

Kim Kauppila

Protokollaenkooderi radioamatöörikäyttöön

Insinööriytyö

Tekijä Otsikko	Kim Kauppila Protokollaenkooderi radioamatöörikäyttöön
Sivumäärä Aika	25 sivua + 4 liitettä 28.5.2012
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Elektroniikan koulutusohjelma
Ohjaaja	lehtori Janne Mäntykoski
<p>Insinöörityössä suunniteltiin ja toteutettiin radioamatööri-toiminnassa käytettävien digitaalisten lähetelajien tuottamiseen soveltuva protokollaenkooderi. Laite suunniteltiin käytettäväksi sellaisten radioamatööriradioiden kanssa, joissa on sisäänrakennettu digitaalisten lähetelajien ohjelmistollinen purku, mutta ei tapaa näiden lähetelajien tuottamiseen ilman lisälaitteita.</p> <p>Yksi suunnittelun lähtökohta oli suunnitella laite yksinkertaiseksi rakentaa, ja näin mahdollistaa laitteen soveltuvuus edulliseksi rakennussarjaksi aloitteleville elektroniikan harrastajille. Tämä asetti laitteiston arkkitehtuurille, piirilevyn suunnittelulle sekä käytettävien komponenttien yhteishinnalle rajoitteita. Insinöörityössä esitellään yksi tapa muodostaa digitaalisten lähetelajien tuottamisessa vaadittavia signaaleja käyttäen apuna mikrokontrolleria, digitaali-analogimuunninta ja kaistanpäästösuodatinta. Laitteen käyttöliittymänä toimivat PS/2-näppäimistö ja merkkigraafinen nestekidenäyttö, ja sen ohjelmisto on päivitettävissä ISP-ohjelmointiliittimen kautta.</p> <p>Mittaustulosten perusteella laitteen todettiin pystyvän tuottamaan tarvittavalla nopeudella ja tarkkuudella erilaisia signaaleja. Laite täytti sille suunnitteluvaiheessa asetetut tavoitteet rakennussarjaksi soveltuvuuden ja kokonaiskustannusten osalta. Laitteen prototyyppi suunniteltiin alustavan lohkokaaavion perusteella koekytkentälevylle, jonka pohjalta suunniteltiin mittausten ja pienten muutosten jälkeen lopullinen piirilevy käyttäen piirilevysuunniteluohjelmaa.</p>	
Avainsanat	protokollaenkooderi, digitaali-analogimuunnos, mikrokontrolleri

Author Title	Kim Kauppila Protocol Encoder for Radio Amateur Use
Number of Pages Date	25 pages + 4 appendices 28 May 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Degree Programme in Electronics Engineering
Specialisation option	Electronics Design
Instructor	Janne Mäntykoski, Senior lecturer
<p>This thesis involved the design of an add-on amateur radio transceiver add-on device, which is capable of producing the signals required for the transmission of digital modes. The device, a protocol encoder, is designed for use in radios which have internal software for decoding the digital signals, but which are unable to transmit these digital signals without external equipment.</p> <p>One of the key design points was simplicity. The protocol encoder was to be designed as an electronics kit suitable for electronics as a hobby beginners. This affected greatly the planning of architecture, the printed circuit board, and the total cost of the project. A method of producing digital signals using a combination of microcontroller software, a digital-to-analog converter (DAC) and a band-pass filter is described in the thesis. The user interface for the protocol encoder consists of a PS/2 keyboard and a text based liquid crystal display. The software for the device is upgradeable via the ISP programming header on the printed circuit board.</p> <p>The measurement results from testing show that the device is capable of producing the needed signals with sufficient speed and precision. Most of the design objects were met. A final version of the protocol encoder was designed as a printed circuit board after some minor changes were made to the prototype version.</p>	
Keywords	protocol encoder, digital-to-analog converter, microcontroller

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

1 Johdanto	1
2 Digitaaliset lähetelajit radioamatööriviestinnässä	2
2.1 Radioamatööriviestinnän esittely	2
2.2 Digitaalisesti tuotettavissa olevat lähetelajit	3
2.3 Lähetteiden muodostaminen protokollaenkooderissa	5
3 Protokollaenkooderin suunnittelu	9
3.1 Protokollaenkooderin osa-alueiden erittely	9
3.2 Laitteiston prototyypin testaus	17
3.3 Mittaustulosten tarkastelu	20
3.4 Piirilevyn suunnittelu	21
4 Pohdintaa	23
Lähteet	25
Liitteet	
Liite 1. Ohjelmiston lähdekoodi	
Liite 2. Laitteiston lohkoakaavio	
Liite 3. Kaistanpäästösuodattimen mittaustulokset	
Liite 4. Komponenttitason piirros suunnitteluohjelmassa	

1 Johdanto

Radioamatööritoiminnassa on 1980-luvulta lähtien yleistynyt niin kutsuttujen digitaalisten lähetelajien käyttö jo aiemmin käytössä olleiden morse- sekä puhelähetteiden lisäksi. Näiden digitaalisen lähetelajien vastaanottamiseen ja lähettämiseen käytetään yleensä erillistä tietokonelaitteistoa, usein kannettavaa tietokonetta sekä sen äänikorttia.

Joissain uusissa radioamatööriradioissa on sisäänrakennettuna yhden tai useamman lähetelajin ohjelmistollinen dekodaus, mutta ei mahdollisuutta näiden lähetelajien lähettämiseen ilman lisälaitteita tai tietokonetta. Esimerkki tällaisesta radiosta on Icom Inc:n valmistama radioamatööriradio IC-7000, jossa on ohjelmistolla toteutettu radiokaukokirjoitusprotokollan dekodaus laitteen näytölle.

Insinöörityössä esitellään radioamatööriradioihin kytkettävä yksinkertainen oheislaitte, jolla eliminoidaan kannettavan tietokoneen käyttö osana radiojärjestelmää, kun käytössä on amatööriradio, jossa on sisäänrakennettu ohjelmistollinen dekodaus. Yhtenä suunnittelun osa-alueena oli kiinnittää huomiota laitteen soveltuvuutta rakennussarjaksi esimerkiksi aloittelevalle radioamatöörille tai elektroniikan harrastajalle. Tämä asetti tiettyjä rajoitteita suunnittelulle. Osien tulisi olla helposti saatavissa ja tarvittaessa korvattavissa toisilla osilla, sekä piirilevyn tulisi olla tehtävissä yksinkertaisin menetelmin, esimerkiksi syövyttämällä tai koekytkentälevylle.

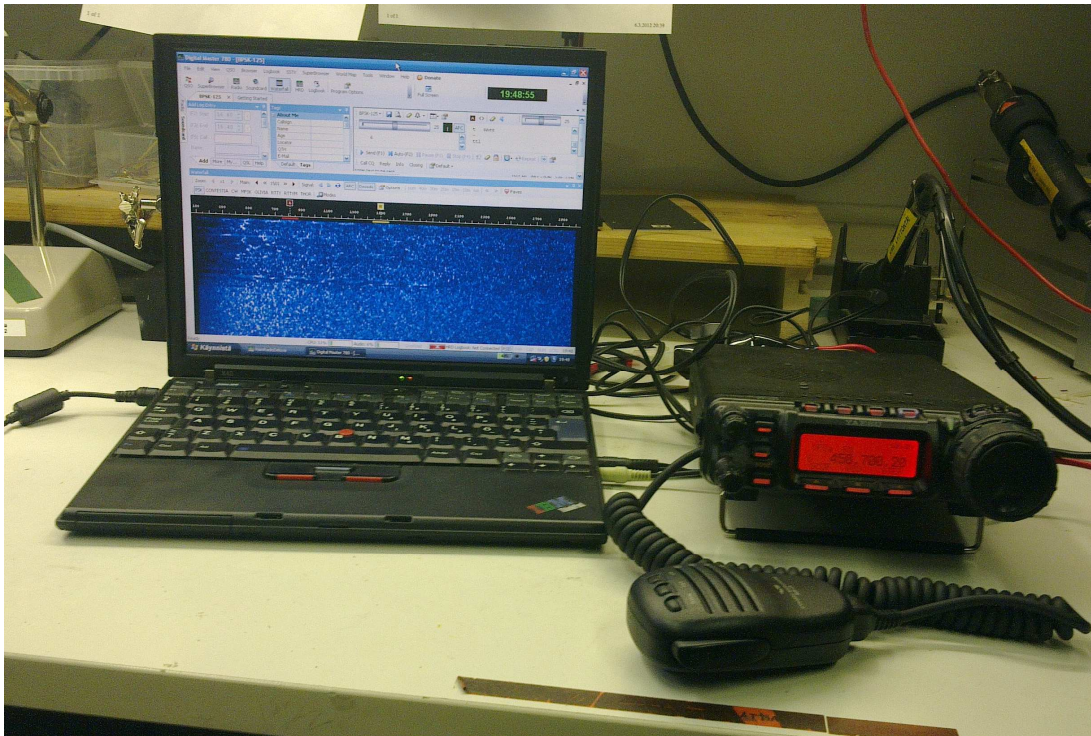
2 Digitaaliset lähetelajit radioamatööriviestinnässä

2.1 Radioamatööriviestinnän esittely

Viestin – esimerkiksi tekstin, kuvan, äänen tai videon – lähettäminen mitä hyvänsä siirtotietä pitkin vaatii viestin muuntamisen analogiseen muotoon jossain viestin lähetyksen vaiheessa. Viestin kuljettamiseen lähettäjältä yhdelle tai usealle vastaanottajalle tarvitaan siirtotie. Tyypillisiä siirtoteitä ovat sähkömagneettisiin ilmiöihin perustuvat siirtotiet (esimerkiksi näkyvä valo, radioaalto tyhjiössä tai kuparikaapelissa) sekä väliainetta hyödyntävät siirtotiet (esimerkiksi kaiuttimen tuottama ääni ilmassa, kaiku- luotaimen tuottama ultraääni vedessä). Sähkömagneettiset ilmiöt voivat tosin tapahtua sekä väliaineessa että tyhjiössä. Radioteitse tapahtuvassa viestinnässä sanoma lähetetään käyttäen tiettyä ennalta määrättyä taajuutta ja lähetystapaa, jonka lisäksi myös valitulle lähetelajille, teholle sekä lähetteen käyttämälle kaistanleveydelle on asetettu rajoitteita.

Sekä radiomodeemit että tietokoneavusteiset lähetystavat toimivat seuraavalla tavalla: digitaalisen viestin sisältävä analoginen signaali tuodaan amatööriradiolle, jossa signaali muunnetaan radiotaajuiseksi haluttua modulaatiomenetelmää käyttäen. Radiotaajuinen, viestin sisältävä moduloitu signaali siirretään syöttöjohtoa pitkin antennille, josta signaali siirtyy sähkömagneettisena aaltona vastaanottajalle. Vastaanottajalla on käytössään samantapainen laitteisto, jolla vastaanotettu signaali puretaan joko vastaanotuksessa, radiomodeemissa tai äänitaajuisesti tietokoneen avustuksella.

Kuvassa 1 (ks. seuraava sivu) esitellään tyypillinen radioamatööriviestinnässä käytetty laitteisto, jolla voidaan lähettää ja vastaanottaa digitaalisia sanomia. Radioamatööriradio on kytketty kannettavan tietokoneen äänikorttiin sekä USB-väylään. Tietokoneohjelmisto käyttää äänikorttia apuna äänitaajuisen analogisen signaalin tuotannossa ja vastaanottamisessa. Ohjelmisto huolehtii radion käyttämän taajuuden ja lähetystehon valinnasta. On olemassa myös erillisiä radioamatöörikäyttöön suunniteltuja radiomodeemeja, jotka kytketään tietokoneeseen USB-väylän tai sarjaportin kautta. Tällöin tietokoneen äänikorttia ei käytetä signaalin tuotannossa tai vastaanottamisessa.



Kuva 1. Tyypillinen radioamatööriyhteyksissä käytettävä viestilaitteisto

2.2 Digitaalisesti tuotettavissa olevat lähetelajit

Radioamatööriviestinnässä käytetään useita digitaalisia lähetelajeja, joista yleisimmin käytettyjen joukossa ovat radiokaukokirjoitus sekä PSK31. Molempia lähetelajeja voidaan tuottaa yksinkertaisin ohjelmistollisin menetelmin, koska lähetelajeissa ei käytetä virheenkorjausta tai tapoja, joilla lähettäjä voisi varmistua lähetetyn datapaketin vastaanoton onnistumisesta vastaanottajan radiossa.

Joissain radioissa on sisäänrakennettuna tiettyjen protokollien purkamiseen vaadittu ohjelmisto, jolloin viesti on luettavissa selkokielenä laitteen ruudulta. Tällaisessa tilanteessa kannettava tietokone voidaan korvata protokollaenkooderilla, jolloin vastaanotettu signaali puretaan itse radiossa ja viestin lähetys tapahtuu käyttäen protokollaenkooderia.

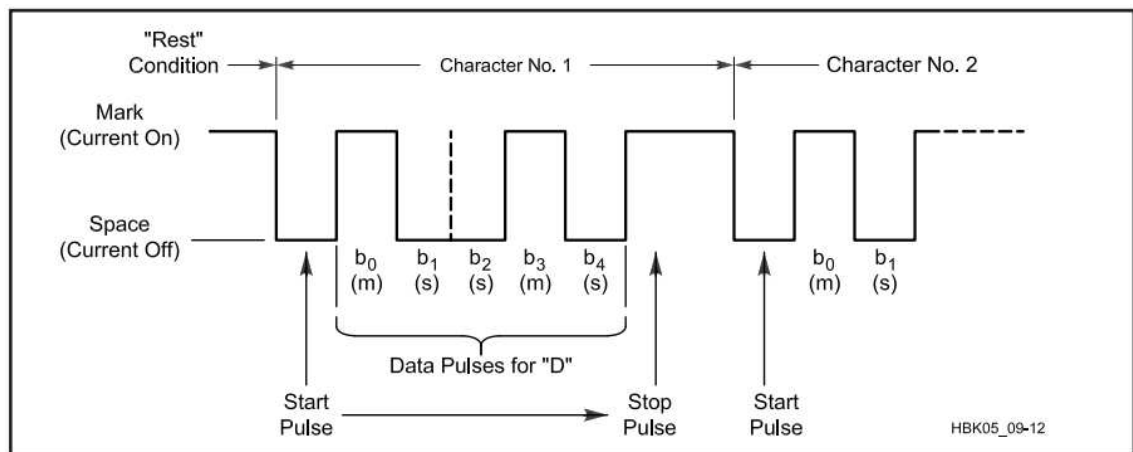
Radiokaukokirjoitus

Radiokaukokirjoitus on taajuussiirtoavainnukseen (*frequency-shift keying*) perustuva protokolla, jota käyttäessä viesti lähetetään vuorotellen kahta lähekkäistä taajuutta,

Mark ja Space. Taajuustasolla näitä tiloja vastaa kaksi taajuudeltaan lähekkäistä äänitaajuista signaalia. Kansainvälisessä radioamatööritoiminnassa käytetään usein 170 Hz:n erotusta kahden äänisignaalin välillä. Protokollan mukaisesti vain toisella taajuudella voidaan yhtäaikaaisesti lähettää. Tila, jossa lähetettäisiin sekä Mark että Space, ei ole sallittu.

Kirjaimet, numerot ja erikoismerkit lähetetään käyttäen 5-bittistä niin kutsuttua Baudot-merkistöä, jossa tietty 5-bittinen kuvio vastaa haluttua merkkiä. Koska kaikki merkit eivät mahdu 5-bittisen taulukon sisälle, käytetään protokollassa koodisivunvaihtomerkkejä LTRS ja FIGS. Näillä ilmoitetaan vastaanottajalle koodisivun vaihdosta.

Esimerkiksi kirjain D on Baudot-aulukossa 01001, joka lähetetään kuvan 2 esittämällä tavalla. Ensin lähetetään yksibittinen Space-signaalista koostuva aloituspulssi, jonka jälkeen haluttu 5-bittinen merkki lähetetään vähiten merkitsevä bitti ensin. Tämän jälkeen seuraa kaksibittinen lopetuspulssi, jossa Mark-tilaa lähetetään kahden bitin ajan.



Kuva 2. Baudot-aulukon mukaisen D-kirjaimen lähetys (1, s. 9.4)

Radiokaukokirjoitussignaalia voidaan tuottaa useilla tavoilla. Historiallisesti signaali tuotettiin kaukokirjoitusjärjestelmissä erillisillä oskillaattoriipiireillä, mutta nykyään signaali on mahdollista tuottaa myös yksinkertaisin menetelmin mikrokontrollerin tai tietokoneen ohjelmiston avulla. [1, s. 3.2]

PSK31

PSK31 on vaiheensiirtoavainnukseen (*phase-shift keying*) perustuva digitaalinen lähete-laji, jossa viesti lähetetään käyttäen 31 baudin nopeutta. Merkistö on tässä lähete-lajissa koostettu niin, että yleisimmin käytetyt merkit lähetetään käyttäen lyhyitä datapa-ketteja, ja harvinaisemmat merkit vastaavasti pidemmällä datapaketeilla. Lähete-lajin käyttämä kaistanleveys on pienimmillään noin 32 Hz, kun signaalin suodatus ja modu-laatiotaso on valittu oikein.

PSK31:stä on olemassa eri protokollaa käyttäviä versioita, joiden pääsiallinen ero on niiden käyttämissä modulaatiomenetelmissä. Yleisimmin käytetty modulaatiomenetelmä perustuu kaksivaiheiseen vaiheensiirtoavainnukseen (*binary phase-shift keying*), jossa signaalin vaihe on joko 0 tai 180 astetta. [2]

2.3 Läheteiden muodostaminen protokollaenkooderissa

Insinööriyössä päädyttiin käyttämään digitaalisten lähete-lajien signaalien muodostami-ssa tapaa, jossa halutut signaalit tuotetaan ohjelmistolla ja muunnetaan digitaali-analogimuuntimen sekä kaistanpäästösuodattimen avulla radioamatööriradiolle syötet-täväksi äänitaajuisiksi signaaliksi.

Protokollaenkooderi tarvitsee toimintaansa varten ohjelman, joka antaa käyttäjälle mahdollisuuden syöttää laitteelle lähetettävän viestin ja tarjoaa jonkin tavan viestin muokkaamiseen laitteen näytöllä. Laitteiston tulee pystyä tuottamaan digitaalisten lä-hete-lajien vaatimia äänitaajuisia signaaleja noin 100 - 3000 Hz:n taajuusalueella sekä muokkaamaan näiden signaalien amplitudia ja vaihetta reaaliaikaisesti.

Käyttäen apuna hakutaulua ja mikrokontrollerin sisäisiä laskureita oli mahdollista tehdä ohjelma, jolla voitaisiin tuottaa edellä mainitun kaltaisia signaaleja. Esimerkkikoodissa 1 (ks. seuraava sivu) esitetään hakutaulun käyttö osana ohjelmaa. Hakutaulu on määri-tetty ohjelmakoodissa kiinteäksi 8-bittiseksi, 64-alkioiseksi taulukoksi, jonka sisältönä on yksi kellojakso siniaalta. 8-bittisen hakutaulun käyttö ohjelmassa todettiin riittäväk-si ohjelmiston ja laitteen testaamisen ajaksi sekä se voitaisiin myöhemmin korvata 12-bittisellä hakutaululla.

Mikrokontrollerin laskurin TIMER1 laskentanopeus asetetaan ohjelmakoodin avulla sellaiseksi, että laskurin ylivuototapahtumien ylärajan asetuksella voidaan kontrolloida digitaali-analogimuuntimelta ulostulevan signaalin taajuutta. Signaalin vaihe on muutettavissa inkrementtoimalla hakutaulupointterea niin, että vaiheen muutos vastaa esimerkiksi 180 tai 0 astetta [3. s. 117–148].

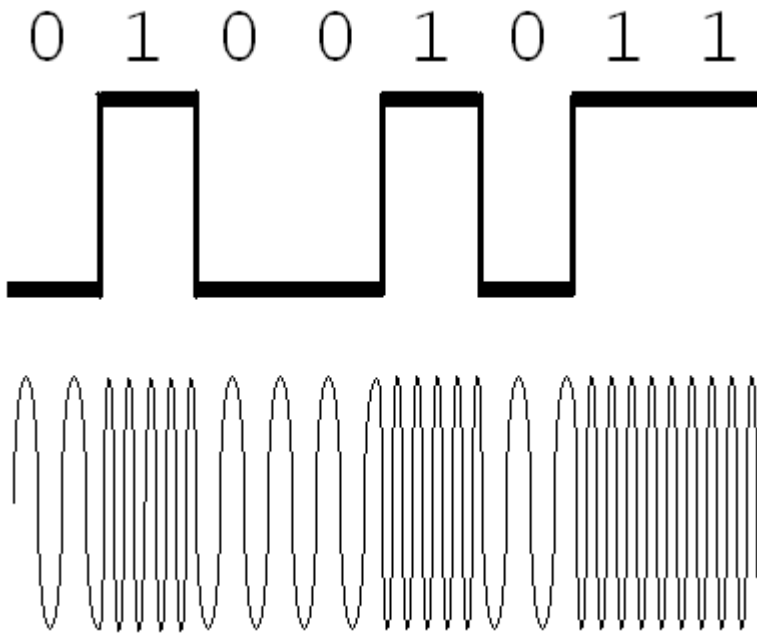
Kun laskuri pääsee ylivuototapahtuman ylärajan arvoon, muodostuu keskeytys, jolloin pääohjelman suoritus pysäytetään keskeytyksen ajaksi, ja siirrytään keskeytysaliohjelmaan ISR(TIMER1_COMPA_vect). Keskeytysaliohjelmasta kutsutaan toista aliohjelmaa DAC_Send, joka asettaa digitaali-analogimuuntimen hetkellisen jännitteen hakutaulusta haetun digitaalisen arvon mukaiseksi. Tämän jälkeen siirrytään takaisin ohjelman suoritukseen. Laitteiston ohjelmakoodi on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1.

```
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
    DAC_Send(current_table[ptr]);
    ptr++;
    if (ptr >= sinetable_size) ptr = 0;
}
```

Esimerkkikoodi 1. Siniaalto-hakutaulun käyttö ja osoitinmuuttujan inkrementointi.

Signaalin amplitudia voidaan muokata kertomalla hakutaulusta noudettu arvo sopivalla kertoimella. Signaalin amplitudin pudottaminen esimerkiksi kymmenesosaan alkuperäisestä voisi tapahtua yksinkertaisesti kertomalla signaali kertoimella 0,1.

Kuvassa 3 (ks. seuraava sivu) havainnollistetaan valittua signaalin tuotantotapaa. Baudot-koodattu kirjain D (binaarina 10010, tarkistusmerkkeineen 01001011) muunnetaan tässä analogiseksi taajuusmoduloiduksi radiokaukokirjoitussignaaliiksi. Loogista nollaa vastaa yksi taajuus ja loogista ykköstä toinen taajuus.



Kuva 3. Taajuusmoduloinnin periaate (ei mittakaavassa)

Ohjelmistossa taajuusmoduloidun signaalin tuotanto on toteutettu muuttamalla laskurin TIMER1 asetusrekisterin OCR1A arvoja, jolloin laskurin ylimenotaajuus muuttuu. Rekisterin TCNT1 arvo muutetaan nolaksi, koska muuten laskuri laskisi maksimiarvoonsa, ja aiheuttaisi signaaliin vääristymiä [3, s. 117–148].

Esimerkkikoodissa 2 (ks. seuraava sivu) esitellään aliohjelma `freq_shift`, jolla voidaan asettaa TCNT1:n arvo kahden eri taajuuden välillä. Ohjelmistossa käytettiin ainoastaan lähdekoodissa esitettyjä kahta taajuutta, koska tarkoitus oli vain testata laitteen toimintaa.

```

*** main.c (katkelma lähdekoodista)

void freq_shift(void)
{
    if (bitti == 1)
    {
        OCR1A = 469; // 469 = 2126hz
        TCNT1 = 0;
    }

    if (bitti == 0)
    {
        OCR1A = 434;
    }
}

```

Esimerkkikoodi 2. Taajuusmoduloidun signaalin muodostus ohjelmistossa

Digitaali-analogimuuntimella muodostettavaan analogiseen signaaliin syntyy aina poikkeuksetta muuntimen rakenteesta syntyviä virheitä. Ulostuleva analoginen signaali ei ole jännitteeltään tasaista, vaan sen pienin mahdollinen muutos on aina yhden vähiten merkitsevän bitin verran. Näistä epäjatkuvuuskohdista johtuvan kvantisointikohinan voi poistaa alipäästösuodatuksella. Signaalista tulee poistaa myös tasajännitekomponentti käyttäen ylipäästösuodatinta.

Esimerkiksi 12-bittisen digitaali-analogimuuntimen pienin mahdollinen jännite-ero kahden vähiten merkitsevän bitin välillä on käyttöjännite jaettuna 2^{12} :lla, jolloin jännitetiloja voi olla 4096 kappaletta. Tällöin 5 V:n käyttöjännitteellä pienin jännitemuutos on 1,22 mV:a [4, s. 4].

3 Protokollaenkooderin suunnittelu

Kun laitteiston määritelmä ja laitevaatimukset oli selvitetty, luonnosteltiin järjestelmälle alustava lohkoavaio, joka toimisi laitteiston ja ohjelmiston suunnittelun pohjana koko työn etenemisen ajan (liite 2). Laitteisto on jaettu neljään osa-alueeseen, jotka esitellään taulukossa 1.

Taulukko 1. Laitteiston osa-alueet ja niissä käytetyt komponentit

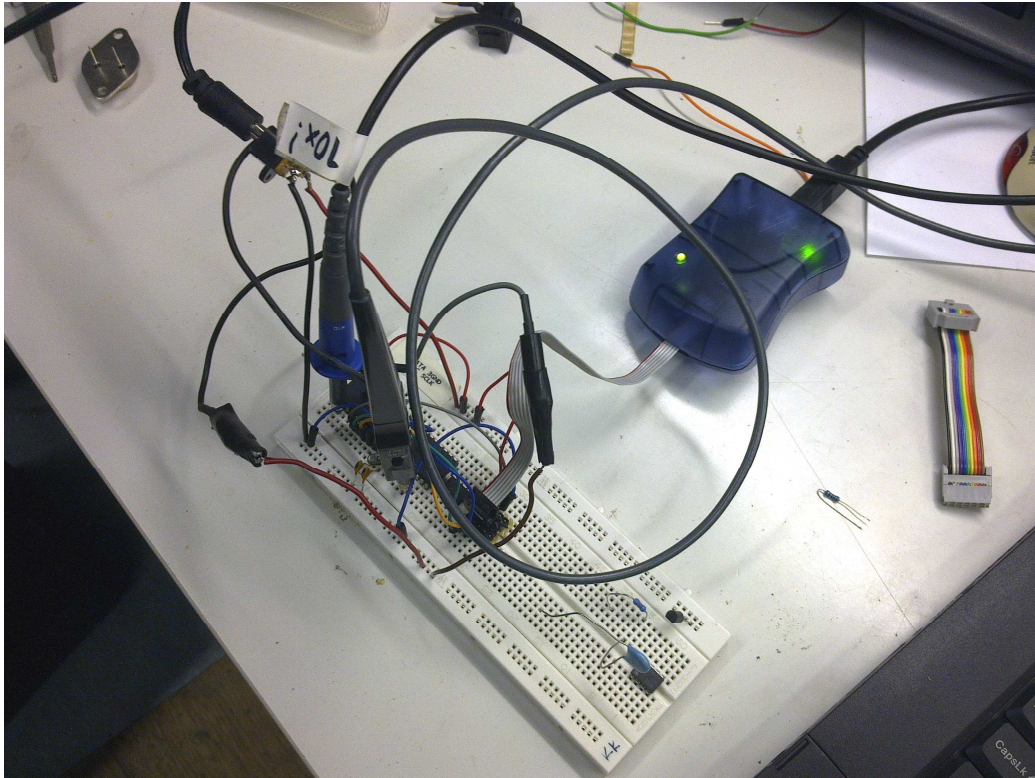
Kuvaus	Sisältö
Virransyöttö ja jännitteen regulointi	L4941BV jänniteregulaattori Lisävirtakondensaattori 500 mA sulake P5KE transienttisuojausdiodi
Mikrokontrolleri ja liitännät	Atmel ATMEGA324P SPI- ja I2C-väylät HD44780-yhteensopiva tekstinäyttö 16 MHz:n kide
Digitaali-analogimuunnin	Microchip MCP4821
Kaistanpäästösuo datin ja vahvistin	LM358N Sallen-Key-alipäästö- konfiguraatiossa, LC-ylipäästö

Järjestelmä päätettiin toteuttaa mikrokontrolleripohjaisen ratkaisun ympärille. Näin menetellen voitaisiin laitteen rakentamisessa käyttää helposti saatavia ja tarvittaessa yksinkertaisin välinein uudelleenohjelmoitavia, yleiskäyttöisiä mikrokontrollereita.

3.1 Protokollaenkooderin osa-alueiden erittely

Komponentit valittiin sillä perusteella, mitä oli helposti ja edullisesti saatavilla paikallisesta elektroniikkaliikkeestä lyhyellä toimitusajalla. Huomiota kiinnitettiin myös osien

korvattavuuteen siltä varalta, että jotain tiettyä komponenttia ei olisi saatavilla tulevaisuudessa. Mikrokontrolleria lukuun ottamatta kaikki protokollaenkooderissa käytetyt komponentit ovat korvattavissa alkuperäistä vastaavilla komponenteilla joko sellaisenaan, tai tekemällä lähdekoodiin pieniä muutoksia. Kuvassa 4 esitellään mikrokontrolleri kytkettynä koekytkentälevylle.



Kuva 4. Mikrokontrolleri testauksessa koekytkentälevyllä

Virransyöttö ja jännitteen regulointi

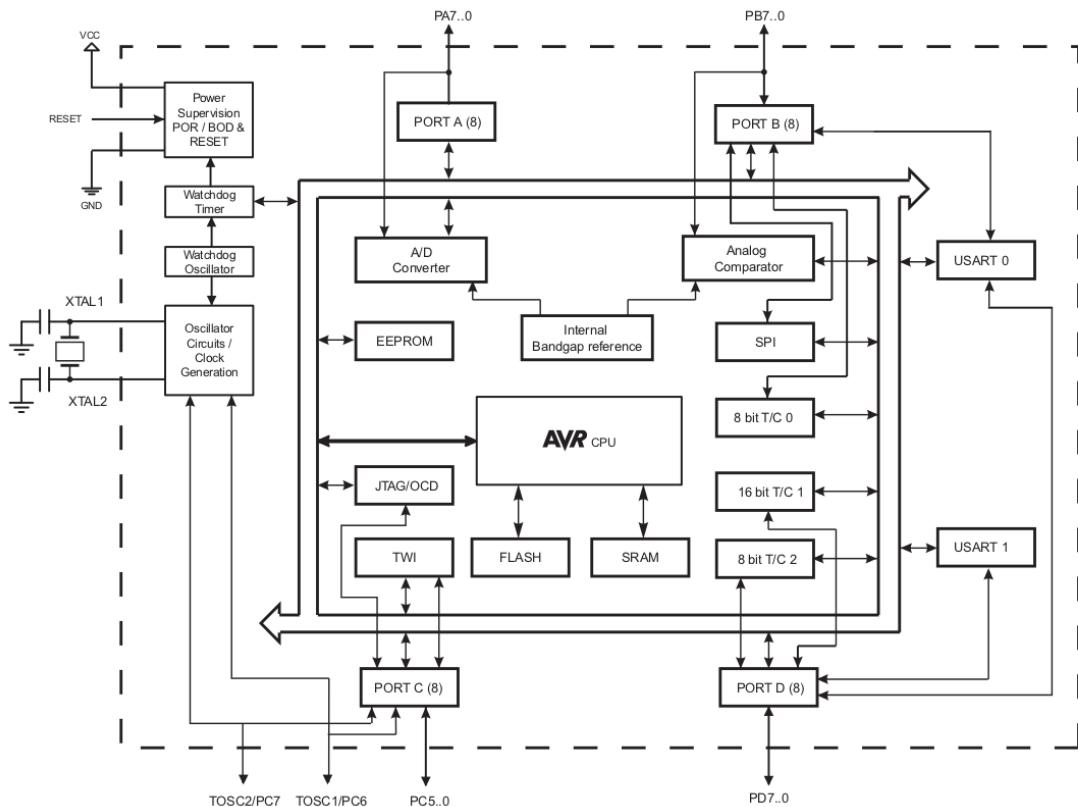
Järjestelmä saa käyttöjännitteensä ulkoisesta tasajännitelähteestä, joka voi olla esimerkiksi säädettävä yleismallinen virtalähde tai auton 12 V:n lyijyakku. Jänniteregulaattori rajoittaa sisään tulevan jännitteen 5,0 V:n. Laitteessa on lisäksi 500 mA:n sulake sekä jännitepiikeiltä suojaava transienttisuojausdiodei vikavirtasuojauksena.

Integroitujen piirien kuten, mikrokontrollerien yhteyteen, on suositeltavaa lisätä jokaista piiriä kohden yksi riittävän iso elektrolyyttikondensaattori toimimaan hetkellisenä sähkövarastona mikrokontrollerille. Tämä vähentää suurtaajuisten

jännitepiikkien pääsyä järjestelmän muihin osiin, jolloin järjestelmä toimii vakaammin. Työssä päädyttiin käyttämään yhtä sähköisesti riittävän isoa elektrolyyttikondensaattoria, joka sijoitettaisiin piirilevyllä mikrokontrollerin ja digitaalisanalogimuuntimen välittömään läheisyyteen [5, s. 2–3].

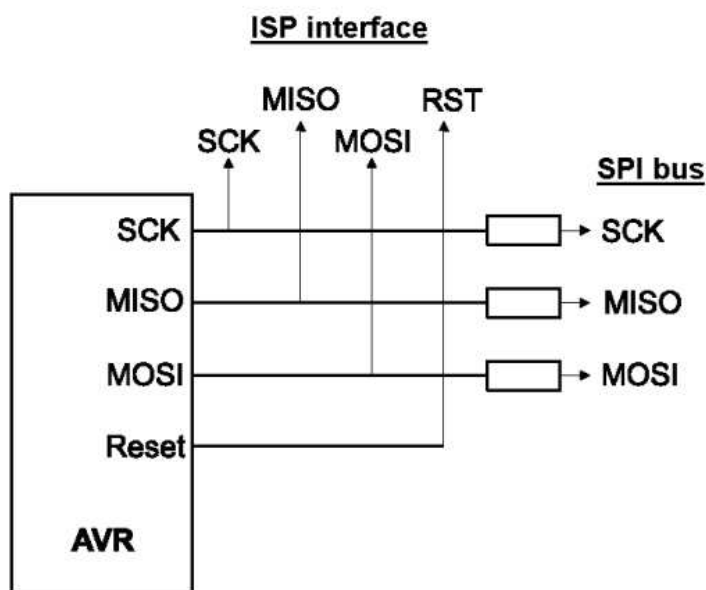
Mikrokontrolleri ja oheislaitteet

Atmel ATMEGA324P on yleiskäyttöinen 8-bittinen mikrokontrolleri, jossa on 32 kilotavua ohjelmamuistia, 20 MHz maksimikellotaajuus, neljä yleiskäyttöistä 8-nastaista porttia ja useita piirille integroituja lisätoimintoja. Työn kannalta tärkeimmät lisätoiminnot ovat erilaiset laskurit, laitteistotasolla toteutetut SPI- ja I2C-väylät sekä jännitteentarkkailupiiri. Kuvassa 5 esitellään mikrokontrollerin lohkokaavio [3, s. 1–7].



Kuva 5. AVR-mikrokontrollerin lohkokaavio [3, s. 3]

Saman valmistajan julkaisemassa suunnitteluoppaassa mikrokontrollerin ohjelmoinnissa suositellaan käytettäväksi ISP-ohjelmointiliitintä (In-System Programming), jolloin ohjelmointi tapahtuu mikrokontrollerin ISP-väylän SCK-, MISO-, MOSI- ja Reset-nastojen kautta. Ohjelmointiliitin jakaa edellä mainitut nastat SPI-väylän kanssa, mutta ei häiritse SPI-väylään kytkeytyvien oheislaitteiden käyttöä, koska signaalinastat ovat ohjelmoinnin aikana niin sanotussa korkeaimpedanssisessa tilassa. Kuvassa 6 esitellään ohjelmointiliitännän ja oheislaitteen yhtäaikainen kytkentä mikrokontrolleriin [3, s. 6].



Kuva 6. ISP-väylän rinnankytkentä SPI-väylän kanssa [3, s. 6]

Mikrokontrollerin kellosignaalin voi tuottaa usealla tavalla käyttäen

- sisäistä RC-oskillaattoria, jolla on noin 8 MHz:n taajuus
- vähävirtaista mutta epätarkkaa 128 kHz:n oskillaattoria
- ulkoista kellolähdettä tai
- kideoskillaattorikytkentää [3, s. 29–37].

Sisäisen RC-oskillaattorin kellotaajuus riippuu jonkin verran käytettävästä lämpötilasta ja käyttöjännitteestä, eikä 128 kHz:n oskillaattorin taajuus riittäisi tässä tapauksessa. Työssä valittiin kideoskillaattorikytkentä sen taajuustarkuuden vuoksi [3, s. 36].

PS/2-väylän ohjausprotokolla

PS/2-standardin mukaisten laitteiden liitännöissä käytetään 6-pinnistä Mini-DIN-liitintä. Nastoista kaksi on varattu näppäimistön virransyöttöön (käyttöjännite ja maa) ja kaksi liikennöintiin isäntälaitteen ja näppäimistön välillä (Data ja Clock). Kaksi muuta nastaa jätetään kytkemättä. Sekä Data- että Clock-linjat ovat kaksisuuntaisia. Protokollan mukaisesti isännän ja laitteiden välille luodaan yhteys vaihtelemalla näiden linjojen tiloja yhteyden suunnasta riippuen.

Isännän ja laitteen välisessä liikennöinnissä käytetään 11-bittisiä datapaketteja, joissa ensimmäiset kahdeksan bittiä koostuvat siirrettävästä datasta. Näiden jälkeen seuraavat pariteettibitti ja pysäytysbitti. Isäntälaitte voi tarvittaessa lähettää datapaketin jälkeen kuittausbitin.

Tilassa, jossa väylällä ei ole liikennettä, ovat väylän Data- ja Clock-linjat loogisessa ykkösessä. Näppäimistö kerää näppäintapahtumat (näppäin painettu tai vapautettu) omaan pushuriinsa, ja lähettää ne isännälle kun väylä on vapaa liikennöintiin. Väylän ollessa vapaa, isäntä antaa laitteelle luvan lähettää dataa laskemalla Clock- ja Data-linjat loogiseen nollaan vähintään 100 μ s:n ajaksi. Tämän jälkeen näppäimistö alkaa tuottaa taajuudeltaan noin 10 - 16 kHz:n kellosignaalia Clock-linjaan ja lähettää puskurissaan olevat datapaketit Data-linjan kautta isännälle.

Näppäimistön lähettämä datapakettien sarja voisi hieman yksinkertaistaen olla esimerkiksi seuraavanlainen: näppäin 1 painettu, näppäin A painettu, näppäin 1 vapautettu, näppäin A vapautettu. Protokollaenkooderin tapaisessa yksinkertaisessa sovelluksessa voidaan ohjelmistossa hylätä tieto näppäimen vapautuksesta, ja siirtää käyttäjän antama syöte kirjain kerrallaan laitteen muistiin. [6]

Nestekidenäytön ohjausprotokolla

Hitachi HD44780 on Hitachi Inc:n kehittämä merkkigraafisen nestekidenäytön ohjauspiiri, johon perustuvia nestekidenäyttöelementtejä on hyvin yleisesti käytössä erilaisissa sulautetun elektroniikan ratkaisuissa. Nestekidenäyttöjä on tarjolla useita eri kokoja, joista yleisesti saatavilla on 1-, 2- ja 4-rivisiä näyttöelementtejä.

Protokollaenkooderissa käytetään Everbouquet International Co., Ltd:n valmistamaa kaksirivistä nestekidenäyttöä MC1602C8, jossa tekstiä voidaan esittää korkeintaan 32 merkkiä kerrallaan. Se on liitännöiltään sähköisesti yhteensopiva Hitachi HD44780-standardiin perustuvien nestekidenäyttöjen kanssa. Näytön suurin hetkellinen virrankulutus on noin 42 mA, kun taustavalo on kytketty päälle ja käyttöjännitteeksi on asetettu 5,0 V. Näytön ohjaamiseen mikrokontrollerilla tarvitaan vähintään seitsemän nastaa, joista kolmella (RS, R/W, E) asetetaan näyttö haluttuun toimintatilaan. Neljällä nastalla (D4 - D7) siirretään tekstidata näytölle käyttäen kahta perättäistä 4-bittistä datapakettia [7, s. 9].

Digitaali-analogimuunnin

Microchip MCP4821 on yleiskäyttöinen SPI-väylään kytkettävä 12-bittinen digitaali-analogimuunnin. Piiriä ei ole suunniteltu käytettäväksi äänisignaalin tuottamiseen, vaan sen yleisimmät käyttökohteet ovat teollisuusjärjestelmissä esimerkiksi kalibrointi- tai kompensointipiirien osana.

Digitaali-analogimuuntimelta saatava signaali vaihtelee nollan ja käyttöjännitteen välillä. Tämän vuoksi signaalista tulee poistaa tasajännitekomponentti ja ulostuloimpedanssi pitää sovittaa käytettävän kuorman mukaisesti. Linjatasoisissa signaaleissa käytetään korkeaimpedanssisia kytkentöjä, jolloin kytkennän jännitteen vaihtelut siirtyvät vastaanotettavaan kuormaan virran sijasta. Lisäksi tulee huolehtia siitä, että signaalin amplitudi (äänenvoimakkuus) on säädettävissä esimerkiksi potentiometrin avulla.

Piiristä ulostuleva analoginen signaali ei sovellu liitettäväksi sellaisenaan esimerkiksi kaiuttimeen, koska signaali on aina jännitteeltään nollan ja käyttöjännitteen välillä,

sekä impedanssin sovituksen puutteen takia. Tämän lisäksi signaalissa oleva tasajännitekomponentti tulee poistaa ja ulostuloimpedanssi sovittaa linjatason impedanssin tasoiseksi. Lisäksi signaalin voimakkuuden tulee olla sopiva.

Ulostulojännite asetetaan halutuksi käyttäen kahta peräkkäistä 8-bittistä datapakettia. Näistä 12 bitillä asetetaan haluttu ulostulojännite ja neljällä bitillä asetetaan piiri vaadittuun toimintatilaan. MCP4821 sisältää vain yhden analogi-digitaalimuuntimen (DAC_A) jolloin ensimmäinen bitti, **A/B**, on aina 0. Ulostulovahvistus valitaan bitillä **GA** ja bitti **SHDN** on aina tilassa, 0 kun piiriä halutaan käyttää.

Jos ulostuleva analoginen signaali haluttaisiin suurimpaan mahdolliseen arvoonsa (käyttöjännite vähennettynä noin 10 mV:lla), lähetettäisiin piirille kaksi datapakettia: 00001111 ja 11111111. Vastaavasti pienin mahdollinen ulostulojännite valittaisiin peräkkäisillä datapaketeilla 00000000 ja 00000000. Kuvassa 7 esitellään piirin asetusrekisteri. [4, s. 1–5]

REGISTER 5-1: WRITE COMMAND REGISTER

Upper Half:							
W-x	W-x	W-x	W-0	W-x	W-x	W-x	W-x
$\overline{A/B}$	—	\overline{GA}	\overline{SHDN}	D11	D10	D9	D8
bit 15							bit 8

Lower Half:							
W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
bit 7							bit 0

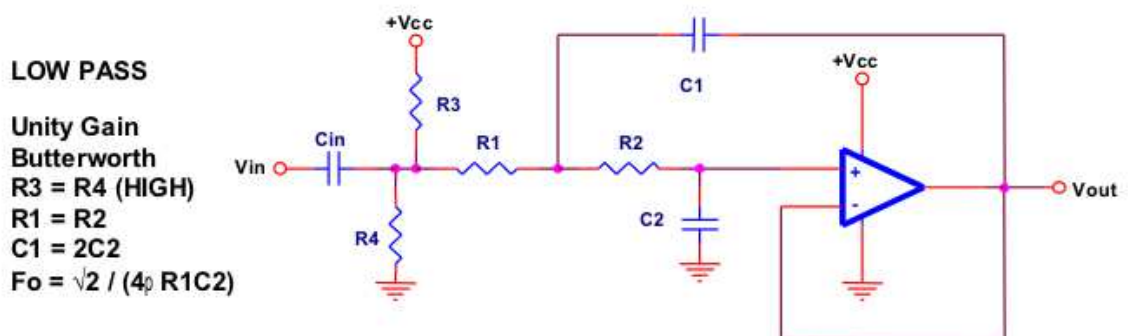
- bit 15 **$\overline{A/B}$** : DAC_A or DAC_B Select bit
 1 = Write to DAC_B
 0 = Write to DAC_A
- bit 14 — Don't Care
- bit 13 **\overline{GA}** : Output Gain Select bit
 1 = 1x ($V_{OUT} = V_{REF} * D/4096$)
 0 = 2x ($V_{OUT} = 2 * V_{REF} * D/4096$)
- bit 12 **\overline{SHDN}** : Output Power-down Control bit
 1 = Output Power-down Control bit
 0 = Output buffer disabled, Output is high-impedance
- bit 11-0 **D11:D0**: DAC Data bits
 12-bit number "D" which sets the output value. Contains a value between 0 and 4095.

Kuva 7. Integroidun piirin MCP4821 asetusrekisteri [4, s. 17]

Kaistanpäästösuodatin

Digitaali-analogimuuntimelta saatava analoginen äänisignaali tuodaan kaistanpäästösuodattimelle, joka koostuu alipäästösuodattimesta ja ylipäästösuodattimesta. Suodattimen tarkoitus on poistaa signaalista ei-toivotut elementit kuten tasajännite ja digitaali-analogimuunnoksessa syntyvät peilisignaalit.

Alipäästösuodatin on toteutettu aktiivisesti Sallen-Key-konfiguraatiossa operaatiovahvistimen ympärille. Käytetyllä suodatintopologialla saavutetaan noin 12 desibelin vaimennus oktaaville ja tasainen taajuusvaste päästökaistalla, kun komponentit on mitoitettu oikein. Kuvassa 8 esitellään alipäästösuodattimen esimerkkikytkentä, joka käytetyn operaatiovahvistimen takia on toteutettu käyttäen vain yhtä positiivista jännitelähdettä. [8, s. 3–14]



Kuva 8. Alipäästösuodattimen kytkentä [8, s. 16]

Ylipäästösuodatin on toteutettu vastuksesta ja kondensaattorista koostuvasta kytkennästä. Sen ainoa tehtävä on poistaa signaalista tasajännitekomponentti, jolloin komponenttien valintaan ei tarvitse kiinnittää niin paljon huomiota. Suodattimen alipäästöosan ylärajataajuus saadaan sijoittamalla yhtälöön

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

- f on suodattimen alarajataajuus
- R on suodattimen
- C on kondensaattorin kapasitanssi

komponenttiarvot, jos ne ovat tiedossa. Työhön valittiin kapasitanssiarvoltaan 4,7 nF :n kondensaattori, jolloin 12 k Ω :n vastuksen kanssa ylärajataajuudeksi tulisi laskennallisesti 3,386 kHz.

3.2 Laitteiston prototyypin testaus

Protokollaenkooderin toiminnan testaamista varten kirjoitettiin C-kielinen testiohjelmissä käyttämällä AVR Studio 5 -ohjelmointiympäristöä ja AVR-GCC-kääntäjää. Mikrokontrollerin ohjelmointiin käytettiin Atmel AVRISP mkII -ohjelmointilaitetta kytkettynä tietokoneeseen. Ohjelmiston tuli pystyä luomaan kaikki testauksessa tarvittavat signaalit:

- PS/2-näppäimistön, nestekidenäytön ja digitaali-analogimuuntimen ohjaus
- signaalin tuottaminen eri taajuuksilla
- laitteen toiminta kokonaisuutena.

Koska kyseessä oli ainoastaan testiohjelmiston suunnittelu, päädyttiin työssä käyttämään mahdollisimman paljon vapaasti ei-kaupallisissa järjestelmissä käytettäviä ohjelmistokirjastoja sen sijaan, että nämä olisi kirjoitettu itse. Työssä käytetyt valmiskirjastot on eritelty taulukossa 2. SPI-väylän ohjauskirjasto on kirjoitettu Atmelin julkaiseman ohjelmistoesimerkin pohjalta [9, s. 1–4].

Taulukko 2. Protokollaenkooderin testiohjelmistossa käytetyt valmiskirjastot

Kuvaus	Tekijä
The HD44780U LCD library	Peter Fleury [10]
PS/2 library	Jan Pieter de Ruitter [11]

Kun laitteisto oli kokonaisuudessaan rakennettu koekytkentälevylle, suoritettiin protokollaenkooderille useita mittauksia. Niiden tarkoitus oli varmistaa laitteen kaikkien osaluokkien toiminta sekä varmistua laitteen suorituskyvystä ennen laitteen lopullisen version suunnittelua piirilevy-suunnitteluohjelman avulla. Mittaukset suoritettiin Helsinki Hacklab ry:n elektroniikkalaboratoriossa käyttäen taulukossa 3 eriteltyjä mittalaitteita.

Taulukko 3. Mittauksissa käytetyt mittalaitteet

Laitteen tyyppi, valmistaja ja malli	Tekniset tiedot
Analoginen oskilloskooppi Tektronix 466	100 MHz:n kaistanleveys Kalibrointi ei voimassa
Digitaalinen oskilloskooppi Metrix OX 8620	100 MHz:n kaistanleveys Kalibrointi ei voimassa
Analoginen funktiogeneraattori GW Instek GFG-8215A	Taajuusalue 0.1 Hz – 3.0 GHz Kalibrointi ei voimassa
Digitaalinen taajuuslaskuri Black Star Meteor 1500	Mitta-alue 10 MHz - 3 GHz Kalibroitu 26.9.2011

Taajuuslaskuria lukuun ottamatta mittalaitteet olivat kalibroimattomia, joten mittaustulokset ovat suuntaa-antavia. Koska kyseessä oli pääasiassa äänitaajuisten signaalien mittaaminen, ei käytetyillä oskilloskoopin mittajohtojen laadulla ollut väliä.

Digitaal-analogimuuntimen testaus

Digitaal-analogimuuntimen suorituskyky testattiin seuraavalla tavalla: protokollaenkooderin testiohjelmistoon syötettiin ohjelmointiympäristön kautta muutamia 12-bittisiä digitaalisia arvoja, jotka vastasivat tiettyä datalehdessä määriteltyä jännitetasoa digitaal-analogimuuntimen ulostulossa.

Jännitteen mittaaminen suoritettiin oskilloskoopin avulla silmämääräisesti ja jännitearvoja tutkittiin yleismittarin avulla. Digitaalisanalogimuuntimen datalehdessä on mainittu jännitteen raja-arvoiksi 10 mV nollatason yläpuolella, ja 40 mV käyttöjännitteen alapuolella. Tämä vaikuttaa digitaalisanalogimuuntimen toimintaan siten, että signaali leikkaantuu ääriarvoissaan. Tämä tulee ottaa huomioon signaalia muodostaessa [4, s. 3].

Mittausten seuraavassa vaiheessa testiohjelmisto asetettiin tuottamaan taajuudeltaan noin 600 Hz sinimuotoista aaltokuvioita. Signaali johdettiin digitaalisanalogimuuntimen ulostulosta 10 k Ω :n vastukseen koekytkentälevyllä, ja aaltomuotoa tarkkailtiin oskilloskoopin sekä kaiuttimen avulla. Todettiin signaalin leikkaantuvan datalehdessä mainitulla tavalla.

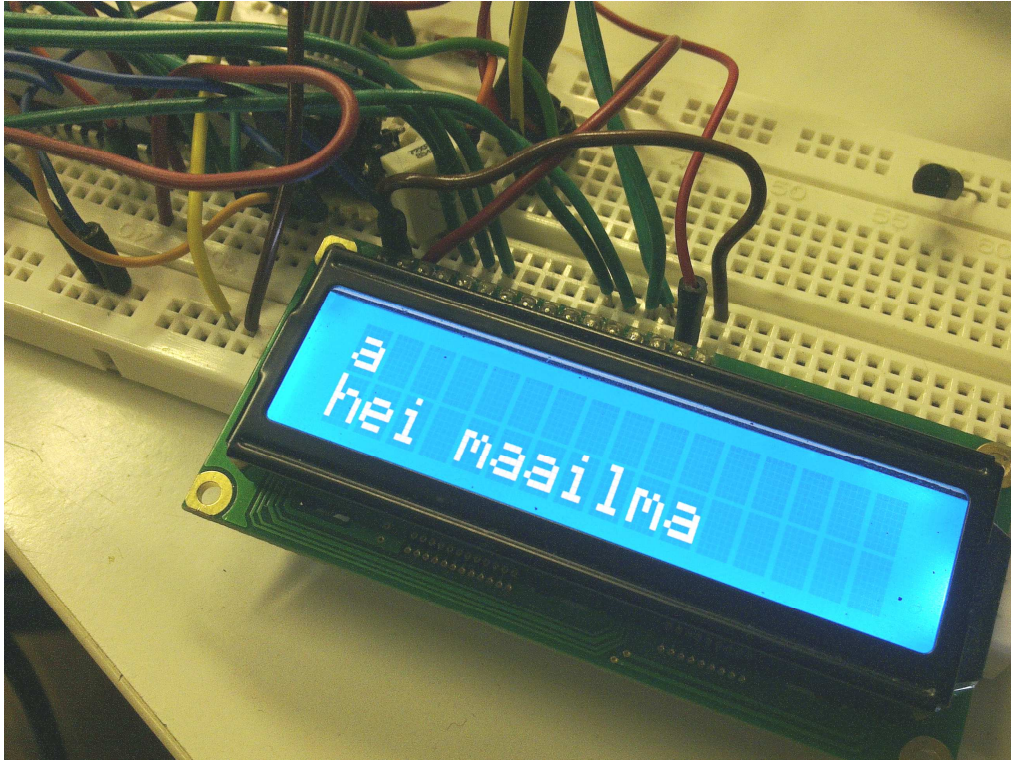
Kaistanpäästösuodattimen testaus

Kaistanpäästösuodattimen ominaisuuksien testaus suoritettiin syöttämällä suodattimen sisääntuloon funktiogeneraattorilta sinimuotoista signaalia taajuuksivälillä 100 - 2816 Hz, ja tutkimalla signaalin amplitudin muutosta suodattimen ulostulossa. Mittaus suoritettiin käyttämällä digitaalista oskilloskooppia, jossa jännitearvo oli luettavissa mittalaitteen näytöltä. Suodattimeen syötetyn signaalin vaiheen muuttumista ei tutkittu.

Mittaustulosten (ks. liite 4) perusteella todettiin suodattimen ylärajataajuuden (3 dB piste) olevan noin 1700-1800 Hz:n välillä. Tasajännitettä ei havaittu suodattimen ulostulossa, kun sen toimintaa tarkkailtiin oskilloskoopin ja laboratoriovirtalähteen avulla.

Järjestelmän muiden osien testaus

PS/2-näppäimistön ja nestekidenäytön toiminnan testaamiseksi kirjoitettiin lyhyt C-kielinen testiohjelma. Ohjelma lukee käyttäjän antaman näppäimistösyötteen laitteen muistiin, ja esittää käyttäjän kirjoittaman viestin laitteen nestekidenäytöllä. Kuvassa 9 (ks. seuraava sivu) havainnollistetaan nestekidenäytön ja näppäimistön toimintaa. Käyttäjän viimeisenä antama merkki esitetään ensimmäisellä rivillä, ja itse viesti seuraavalla rivillä.



Kuva 9. Käyttäjän antama näppäimistösyöte nestekidenäytöllä

Käyttäjä näkee viestistä aina vähintään niin monta merkkiä kuin nestekidenäytön yhdellä rivillä voidaan esittää. Viestiä voi muokata poistamalla merkkejä askelpalauttimella, ja koko viestikentän voi tyhjentää painamalla esc-näppäintä. Nestekidenäytön kontrastia voidaan säätää 10 k Ω :n säätövastuksen avulla. Jänniteregulaattorin ja transientisuojausosien toimintaa ei tutkittu, vaan ne päätettiin lisätä valmiiseen piirilevyyn.

3.3 Mittaustulosten tarkastelu

Kaikki testatut laitteiston osa-alueet toimivat datalehdissä esitettyjen spesifikaatioiden mukaisesti. Laitteiston virheettömän toiminnan kannalta on välttämätöntä, että digitaalisanalogimuuntimella tuotettu signaali ei vääristy missään tilanteessa ja aiheuta signaalin säröytymistä. Kaistanpäästösuodattimessa oli todennäköisesti käytetty väärää komponentteja, koska sen ylärajataajuus oli mitattaessa huomattavasti matalampi kuin sen olisi pitänyt olla.

Yksi tapa signaalin virheettömänä pitämiseen olisi hakutaulun arvojen muuttaminen siten, että digitaali-analogimuuntimen ulostulojännite on kaikissa tilanteissa datalehdessä mainittujen raja-arvojen sisällä. Muutos on helppo toteuttaa ohjelmistoon laske-malla hakutaulun sisältö uudelleen.

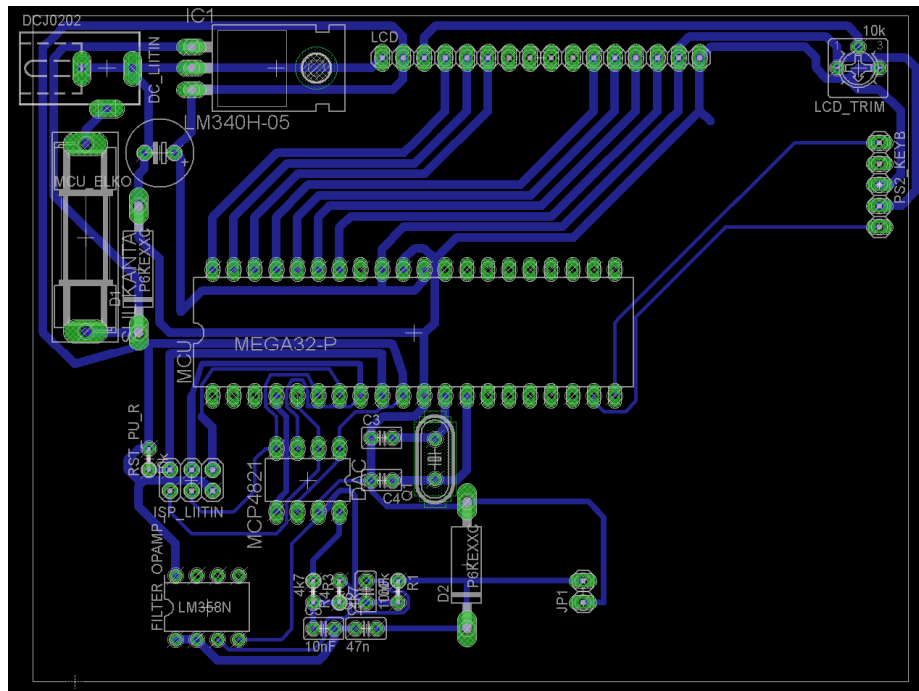
Jänniteregulaattorin toimintaa ei kytkennän yksinkertaisuuden vuoksi testattu, vaan päätettiin tehdä kytkentä sellaisena, kun se datalehden esimerkissä oli toteutettu. Samoin meneteltiin transienttisuojausdiodin lisäyksen kanssa.

3.4 Piirilevyn suunnittelu

Piirilevy suunniteltiin käyttäen CadSoft EAGLE 6 -elektroniikkasuunnitteluohjelmiston ilmaisversiota. Ohjelman suunnitteluominaisuudet on rajoitettu pienikokoisten, korkeintaan kaksikerroksisten piirilevyjen suunnitteluun. Suurin piirilevy, joka ohjelmiston ilmaisversiolla on tuotettavissa, on kooltaan 100 mm * 80 mm. Näiden lisäksi ohjelmiston käyttöoikeus on rajattu vain ei-kaupallisten piirilevyjen suunnitteluun.

Kun tarvittavat muutokset koekytkentälevylle tehtyyn prototyypiversioon oli tehty, aloitettiin kytkennän siirto suunnitteluohjelmaan komponentti ja liitäntä kerrallaan. Suurin osa komponenteista löytyi ohjelmiston komponenttikirjastosta, lukuun ottamatta digitaali-analogimuunninta, jonka komponentti luotiin ohjelmistoon itse.

Kun kytkentäkaavio oli piirretty ohjelmaan, tehtiin piirilevystä ohjelmassa sellainen versio, jonka tarkoitus oli selvittää, onko piirilevy tehtävissä yksipuoleisesti. Kuvassa 10 (ks. seuraava sivu) on ruutukaappaus piirilevyn ensimmäisestä versiosta suunnitteluohjelmistossa.

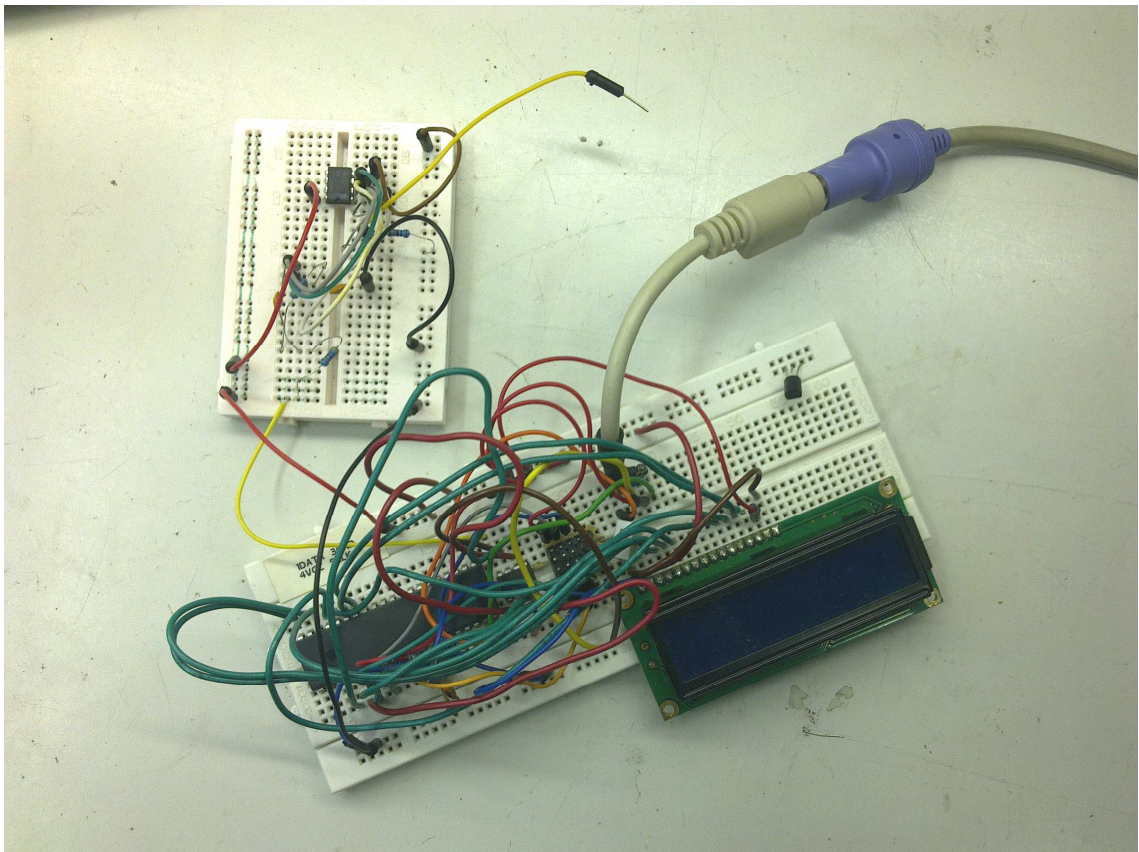


Kuva 10. Piirilevy suunnitteluohjelmassa

On huomattava, että tämän version tarkoitus oli vain varmistaa voidaanko piirilevy toteuttaa käyttäen vain substraatin yhtä puolta. Suunniteltu piirilevy ei sovellu sellaiseen käytettäväksi protokollaenkooderin lopullisessa versiossa ilman suuria muutoksia. Piirilevyn lopullista versiota ei suunniteltu käytetyllä ohjelmistolla lisenssirajoitteista johtuen.

4 Pohdintaa

Protokollaenkooderin suunnittelun lähtökohtana oli toteuttaa laite, joka toimisi tietokoneen korvaajana, kun käytettävissä on ohjelmistollisella signaalin dekodauksella varustettu radioamatööriradio. Laitteiston kahdelle koekytkentälevylle rakennettu prototyyppiversio, jonka pohjalta piirilevy suunniteltiin, esitellään kokonaisuudessaan kuvassa 11.



Kuva 11. Laitteiston prototyyppi kokonaisuudessaan koekytkentälevyllä

Toinen suunnittelun tavoite oli tehdä laitteesta niin edullinen ja rakenteeltaan yksinkertainen, että se olisi aloittelevan radioamatöörin tai elektroniikkaharrastajan helppo tehdä rakennussarjana. Tässä tavoitteessa onnistuttiin hyvin, koska komponenttien yhteenlaskettu hinta on noin 20 euroa ja piirilevy on valmistettavissa syövyttämällä yksipuoliselle piirilevylle.

Edullinen hinta valitettavasti näkyy kokonaisuuden laadussa ja laitteiston käytettävyydessä. Koska protokollaenkooderin suunnittelussa käytettiin edullisimpia saatavissa olevia komponentteja, vaikuttaa se väistämättä laitteiston käyttömukavuuteen ja tuotetun signaalin laatuun. Kaksirivinen nestekidenäyttö, PS/2-näppäimistö ja työhön valittu, muuhun kuin äänen tuotantoon suunniteltu digitaal-analogimuunnin ovat kaikki huonoja, mutta edullisia ratkaisuja laitteen osiksi.

Laitteen käytettävyyttä voitaisiin huomattavasti parantaa muutamalla muutoksella. Lisäämällä protokollaenkooderiin signaalin vastaanottomahdollisuus käyttämällä apuna automaattista tasonsäätöä, sekä mikrokontrollerin sisäänrakennettua analogi-digitaalimuunninta, voitaisiin näin syntyvää laitetta kutsua radiomodeemiksi.

Testiohjelmisto on nimensä mukaisesti laitteen testausta varten, eikä sitä voida käyttää lähetettävän signaalin tuottamiseen. Ohjelmisto voitaisiin suunnitella sellaiseksi, että siihen olisi helppo lisätä tarvittaessa moduuleita sekä lähetys- että vastaanottopuolelle.

Yhtenä jatkokehityksen lähtökohtana voisi olla vaihtaa työssä käytetty mikrokontrolleri esimerkiksi AT90USB1287:ään, jossa on tuki tietyille USB-laitteille, kuten USB-muistille tai -näppäimistöille. Tämä muutos nostaisi poikkeuksetta mikrokontrollerin hinnan muutamasta eurosta jopa 15 euroon, eikä pienikokoisten pintaliitoskomponenttien juottaminen onnistu ilman erityisiä työvälineitä sekä juottamiskokemusta.

Laitteen merkkigraafinen näyttö on tekstin syöttämisen kannalta ongelmallinen. Nestekidenäytön kahteen riviin mahtuu korkeintaan 32 merkkiä tekstiä. Työssä käytettävän Hitachi HD44780 -standardin mukaisen merkkigraafisen näytön voisi korvata jollain yleisesti käytössä olevalla graafisella näytöllä, eikä laitteen kokonaiskustannus merkittävästi muuttuisi.

Lähteet

- 1 The ARRL Handbook. 1994. Newington: The American Radio Relay League.
- 2 Martinez, Peter. PSK31: A new radio-teletype mode with a traditional philosophy. 1998. Kendal: Peter Martinez.
- 3 80110-AVR-07/10. 2010. San Jose: Atmel Inc.
- 4 Microchip MCP4821/MCP4822. 2005. Chandler: Microchip Technology Inc.
- 5 AVR042: AVR Hardware Design Considerations. 2011. San Jose: Atmel Inc.
- 6 Chapweske, Adam. The PS/2 Mouse/Keyboard Protocol. 2003. Verkkodokumentti. <<http://www.computer-engineering.org/ps2protocol/>> Luettu 14.5.2012.
- 7 HD44780U Dot Matrix Liquid Chrystal Display Controller/Driver. 1999. Tokyo: Hitachi, Ltd.
- 8 Carter, Bruce. A Single-Supply Op-Amp Circuit Collection. 2000. Texas Instruments Inc.
- 9 AVR320: Software SPI Master. 2005. San Jose: Atmel Inc.
- 10 Fleury, Peter. LCD library for HD44870 based LCD's. 2006. Verkkodokumentti. <<http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/avr-software.html#libs>> Luettu 15.5.2012.
- 11 de Ruiten, Jan-Pieter. PS/2 library. 2009. Verkkodokumentti. <http://www.avrfreaks.net/index.php?module=Freaks%20Academy&func=viewItem&item_id=82&item_type=project> Luettu 15.5.2012.

Ohjelmiston lähdekoodi

```
// Protokollaenkooderin testiohjelmisto 1
// main.c
// (c) 2012 Kim Kauppila

#include "main.h"

#define freq_lo 469
#define freq_hi 434
#define sinetable_size 64
#define current_table SineTable64

const char SineTable64[] = { 127, 139, 152, 164, 176, 187,
198, 208, 217, 225, 233, 239, 244, 249, 252, 253, 254, 253,
252, 249, 244, 239, 233, 225, 217, 208, 198, 187, 176, 164,
152, 139, 127, 115, 102, 90, 78, 67, 56, 46, 37, 29, 21,
15, 10, 5, 2, 1, 0, 1, 2, 5, 10, 15, 21, 29, 37, 46, 56,
67, 78, 90, 102, 115};

int ptr = 0;
int bitti = 0;
int bitptr = 0;
int charptr = 0;

void freq_shift(void);
int Init_Timers(void);
void sendchar(void);

int main(void)
{
    cli();
```

```
CPU_PRESCALE(CPU_16MHz);

sei(); // Prescaler
_delay_ms(200);

lcd_init(LCD_DISP_ON);
SPI_MasterInit();
Init_Timers();

lcd_init(LCD_DISP_ON_BLINK);
lcd_clrscr();
lcd_puts(">");

while (1);
}

ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
    DAC_Send(current_table[ptr]);
    ptr++;
    if (ptr >= sinetable_size) ptr = 0;
}

int Init_Timers(void)
{
    // TIMER1
    TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);
    sei();

    TCCR1B |= (0 << WGM13) | (1 << WGM12); //
    0,1,0,0 = CTC
    TCCR1A |= (0 << WGM11) | (0 << WGM10);
```

```
TCCR1B |= (0 << CS12) | (0 << CS11) | (1 <<
CS10); // 001 = no prescale
```

```
OCR1A = 434;
```

```
}
```

```
void sendbit(int bit)
```

```
{
```

```
    if (bit == 1)
```

```
    {
```

```
        OCR1A = freq_lo;
```

```
        TCNT1 = 0;
```

```
    }
```

```
    else
```

```
    {
```

```
        OCR1A = freq_hi;
```

```
    }
```

```
}
```

```
void sendchar(void)
```

```
{
```

```
    if (bit_get(data[charptr], BIT(bitptr)))
```

```
    {
```

```
        sendbit(1);
```

```
    }
```

```
    else
```

```
    {
```

```
        sendbit(0);
```

```
    }
```

```
    bitptr++;
```

```
    if (bitptr > 7)
```

```
    {
```

```
        bitptr=0;
```



```
        charptr++;
    }

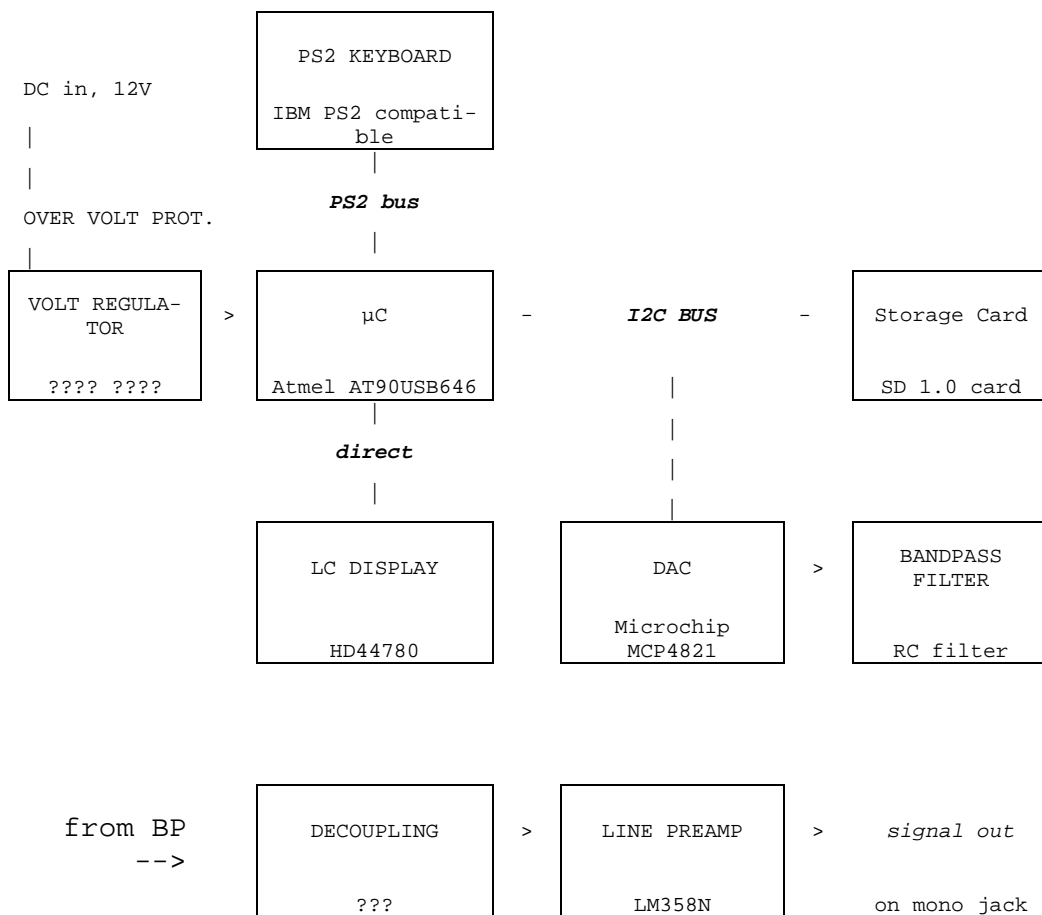
    //if (charptr > data_chars) charptr = 0;
    if (charptr > sizeof(data)-1) charptr = 0;

}

void freq_shift(void)
{
    if (bitti == 1)
    {
        OCR1A = 469; // 469 = 2126hz
        TCNT1 = 0;
    }

    if (bitti == 0)
    {
        OCR1A = 434;
    }
}
```

Laitteiston lohkokaavio



Kaistanpäästösuodattimen mittaustulokset

kHz	mV in	mV out	kerroin	vaim. dB
100	1520	1500	0.99	0.12
185	1540	1500	0.97	0.23
424	1540	1480	0.96	0.35
485	1520	1460	0.96	0.35
515	1520	1460	0.96	0.35
746	1520	1400	0.92	0.71
833	1520	1380	0.91	0.84
881	1520	1360	0.89	0.97
943	1520	1240	0.82	1.77
1041	1520	1340	0.88	1.09
1123	1520	1280	0.84	1.49
1342	1520	1220	0.80	1.91
1612	1520	1100	0.72	2.81
1904	1520	1020	0.67	3.46
2222	1520	880	0.58	4.75
2564	1520	800	0.53	5.58
2816	1520	720	0.47	6.49

Komponenttitason piirros suunnitteluojelmassa

