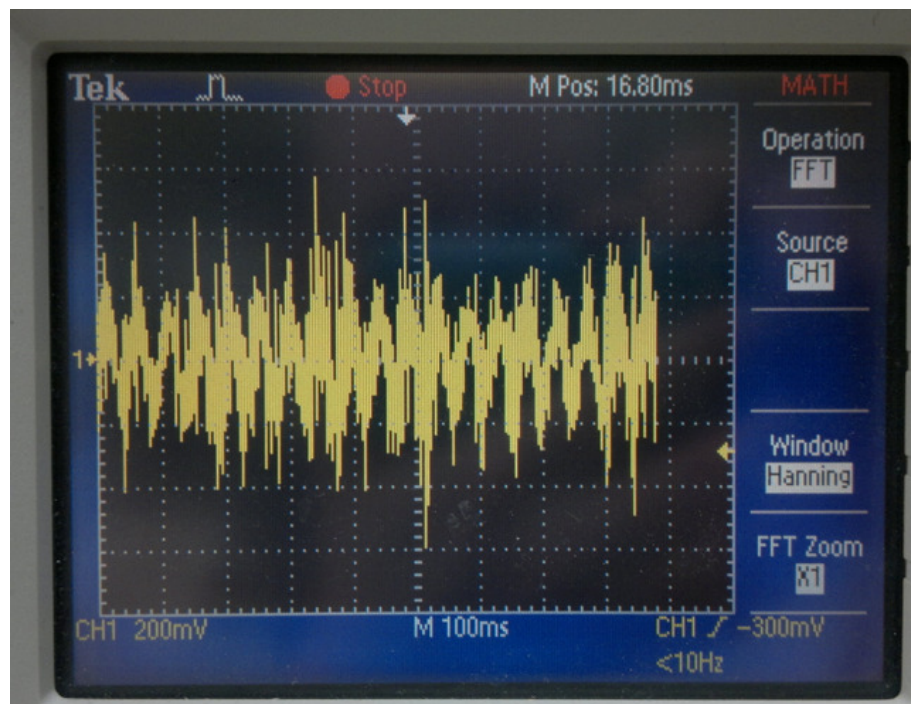


**KUVIO 50. Testikaapin lämmitysprofili, kun ilma kiertää hyvin kaapissa**

## 8.2 Tärinän testaaminen

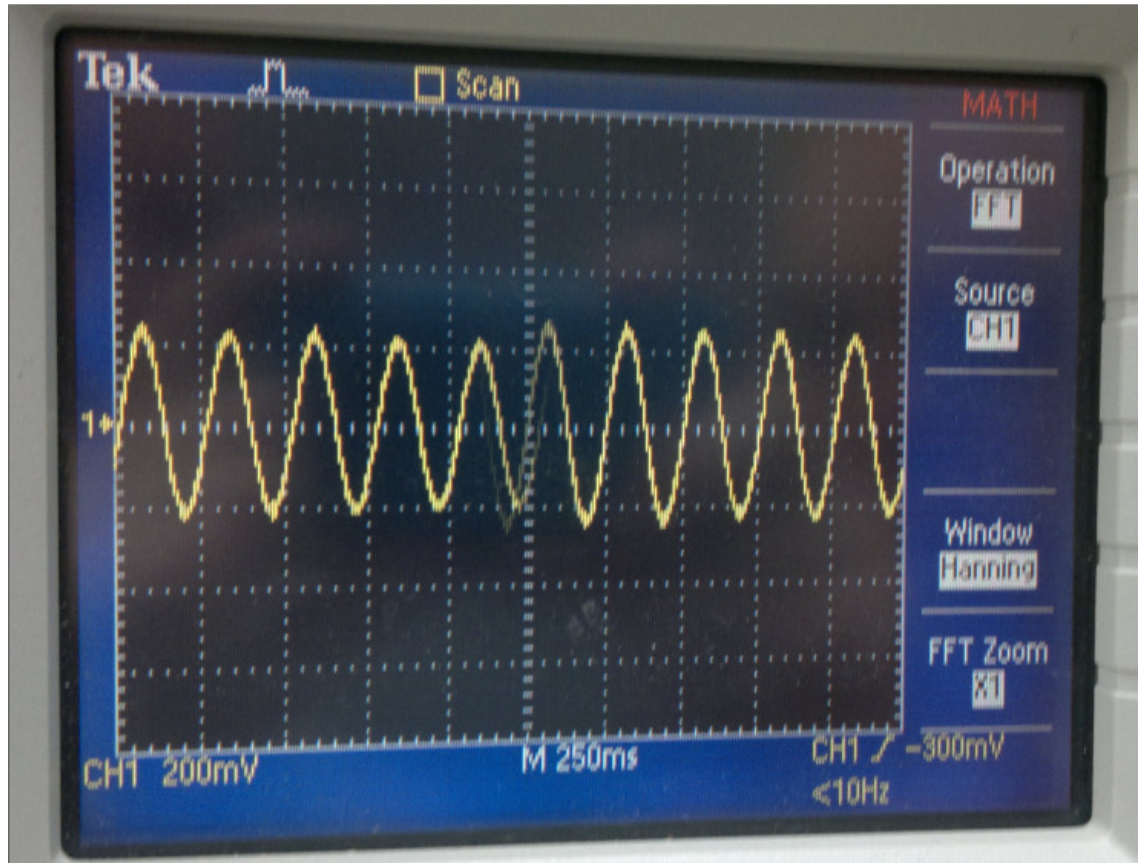
Tärinätestit aloitettiin heti, kun moottori oli kiinnitetty kaappiin ja moottori kytkettiin taajuusmuuttajaan. Näin pääsimme heti tutkimaan kaapin käyttäytymistä eri moottorin taajuuksilla. Havaittiin, että kaapin kattopellit resonoivat todella voimakkaasti, minkä takia kattopeltejä tukemaan asennettiin lisätukiputket.

Myöhemmin, kun mm. tärinäanturi oli saatu kiinnitettyä, päästiin testaamaan tärinäanturin toimivuutta ja tarkkuutta. Kuten luvussa 5.3 mainitsin, kiihtyvyyssanturilta pitäisi tulla kaunis siniaallon muotoinen signaali, jonka taajuus ja amplitudi osoittaa tärinän taajuuden ja voimakkuuden. Kuvio 51 osoittaa, että todellisuus oli jotain ihan muuta. Kohinaisesta signaalista voidaan kyllä lukea tärinämoottorin pyörimisestä aiheutuva tärinä, mutta kun taajuus nostetaan yli 40 hertsin, ei perustaajuutta voi luotettavasti havaita.



KUVIO 51. Signaali tärinäanturilta, kun moottoria pyöritetään 20 Hz:n taajuudella

Ensiksi epäiltiin, että järjestelmä tuottaa EMC-häiriöitä värinäanturin signaaliin, joka näkyisi kohinana oskilloskoopin ruudulla. Tämä epäily kumottiin siten, että kaappi laitettiin käsivoimin kevyesti "pomppimaan" jousien varaan omalla resonanssitaajuudellaan. Kuten kuvio 52 osoittaa, häiriöitä ei tässä signaalissa ollut, joten kohina ei johtunut EMC-häiriöistä.

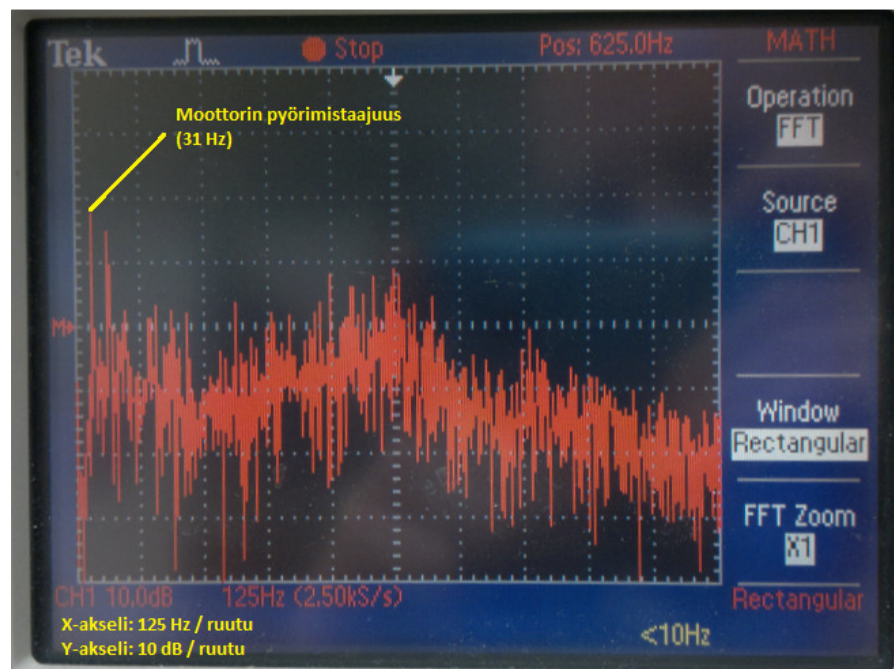


**KUVIO 52. Värinäanturin signaalin muoto, kun kaappi värisee yhden akselin suunnaisesti**

Värinäanturin signaalia ruvettiin tutkimaan tarkemmin hyödyntäen Fourier-muunnosta (ks. luku 6.8), joka näyttää värinäsignaalin taajuuskomponentit ja niiden voimakkuudet. Epäiltiin, että anturisignaalin kohina on oikeaa värinää, joka muodostuu useiden pienten värinälähteiden (sivupellit, pleksit yms.) summasta. FFT-muunnos tehtiin oskilloskoopilla käyttäen rectangular-ikkunointia. Muunnoksesta voidaan todeta, että 600 Hz ja 800 Hz välillä on voimakasta resonointia, joka näkyy

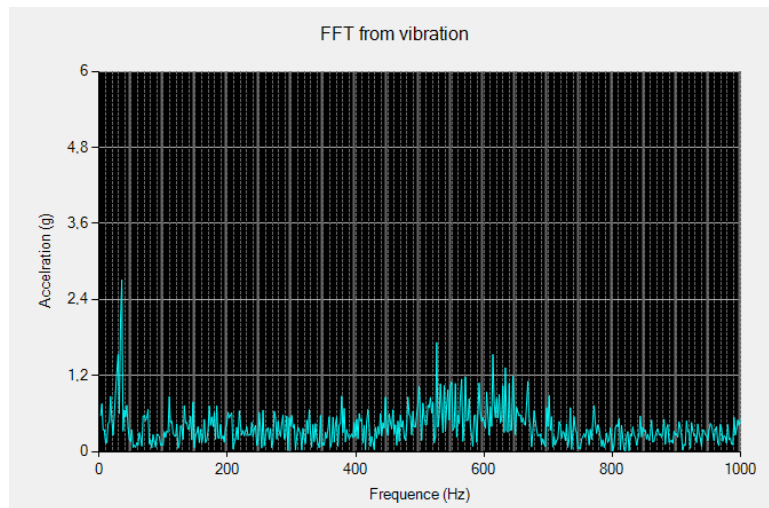


kohinana anturin signaalissa (ks. kuvio 53). Lisäksi piikki n. 62 Hz:n taajuudella on todella voimakas (ks. kuvio 53).

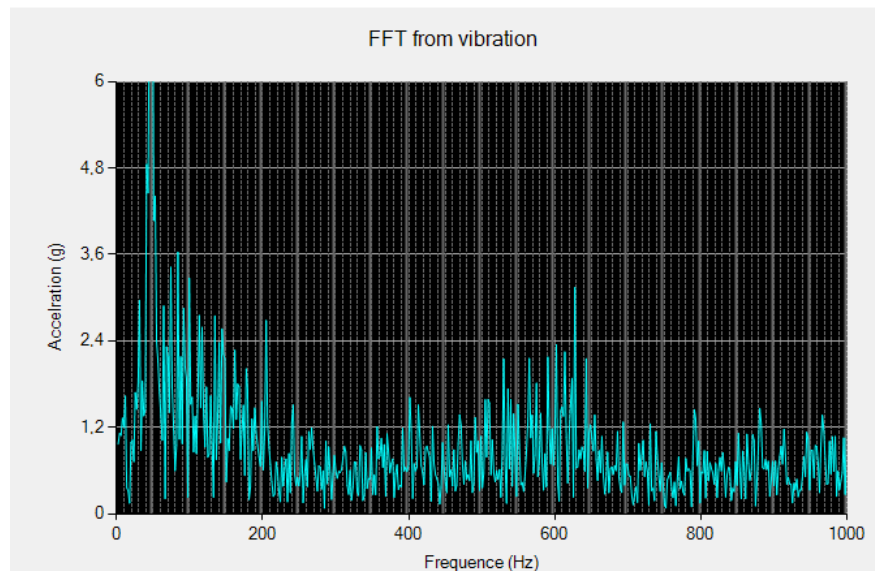


**KUVIO 53. Oskilloskoopilla tehty FFT-muunnos värinäanturin signaalista**

Koska värinäkaapin vieressä ei voi olla oskilloskooppia koko ajan mittaamassa värinän muotoa, FFT-muunnos piti toteuttaa jotenkin muuten. Sen voisi tehdä ohjauskeskuksen prosessorilla, mutta siinä ei nopeus riitä näin monimutkaisten laskutoimituksien tekemiseen. Ainoaksi vaihtoehdoksi jäi siirtää värinäsignaalin data suoraan tietokoneelle, jossa FFT-muunnos laskettaisiin (ks. kuvat 54 ja 55).



**KUVIO 54. Tietokoneella laskettu FFT-muunnos, kun moottorin pyörimistaajuus on noin 35 Hz**



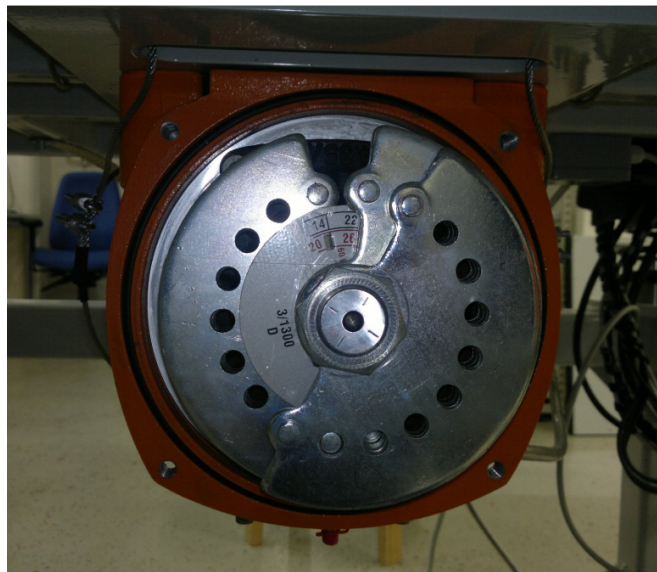
**KUVIO 55. Tietokoneella laskettu FFT-muunnos, kun moottorin pyörintätaajuus on noin 50 Hz**

Kuvista 54 ja 55 voidaan todeta käytettävän FFT-algoritmin toimivan hyvin. Erot oskilloskoopin muunnokseen (ks. kuvio 53) johtuvat mm. seuraavista asioista:

- Oskilloskoopin AD-muunnin on parempilaatuinen ja sen näytteenottonopeus moninkertainen

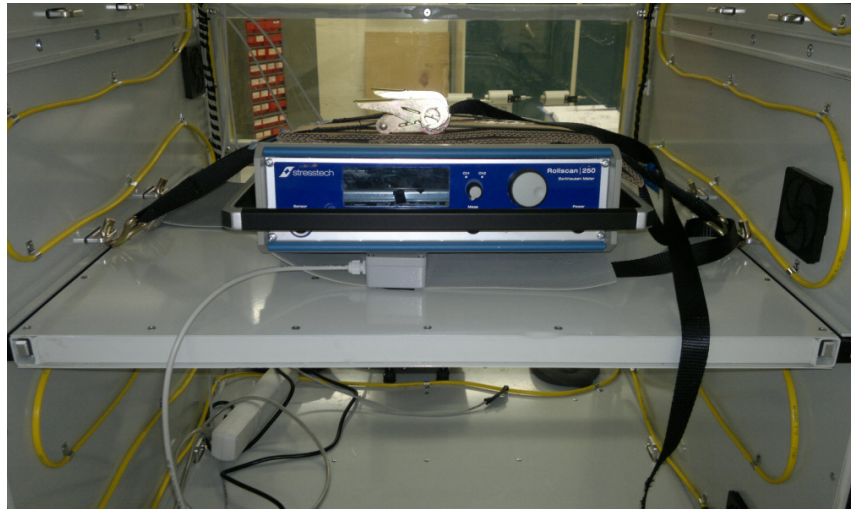
- Vaikka molemmissa muunnoksissa käytettiin samaa ikkunointia, niin varsinaisissa FFT-algoritmeissa voi olla eroja
- Oskilloskoopilla datamäärä, eli kuinka monesta näytteestä muunnos lasketaan, on huomattavasti suurempi

Näitä värinäanalyseja tarvittiin siihen asti, että moottorin epäkesko voitiin säätää sopivaksi. Epäkeskoa säätämällä voidaan hakea värinän voimakkuus sellaiseksi, että se ei riko ehjiä laitteita, mutta irrottaa löysät liittimet ja ruuvit. Moottorin epäkesko-levyt säädettiin kuvion 56 osoittamalla tavalla.



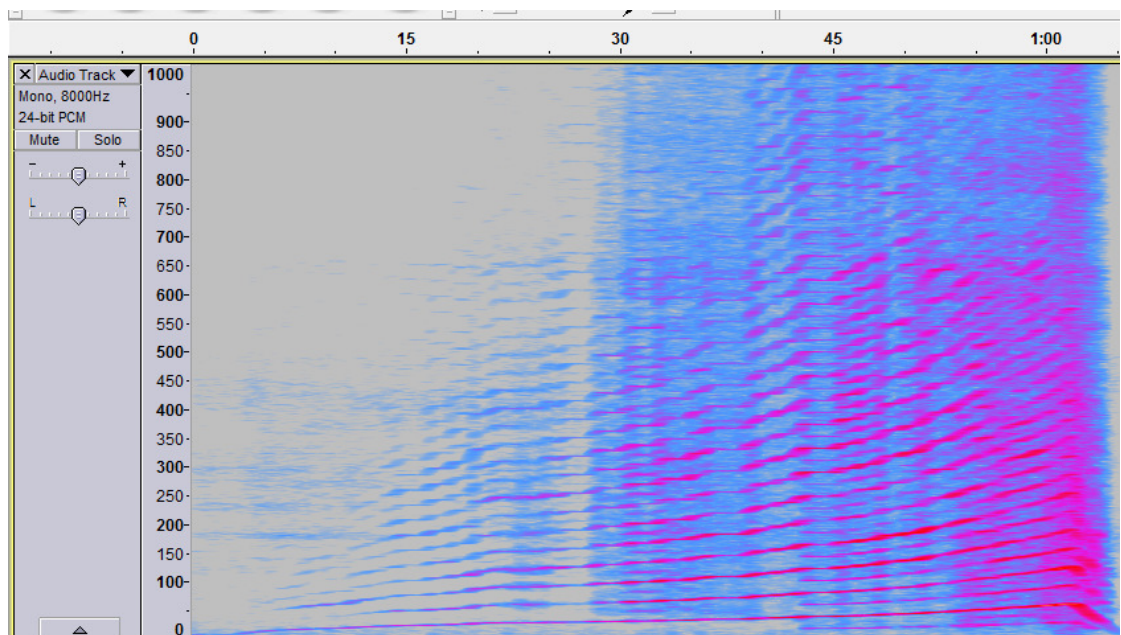
**KUVIO 56. Epäkeskomoottorin painot säädettynä**

Koska värinäanturi on testikaapin pohjassa, ei se vastaa todellista tilannetta. Päätettiin laittaa värinäanturi samalle kohdalle, mihin mitattava laite tulee. Anturi kiinnitettiin hyllyyn kiristysliinojen avulla tyhjän mittalaiterungon alle (ks. kuvio 57). Tällä pyrittiin nähdä tarkasti, millaisille värinöille mittalaite altistuu.



**KUVIO 57. Tärinäanturi kiinnitettyä mittalaitteen alle**

Tällä kertaa tärinän analysointiin käytettiin spektrogrammia. Tämä kolmiulotteinen tasokuvio kertoo yhdessä kuvassa tärinän taajuuden ja amplitudin kuluneen ajan funktiona (ks. kuvio 58). Spektrogrammi nauhoitettiin Audacity ohjelmistolla ja tärinäanturin signaali luettiin tietokoneen äänikortilla mikrofoni sisääntulolla.

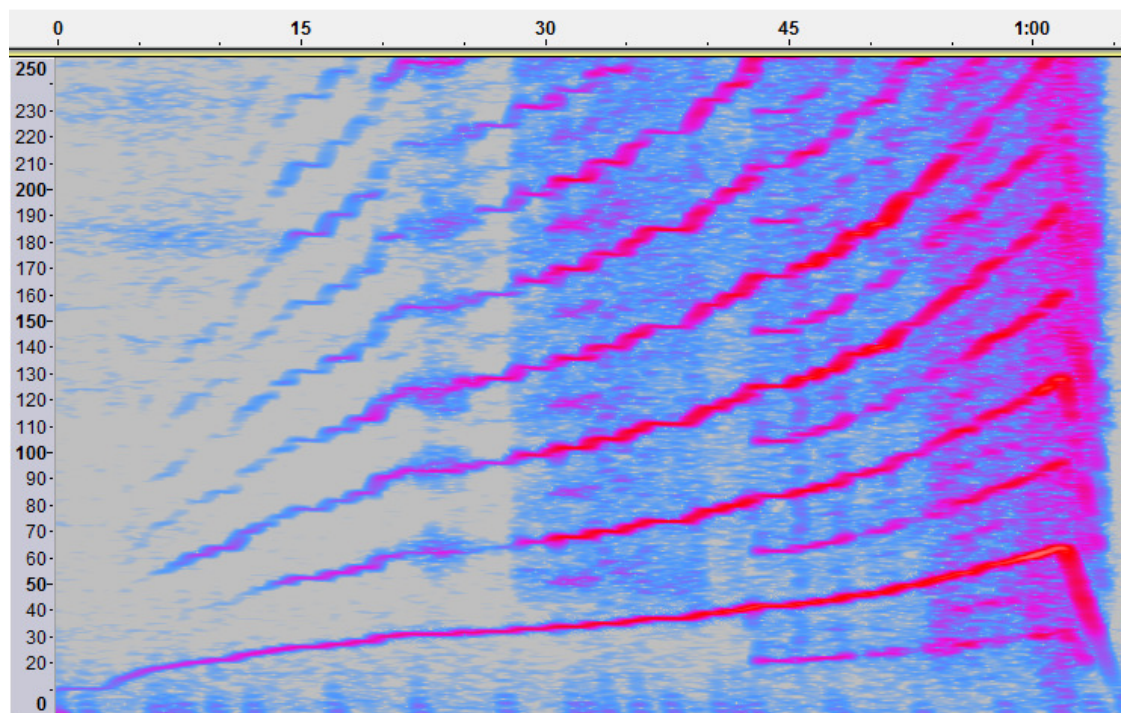


**KUVIO 58. Spektrogrammi tärinäanturin signaalista**



Kuvioa 58 luetaan seuraavasti. Y-akselilla on taajuus ja X-akselilla kulunut aika. Kuvion väri kertoo taajuuden amplitudin, eli voimakkuuden. Mitä punaisempi väri, sitä voimakkaampi värinä. Sitä, kuinka suurta amplitudia tumman punainen väri vastaa, ei voitu selvittää, koska tietokoneen äänikortin mikrofoniliitännän vahvistusta ei tiedetty. Lisäksi värinäanturin signaalia piti vaimentaa yli 20 dB, että äänikortin dynamiikka riitti mittaamaan signaalia, kun värinämoottorin taajuutta säädettiin 10 hertsistä noin 60 hertsiin.

Kuviossa 59 on zoomattu kuvion 58 kuvaajaa siten, että taajuusakselin yläraja on 250 hertsissä. Kuviossa 59 nähdään, kuinka värinämoottorin pyörimisnopeuden taajuus aiheuttaa voimakkaita moninkertoja, jotka myös vaikuttavat mittalaitteiden tärisyttämiseen. Noin 55 sekunnin kohdalla värinää alkaa esiintyä koko spektrillä todella voimakkaasti.



**KUVIO 59. Värinäanturin signaali zoomatulla spektrogrammilla**

Spektrogrammikuvaajat auttoivat ymmärtämään, miten monimutkaisesti koko testauskaappi värisee. Jokainen pelti, pleksi, runkopalkki tms. värisevät omalla resonanssilla.

sitaajuudellaan. Tämä värinä summautuu, jolloin koko systeemi tärisee melko kaoottisesti. Tämä ei periaatteessa haittaa, koska laajakaistaisempi tärinä vastaa käyttö-tarkoitusta hyvin. Pitää vain huolehtia, ettei tärinä kasva liian voimakkaaksi.

## 9 YHTEENVETO

Tämän kokoisessa projektissa tulee aina vastoinkäymisiä. Kaikkea ei mitenkään voi ottaa huomioon. Tai voi, mutta siihen menee hirveästi aikaa, jolloin joutuu tasapainottelemaan hinnan ja hyödyn kanssa. Joskus on halvempaa ja järkevämpää vain tehdä ja kokeilla. Jos suunnitelmassa on vikaa, niin se korjataan ja suunnitellaan uudestaan. Loppujen lopuksi tässä projektissa oli yllättävän vähän ongelmia. Tehtyjä virheitä oli mm. emolevylle väärin suunniteltu USB-UART-muunnin, virheellisen kytkennän takia palanut emolevy ja muutamat väärät footprintit joillekin komponenteille.

Opinnäytetyön tekemiseen kului aikaa minun osaltani noin kuusi kuukautta, johon olen hieman pettynyt. Tähän sisältyi testausjärjestelmän elektroniikan osalta, elektroniikan suunnittelu, rakentaminen ja testaaminen, ohjauskeskuksen suunnittelu ja kasaaminen ja lopputestaaminen, joka on tätä kirjoittaessa vielä kesken. Onneksi käytetty aika ei ole mennyt hukkaan, vaan jo nyt näyttää siltä, että kaappi toimii paremmin kuin odotettiin. Testausjärjestelmää voi tulevaisuudessa kehittää mm. asentamalla tehokkaammat jäähdyttimet ja lämmittimet.

Tärinätestit osoittautuivat huomattavasti mielenkiintoisemmaksi, kuin alkuun kuvitelin. Se, miten digitaalinen signaalinkäsittely helpottaa tulosten analysointia, realisoitui minulle näiden testien avulla. Taajuustasossa signaalin tutkiminen tuo paljon uusia ulottuvuuksia. Ja kun taajuustason saa ajan funktioksi, saadaan yhteen kuvaajaan valtavasti informaatiota, joka on kuitenkin helposti ymmärrettävissä ja luettavissa.

Mitä tekisin toisin, jos nyt lähtisin vastaavaa järjestelmää suunnittelemaan? Prosessorin vaihtaisin ARM-prosessoriin, jota voisi ohjelmoida C#-ohjelmointikielellä. Tämä mahdollistaisi kompleksisemmän ohjelmiston suunnittelemisen pienemmällä vaivalla. Kiihtyvyyssanturin lukemiseen tekisin kunnollisen ympäristön, jolloin saataisiin pal-

jon paremmin tietoa kiihtyvyyden laadusta. Lämpötila-antureita voisi olla useampi, jotta voisi seurata lämpötilan muuttumista tarkemmin.

Olen melko tyytyväinen siihen, miten projekti edistyi. Olen oppinut paljon projekti-työskentelystä teollisuusympäristöstä ja seuraava projekti sujuu jo paremmin. Lisäksi olen tyytyväinen siihen, miten hyvin osasin arvioida kuhunkin projektin osioon kulu-  
van ajan. Aikataulu venyi lopussa hieman, mutta muuten olin viikon tarkkuudella  
kartalla projektin aikataulusta ja omasta työskentelynopeudesta. Enkä ole nuutunut  
matkalla, vaikka ehkä välillä onkin ollut epätoivoisia ajatuksia pään sisällä.

Eniten ehkä projektissa turhautti tietokoneohjelmiston suunnitteleminen. En hirveäs-  
ti ole ohjelmointia harrastanut, joten sen opiskeluun meni paljon aikaa. Onneksi työ-  
toverit opastivat mielellään ja heille suuri kiitos siitä. Jos tietokoneohjelmiston olisi  
suunnitellut joku muu, niin projektin aikataulu olisi ollut arviolta pari kuukautta lyhy-  
empi.



## LÄHTEET

Ahonen, J. 2010. EMC/SI Sähkömagneettinen yhteensopivuus/Signaaliheys esitelmän pdf-materiaali

Fast Fourier Transform. Wikipedia. Viitattu 19.3.2012.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Fast\\_fourier\\_transform](http://en.wikipedia.org/wiki/Fast_fourier_transform)

Huttunen, H. 2005. Signaalinkäsittelyn menetelmät

IPC-2221. Generic Standard on Printed Board Design, 1998

Kelvin (4-wire) resistance measurement, Allaboutcircuits, Viitattu 25.10.2011.

[http://www.allaboutcircuits.com/vol\\_1/chpt\\_8/9.html](http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_8/9.html)

Longueville, D. 2012. Fast Fourier Transfer blogi. Viitattu 20.3.2012.

<http://didier.longueville.free.fr/arduinoos/?p=1022>

Short-time Fourier Transform. Wikipedia. Viitattu 20.3.2012.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Short-time\\_Fourier\\_transform](http://en.wikipedia.org/wiki/Short-time_Fourier_transform)

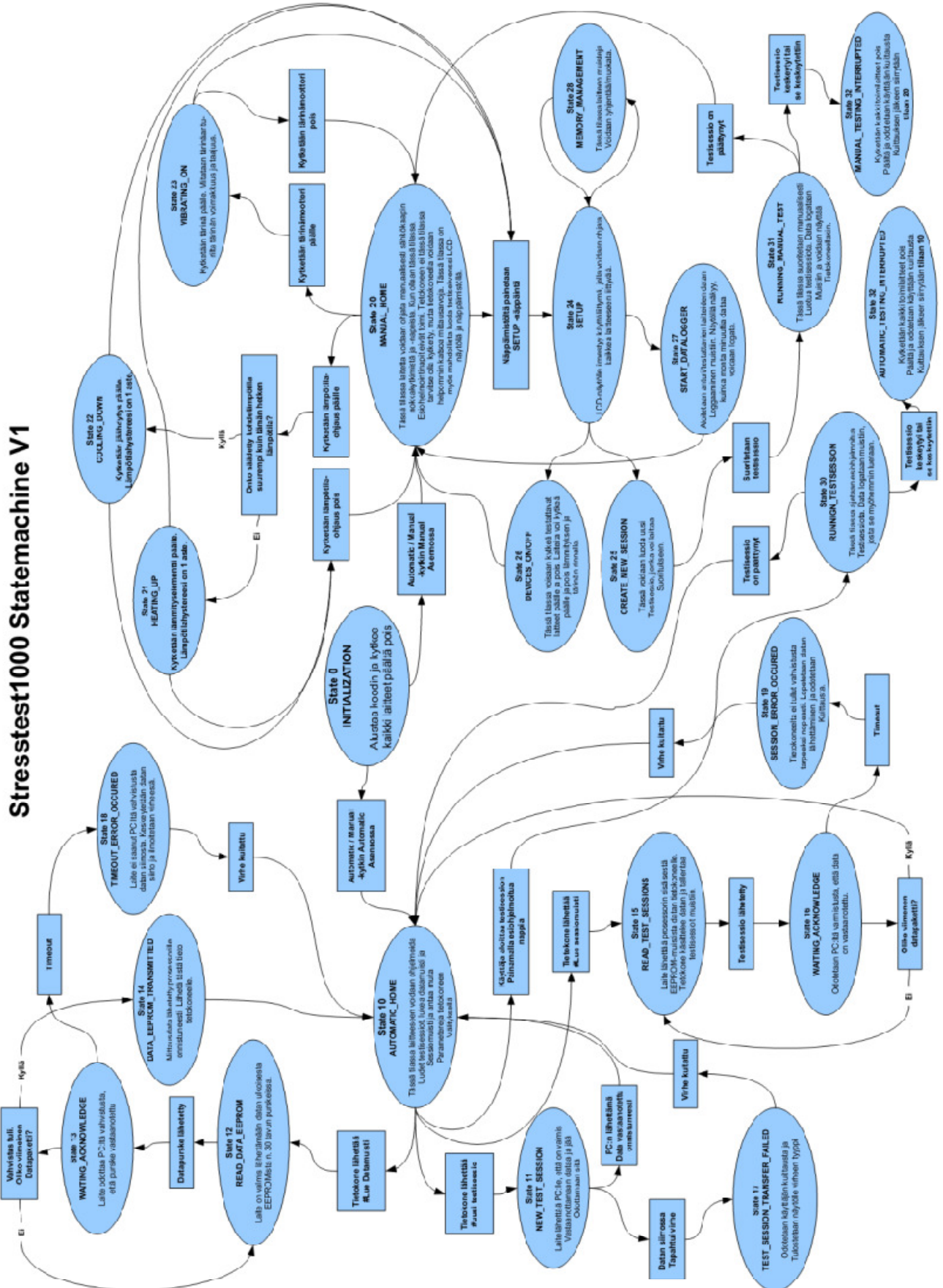
Stresstech Oy:n kotisivut. Viitattu 12.3.2012. [www.stresstechgroup.com](http://www.stresstechgroup.com)

Window function. Wikipedia. Viitattu 20.3.2012.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Window\\_function](http://en.wikipedia.org/wiki/Window_function)

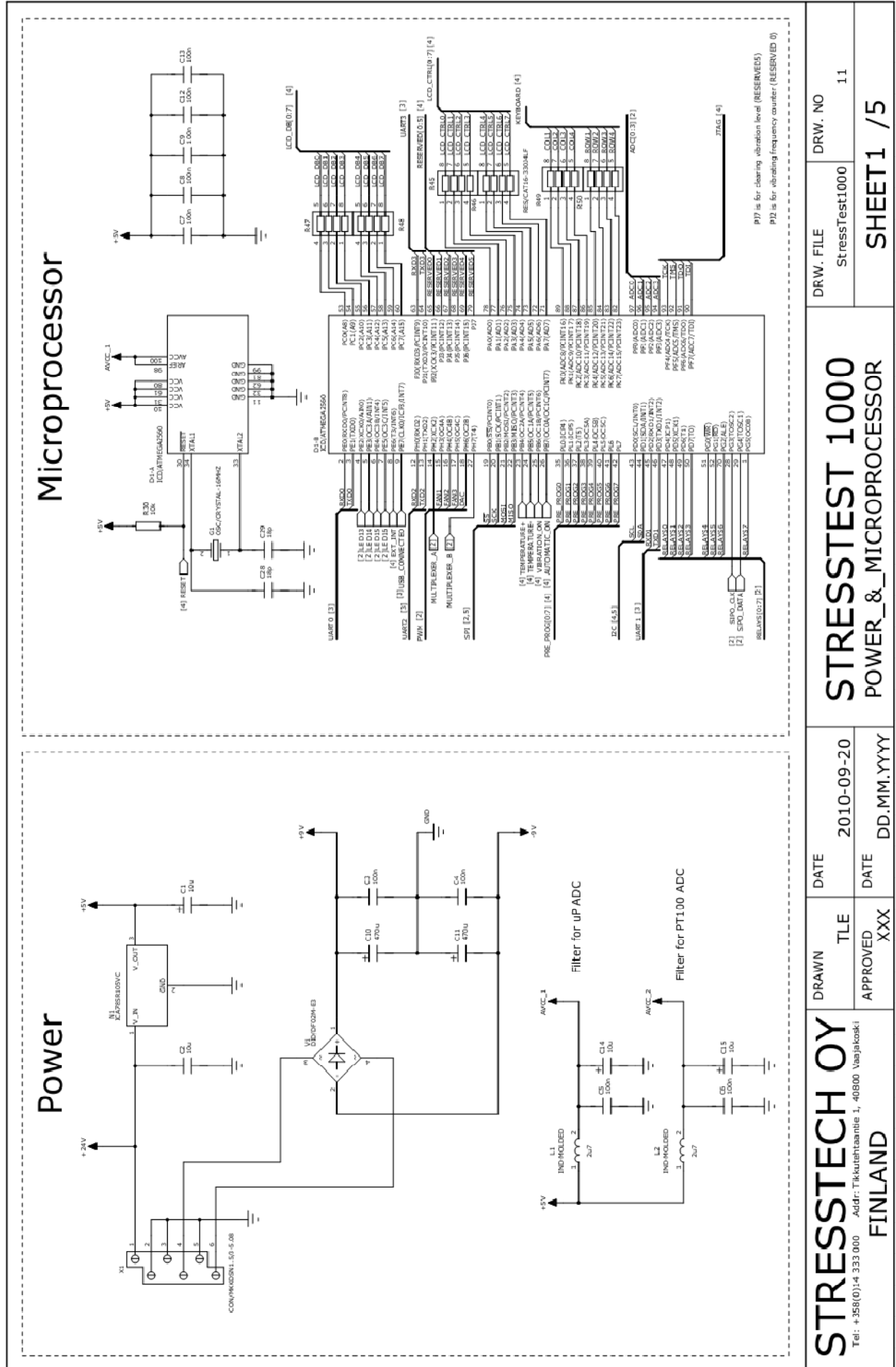
# LIITTEET

## LIITE 1. Prosessorin ohjelman tilakonekaavio





LIITE 3. Emolevyn kytkentäkaavio (sivu 1/5)



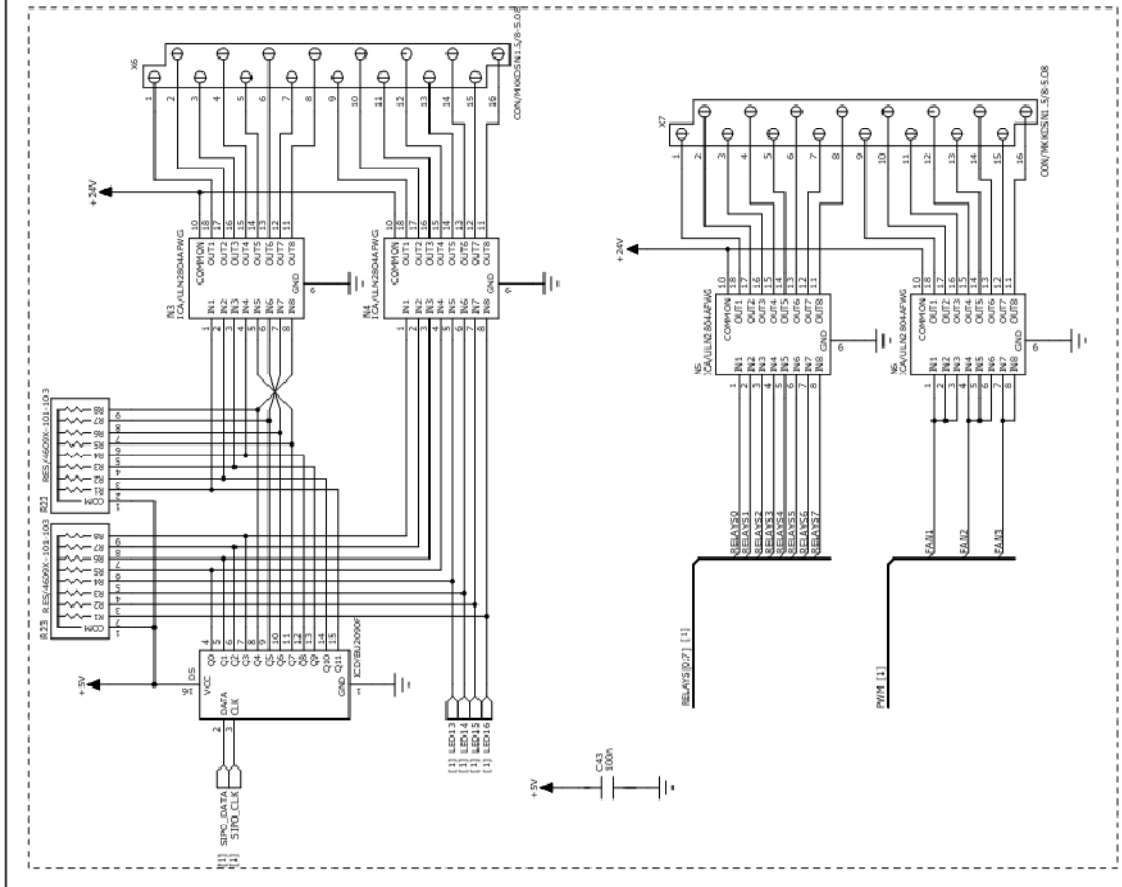
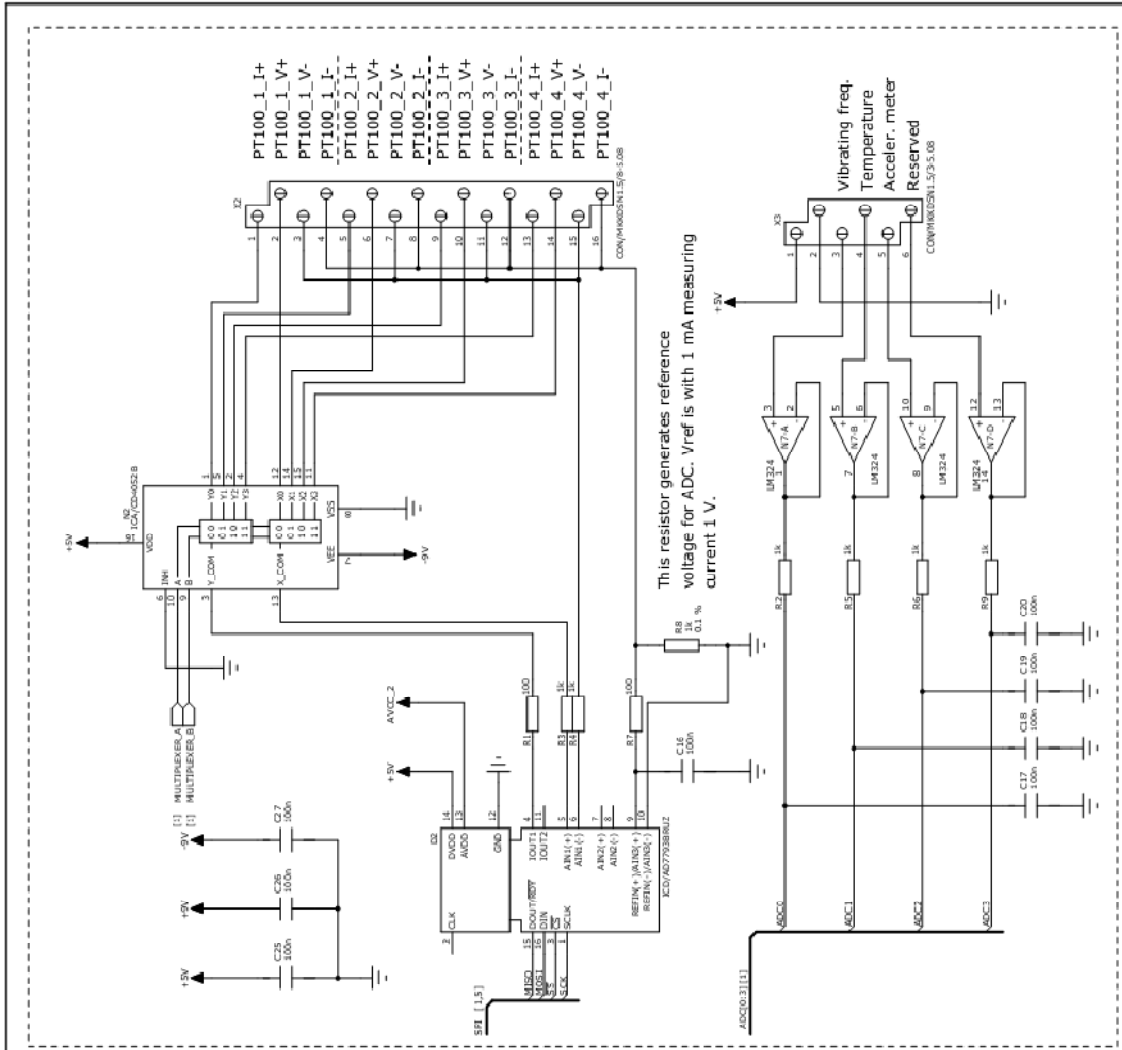
Microprocessor

Power

<b>STRESSTECH OY</b> Tel: +358(0)14 333 000    Addr.: Tikkuhaantie 1, 40800 Naajaskoski <b>FINLAND</b>	DRAWN TLE APPROVED XXX	DATE 2010-09-20 DATE DD.MM.YYYY	DRW. FILE StressTest1000 DRW. NO 11
	<b>STRESSTEST 1000</b> <b>POWER_&amp;_MICROPROCESSOR</b> <b>SHEET 1 / 5</b>		

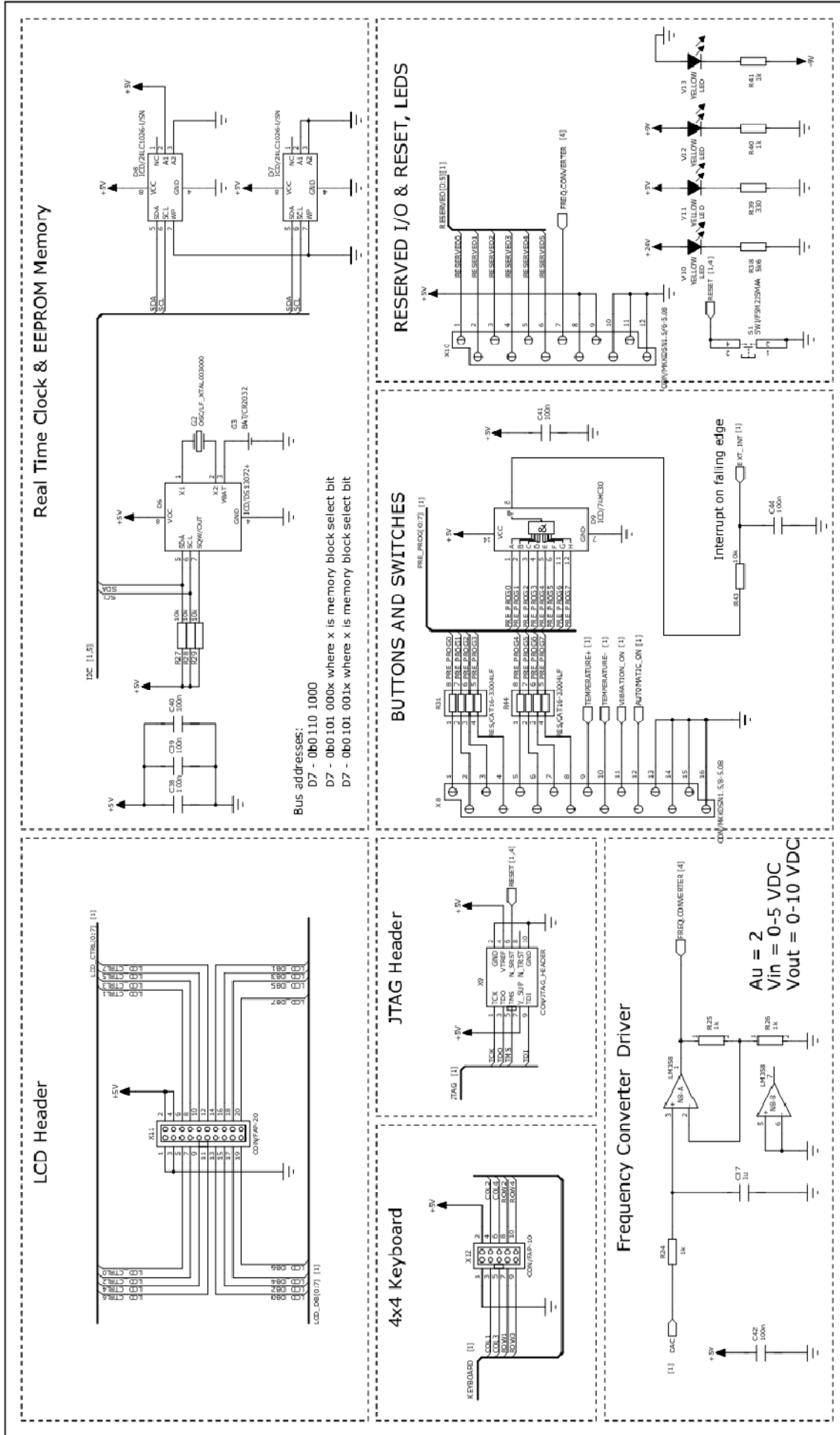
P1 is for clearing vibration level (RESERVED)  
 P2 is for vibrating frequency counter (RESERVED 0)



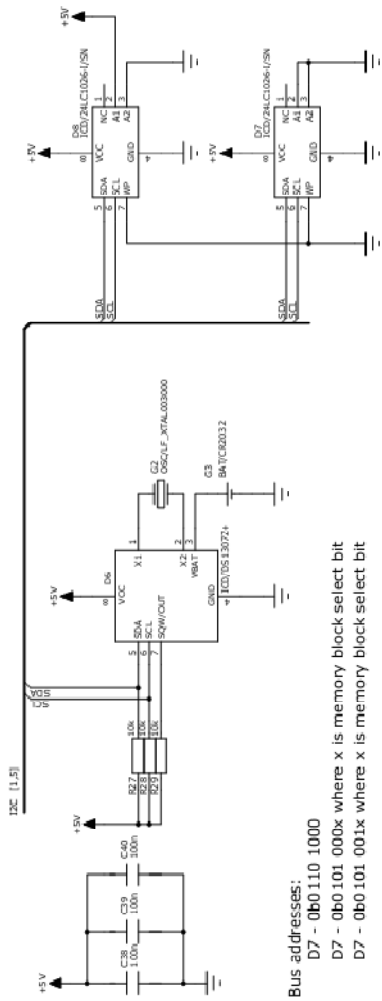


<b>STRESSTECH OY</b> Tel: +358(0)14 333 000 Addr: Tikurikantaantie 1, 40800 Vaajakoski <b>FINLAND</b>	DRAWN TLE APPROVED XXX	DATE 2010-09-20 DATE DD.MM.YYYY	<b>STRESSTEST 1000</b> ANALOG_&_BUFFER		DRW. FILE StressTest1000 DRW. NO 11
				<b>SHEET2 / 5</b>	

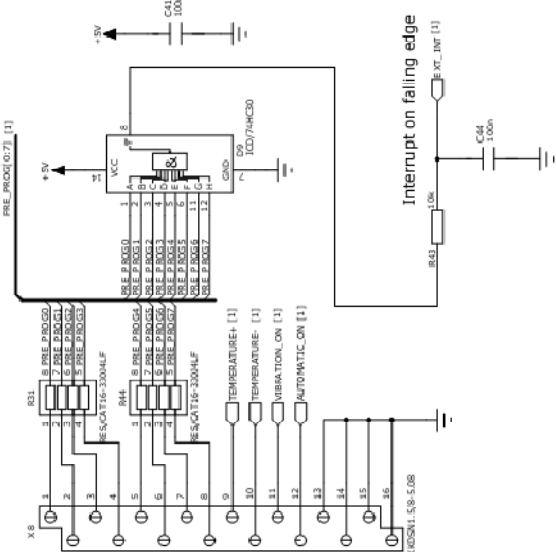




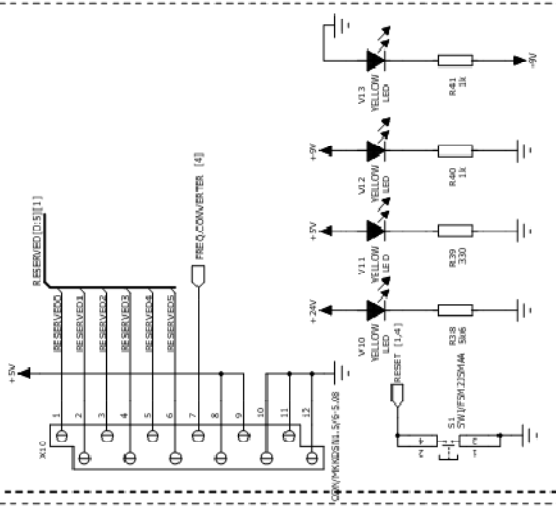
Real Time Clock & EEPROM Memory



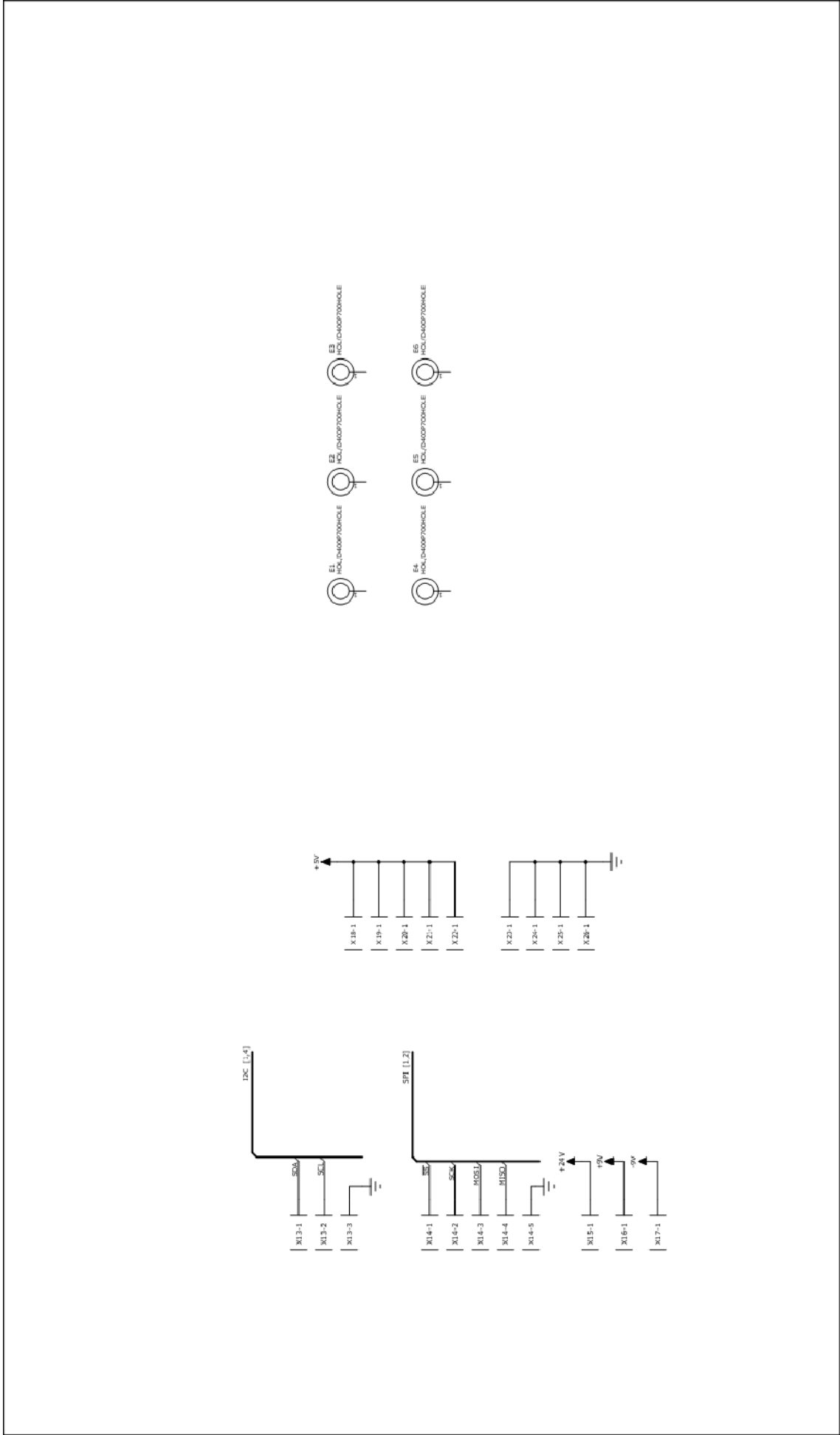
BUTTONS AND SWITCHES



RESERVED I/O & RESET, LEDS



<b>STRESSTECH OY</b> Tel: +358(0)14 333 000    Addr: Tikkuhietaanitie 1, 40800 Vaajakoski	DATE	2010-09-20	DATE	2010-09-20	DRW. FILE	StressTest1000	DRW. NO	11
	APPROVED	XXX	DATE	DD.MM.YYYY	SHEET4 / 5			
<b>FINLAND</b>	<b>STRESSTECH 1000</b>		<b>MISCELLAOUS</b>					



<b>STRESSTECH OY</b> Tel: +358(0)14 333 000    Addr: Tikkuhaantie 1, 40800 Vaajakoski <b>FINLAND</b>	DRAWN TLE	DATE 2010-09-20	<b>STRESSTEST 1000</b> TEST_POINTS		DRW. FILE StressTest1000	DRW. NO 11
	APPROVED XXX	DATE DD.MM.YYYY			<b>SHEET 5 / 5</b>	



