



Teemu Mahrberg

Digitaalitekniikan opetuksen kehittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Elektroniikan koulutusohjelma
Insinöörityö
11.4.2011

Tekijä(t) Otsikko	Teemu Mahrberg Digitaalitekniikan opetuksen kehittäminen
Sivumäärä Aika	52 sivua + 5 liitettä 11.4.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Elektroniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Elektroniikkasuunnittelu
Ohjaaja(t)	Lehtori Janne Mäntykoski
<p>Tässä insinööriyössä on kehitetty digitaalitekniikan koekytkentälevy ja sulautettujen järjestelmien kehitysalusta opetuksen apuvälineeksi. Pääasiassa keskityttiin opetusalustojen helppokäyttöisyyteen ja toimivuuteen. Suunniteluohjelmalla on käytetty Mentor Graphicsin PADS-ohjelmistoja. Työ jakautuu kahteen pääkokonaisuuteen: digitaalitekniikan koekytkentälevyyn ja sulautettujen järjestelmien kehitysalustaan.</p> <p>Aluksi on esitetty alustojen vaatimuksia vastaavat lohkokaaavioesitykset. Kehitetyt alustat ovat harjoitusalueita, joiden avulla digitaalitekniikan perusportti- ja sulautettujen järjestelmien ohjelmointia opiskellaan. Lohkokaaaviosuunnitelmasta käsiteltiin erityisesti, miten jännitteet kulkeutuvat levyjen rakenteellisten kokonaisuuksien välillä.</p> <p>Tämän jälkeen käsiteltiin levyille suunnitellut rakenteelliset kokonaisuudet, niiden ominaisuudet ja käyttötarkoitukset. Erityisesti kiinnitettiin huomiota levyillä itsenäisesti toimivien kokonaisuuksien teoreettiseen toimintaan ja käytännön toteutukseen. Toiminnan häiriöttömyys oli yksi tärkeistä kriteereistä, jotka otettiin huomioon kehityksessä.</p> <p>Viimeisenä kohtana käsiteltiin levyjen toimintaa todentavat mittaukset. Mittaukset tehtiin LPKF52 Protomat -piirilevyn jyrsimellä tehdyille prototyypilevyille. Mittaustulosten edellyttämät muutokset tehtiin levyille. Häiriösignaalit eliminoidiin levyjen rakenteellisten muutoksien avulla.</p>	
Avainsanat	koekytkentälevy, kehitysalusta, harjoitusalueita, digitaalitekniikka, sulautettu järjestelmä

Author(s)	Teemu Mahrberg
Title	Improving Quality of Teaching in Digital Electronics Study Module
Number of Pages	52 pages + 5 attachments
Date	11.4.2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Specialisation Option	Electronics Design
Instructor(s)	Lecturer Janne Mäntykoski
<p>In this graduate study a breadboard was developed for the purpose of testing basic gate circuitry in digital technology. Similar board was developed to aid coding and designing of embedded systems. Objective was to create these boards to support teaching in these areas. Computer aided design was made with Mentor Graphics PADS program family.</p> <p>This study is divided into two main sections, which are breadboard for digital electronics and board for embedded systems. Study is based on the functional requirements of these boards. Main focus was to create simple and easy-to-use tools that anyone can adapt in swift schedule.</p> <p>In this study, requirements of the boards are explained in a form of block diagrams. Block diagrams will show how different parts of the boards are connected to each other. Study is specially focused to theory and practical realization of stand-alone parts of the design.</p> <p>Prototype boards were created by using LPKF52 Protomat milling machine. Electrical properties were measured and changes were made to minimize signal interference. Measured data will be processed and analysed, and conclusions are made, in last parts of the two main sections.</p>	
Keywords	breadboard, development board, programming board, digital electronics, embedded system

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Digitaalitekniikan koekytkentälevy	2
2.1	Lohkokaavioesitys	2
2.2	Käyttöjännitteen ohjaaminen	3
2.3	Jänniteregulaattori	5
2.4	Toiminnan ajastus	15
2.5	Toiminnan ohjaaminen	25
2.6	Toiminnan tarkkailu	28
2.7	Prototyyppi	30
2.7.1	Regulaattorin kuormitettavuus	31
2.7.2	Kanttiaalto-oskillaattori	31
2.7.3	Kytkinvärähtelyn poisto	35
3	Sulautettujen järjestelmien kehitysalusta	37
3.1	Lohkokaavioesitys	37
3.2	Tiedon siirto	39
3.3	Hystereesikytkentä	41
3.4	Kallistusanturikytkentä	43
3.5	Toiminnan ohjaaminen	44
3.6	Toiminnan tarkkailu	47
3.7	Prototyyppi	48
4	Yhteenveto	49
	Lähteet	51

Liitteet

Liite 1. Oskillaattorikytkennän mittaustulokset

Liite 2. Kytkinvärähtelyn poistokytkennän mittaustulokset

Liite 3. Hystereesikytkennän mittaustulokset

Liite 4. Koekytkentälevyn layout

Liite 5. Kehitysalustan layout

Lyhenteet ja käsitteet

A/D	<i>Analog-to-digital.</i> Analogia-digitaalimuunnos, menetelmä jossa analoginen signaali muunnetaan digitaaliseksi.
ADC	<i>Analog-to-digital converter.</i> Analogia-digitaalimuunnin.
ADJ	<i>Adjust.</i> Merkintä säätönastalle ja alaindeksi säätösuureelle.
AIN	<i>Analog Input.</i> Analogisen signaalin sisäänmenonasta.
BLA	<i>Back Light Anode.</i> LCD-paneelin taustavalon positiivinen käyttöjännite.
BLK	<i>Back Light Cathode.</i> LCD-paneelin taustavalon negatiivinen käyttöjännite.
CAT	<i>Category.</i> Kategoria, kaapeleiden luokitusta ilmoittava lyhenne.
COL	<i>Column.</i> Pystyrivi.
CSB	<i>Chip Select Bit.</i> Piirin valintanasta, jonka looginen tila kertoo onko piiri käytössä.
CTS	<i>Clear To Send.</i> Ohjauslinja, jonka looginen tila kertoo laitteen valmiudesta vastaanottaa dataa.
D/A	<i>Digital-to-analog.</i> Digitaal-analogiamuunnos, digitaalinen signaali muunnetaan analogiseksi.
DB	<i>Data Bit.</i> Databitti.
DI	<i>Digital Input.</i> Digitaalisen signaalin sisäänmenonasta.
DIO	<i>Digital Input and Output.</i> Digitaalisen signaalin sisäänmeno- ja ulostulonasta.
DIP	<i>Dual In-line Package.</i> Komponentin kotelon tyyppi.
DO	<i>Digital Output.</i> Digitaalisen signaalin ulostulonasta.
E	<i>Enable.</i> Laitteen toiminnan mahdollistava nasta, nastan looginen tila määrää laitteen päälle tai pois päältä.
EN	<i>Enable.</i> Laitteen toiminnan mahdollistava nasta, nastan looginen tila määrää laitteen päälle tai pois päältä.
GND	<i>Ground.</i> Merkintä maadoitusnastalle tai nollan voltin jännitetasolle.
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit.</i> Kaksisuuntainen sarjaliikenneväylä, jossa laitteet määritellään päälaitteiksi tai alilaitteiksi.
ICP	<i>Input Capture Pin.</i> Laitteen nasta, jonka loogisen tilan muutoksella laite lukee ajastimen arvon rekisteriin.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i> Kansainvälinen tekniikan alan järjestö.

LCD	<i>Liquid Crystal Display.</i> Nestekidenäyttö.
LED	<i>Light Emitting Diode.</i> Valodiodi, diodi joka loistaa johtaessaan.
MISO	<i>Master in Slave out.</i> SPI-väylän yksisuuntainen datalinja, jossa päälaite vastaanottaa.
MOSI	<i>Master out Slave in.</i> SPI-väylän yksisuuntainen datalinja, jossa päälaite lähettää.
NC	<i>Not Connected.</i> Merkintä kotelon nastalle, joka ei johda mihinkään.
NPN	<i>Negative Positive Negative.</i> Merkintä, joka ilmoittaa transistorin puolijohdekerrosten seostuksen tyyppin.
OSC	<i>Oscillator.</i> Oskillaattori, merkintä oskillaatorille.
PD2	<i>Port D2.</i> Portti D2, merkintä portin D nastalle 2.
PNP	<i>Positive Negative Positive.</i> Merkintä, joka ilmoittaa transistorin puolijohdekerrosten seostuksen tyyppin.
PWM	<i>Pulse Width Modulation.</i> Pulssinleveysmodulaatio, tekniikka jossa digitaalisen signaalin pulssinleveyttä säädetään.
R/W	<i>Read or Write.</i> Merkintä luku- ja kirjoitusnastalle, jonka looginen tila määrää kumpi toiminto on käytössä.
RAM	<i>Random Access Memory.</i> Käyttömuisti, tyyppiltään luku- ja kirjoitusmuistia.
RD	<i>Receive Data.</i> Merkintä dataa vastaanottavalle nastalle.
RJ	<i>Registered Jack.</i> Standardisoitu verkkoliitännän muoto, missä liitin ja johtimet noudattavat numerointia vastaavia standardeja.
RS	<i>Register Select.</i> Laitteen ohjausnasta, jonka looginen tila ohjaa sisään menevän datan oikeaan rekisteriin.
RST	<i>Reset.</i> Laitteen nasta, jolla laitteen nollaus toteutetaan.
Rx	<i>Receive.</i> Merkintä dataa vastaanottavalle nastalle.
SCK	<i>Address and Data Serial Clock Input.</i> SPI-väylän kellopulssi, synkronoi laitteiden välisen toiminnan samanaikaiseksi.
SCL	<i>Address and Data Serial Clock Input.</i> I ² C-väylän kellopulssi, synkronoi laitteiden välisen toiminnan samanaikaiseksi.
SCLK	<i>Address and Data Serial Clock Input.</i> SPI-väylän kellopulssi, synkronoi laitteiden välisen toiminnan samanaikaiseksi.
SD	<i>Secure Digital.</i> Muistikortin tyyppi.
SDA	<i>Serial Data Line.</i> Kaksisuuntainen sarjaliikennelinja I ² C-väylässä.

SPI	<i>Serial Peripheral Interface Bus</i> . Synkroninen kaksisuuntainen sarjaliikenneväylä, jossa laitteet määritellään päälaitteiksi tai alilaitteiksi.
SS	<i>Slave Select</i> . SPI-väylän ohjauslinja, jonka looginen tila määrää linjaan kytketyistä laitteista yhden käytettävän laitteen.
ST	<i>Self Test Input</i> . Sisäänmeno laitteen toiminnan testaukseen.
T1	<i>Timer 1</i> . Ajastin 1, merkintä laitteen ajastimen 1 käyttämälle nastalle.
TD	<i>Transmit Data</i> . Merkintä dataa lähettävälle nastalle.
Tx	<i>Transmit</i> . Merkintä dataa lähettävälle nastalle.
USB	<i>Universal Serial Bus</i> . Sarjaväylä laitteiden liittämiseksi tietokoneeseen.
VCC	<i>Collector Supply Voltage</i> . Positiivinen käyttöjännite.
VDD	<i>Drain Supply Voltage</i> . Positiivinen käyttöjännite.
VEE	<i>Emitter Supply Voltage</i> . Maadoitus tai negatiivinen käyttöjännite.
VIN	<i>Voltage Input</i> . Signaalin sisäänmenonasta.
VOUT	<i>Voltage Output</i> . Signaalin ulostulonasta.
VREF	<i>Voltage Reference</i> . Jännitteen referenssi, jännitteen vertailu arvo.
VSS	<i>Source Supply Voltage</i> . Maadoitus tai negatiivinen käyttöjännite.

1 Johdanto

Digitaalitekniikan opetuksessa tarvitaan koekytkentälevyä, johon perusporttipiirit kytetään ja jonka avulla niistä rakennetaan suurempia kokonaisuuksia. Kytkemisen avulla varmistetaan, että kytkentä toimii suunnitelman mukaisesti. Koekytkentälevyä käytetään harjoitustöissä, joissa opiskelijat rakentavat loogisia operaatioita tekeviä kytkentöjä ja opiskelevat niiden toimintaa.

Sulautettujen järjestelmien kehitysalusta on digitaalitekniikan koekytkentälevyn tapainen. Kehitysalustoissa loogiset operaatiot toteutetaan ohjelmoitavilla mikrokontrolleri korteilla. Kehitysalustoja käytetään sulautettujen järjestelmien suunnittelun helpottamiseksi, mutta ne soveltuvat myös opetuksen apuvälineeksi. Kehitysalustoilla mikrokontrollerikortille asetetaan erilaisia toiminnan muotoja ohjelmoimalla sekä kytkemällä johdinta erilaisten rakenteellisten kokonaisuuksien välillä.

Insinööriyössä on kehitetty digitaalitekniikan koekytkentälevy ja sulautettujen järjestelmien kehitysalusta opetuksen apuvälineeksi. Suunnitteluohjelmaksi on käytetty Mentor Graphicsin PADS-ohjelmistoja. Työssä luotiin koekytkentälevy, joka soveltuu digitaalitekniikan ja ohjelmoinnin perusteiden opetukseen. Sulautettujen järjestelmien kehitysalusta palvelee opiskelijaa ohjelmoinnin perusteita vaativamman ohjelmoinnin opiskelussa.

Insinööriyössä selvitetään levyjen vaatimukset ja luodaan levyille vaatimusten mukaiset rakenteelliset kokonaisuudet. Levyillä itsenäisesti toimivista rakenteista teoreettinen osuus käsitellään tarkasti. Työssä tuodaan selkeästi esille, mitä levyillä tehdään ja mihin eri osia levyistä käytetään. Tavoitteena on, että opettaja tai oppilas pystyy työn perusteella perehtymään kokonaisuuteen nopeasti ja helposti.

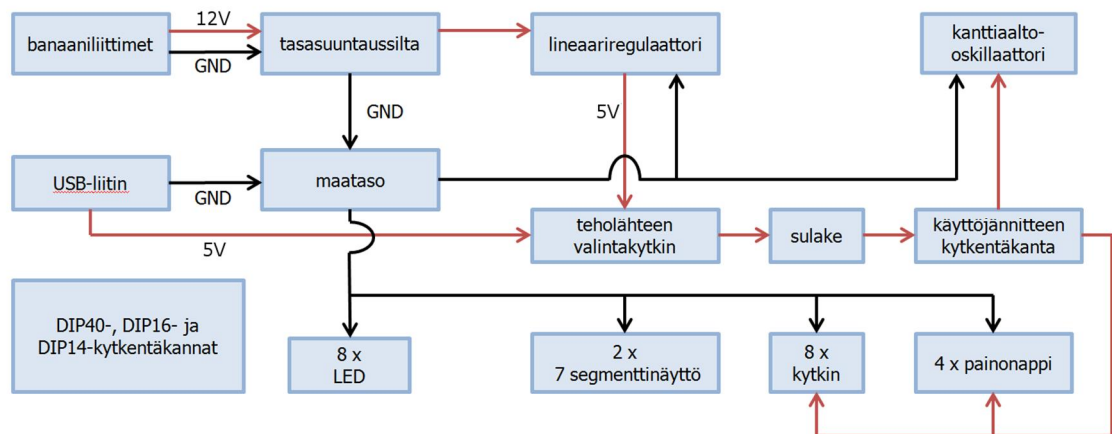
PADS-ohjelmistoilla tehdään suunnitelmat molemmista levyistä. Suunnitelmien pohjalta valmistetaan prototyypilevyt. Prototyypilevyistä tehdään mittauksia, joilla osoitetaan levyjen toiminta käytännössä. Suunnitelmiin tehdään muutoksia mittaustulosten edellyttämällä tavalla, että levyjen toiminta saadaan vastaamaan vaatimuksia.

2 Digitaalitekniikan koekytkentälevy

2.1 Lohkokaavioesitys

Digitaalitekniikan koekytkentälevy on tarkoitettu digitaalitekniikan opetuksen apuvälineeksi. Koekytkentälevyn tarkoitus on tarjota alusta, mihin voidaan liittää erilaisia digitaalitekniikan piirejä koekytkentää varten. Koekytkentälevyn kannoille voidaan liittää myös mikro-ohjaimia. Ohjelmoitavia mikro-ohjaimia voidaan käyttää levyllä vaivattomasti perusporttipiirien kanssa. Levy on suunniteltu 5 V:n käyttöjännitteelle.

Maadoitus ja käyttöjännite liitetään levyllä USB-liittimen tai banaaniliittimien kautta. Jännitteet päätyvät lopulta kytkentäkannoille, mistä niitä voidaan koekytkentää suorittaessa kytkeä johtimilla eteenpäin. Digitaalitekniikan koekytkentälevyn lohkokaaavioesitys esitetään kuvassa 1. Kuvassa jokaiselle koekytkentälevyn rakenteelliselle kokonaisuudelle on oma lohkonsa. Lohkokaavioesityksellä pyritään tuomaan esille, miten kytkentälevyn jännitteet kulkeutuvat lohkojen lävitse.



Kuva 1. Digitaalitekniikan koekytkentälevyn lohkokaaavioesitys

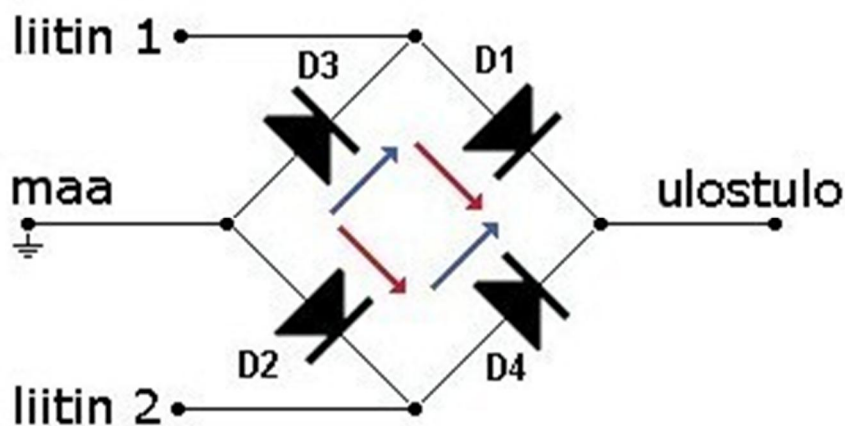
Koekytkentälevyissä pystytään käyttämään vain yhtä teholähdettä kerrallaan. Teholähde valitaan lähteen valintakytkimellä, joka yhdistää USB-liittimeltä tai banaaniliittimiltä tulevan käyttöjännitteen sulakkeelle. Liittimien maadoitus on epäsuorasti yhdistetty. Sulake on sijoitettu siten, että sitä ei pystytä koekytkentää suorittaessa ohittamaan levyn sisäisten rakenteiden kautta. Sulakkeeksi tulisi valita vaihdon yhteydessä virran kestoltaan maksimissaan 500 mA:n kestoisen sulake.

Rakenteet liittimien ja sulakkeen välillä on mitoitettu toimiakseen myös yli 500 mA:n virralla, että koekytkenän oikosulkutilanteessa komponenttivaurioilta välttyttäisiin. Muissa kytkentälevyn rakenteissa on käytetty vastuksia virran rajoittamiseksi. Oikosulkutilanteessa komponenttien vaurioitumiselta välttyään kuitenkin vain, jos koekytkenälevyssä on käytetty oikeanlaista sulaketta. Yli 500 mA:n kestoisen sulakkeen käyttöä tulisi tästä syystä välttää. Koekytkenätilanteessa virran suuruuden tulisi jäädä alle 500 mA:n. Regulaattorina on käytetty komponenttia, joka on sisäisellä kytkennällä suojattu oikosulkuvirralla. [1, s. 122 - 131.]

Koekytkenän toimintaa ja nastojen tilojen muutoksia voidaan tarkastella levyn kahdella 7-segmenttinäytöllä tai kahdeksalla ledillä. Vastaavasti koekytkenän toimintaan voidaan vaikuttaa vaihtamalla nastojen tiloja joko kytkimillä tai painonapeilla. Koekytkenän toiminnan nopeuden säätämiseen levyllä on kanttiaalto-oskillaattori, missä oskillointitaajuuden säätöalue on 1 - 100 Hz. Koekytkenälevyn suunnitelman layout -kuva esitetään liitteessä 4.

2.2 Käyttöjännitteen ohjaaminen

Koekytkenälevyn banaaniliittimet on kokoaaltotasasuunnattu kuvan 2 esittämällä tavalla. Tasasuuntaussilta koostuu neljästä diodista. Diodeista kaksi johtaa kerrallaan ja johtamattomat diodit käyttäytyvät piirissä avoimina. Toiminta perustuu diodin ominaisuuteen johtaa virtaa vain myötäsuuntaisesti.



Kuva 2. Kokoaaltotasasuuntaussilta [2, s. 60 - 62; 3, s. 189 - 190]

Tasasuuntaussilta on tarkoitettu käyttöjännitteen ja maadoituksen ohjaamiseen kuvan 2 (s. 3) mukaisesti punaisia tai sinisiä nuolia pitkin. Käytännössä tasasuuntaussilta tekee banaaniliittimistä bipolaarisen sisäänmenon, mitä ei voida kytkeä väärin. Kuvan 2 ulostulonastassa näkyy aina positiivinen jännite, ja maanastassa on koekytkentälevyn maadoituspotentiali riippumatta, mihin banaaniliittimeen käyttöjännitejohdin tai maadoitusjohdin kytketään. Ilman tasasuuntaussiltaa olisi vaarana, että käyttöjännitejohdin kytkettäisiin levyn maadoitussilmukkaan ja maadoitusjohdin kytkettäisiin käyttöjännitesilmukkaan.

Sähkövirran ja myötäsuuntaisesti kytketyn jännitteen suunta esitettiin kuvassa 2 (s. 3). Suunta on kuvan 2 nuolten suuntainen. Diodien voidaan ajatella johtavan kytkennässä vain myötäsuuntaisesti, koska johtaakseen estosuuntaan tarvitaan diodin yli estosuuntaisesti kytketty vähintään 50 V:n suuruinen jännite. Myötäsuuntaisesti kytketty jännite kytketään diodin anodilta katodille, ja estosuuntaisesti kytketty jännite kytketään katodilta anodille. Katodia merkitään diodin kotelossa ja piirrosmerkissä poikkiviivalla. [2, s. 27, 60 - 62, 80; 1, s. 4 - 6.; 3, 156 - 157.]

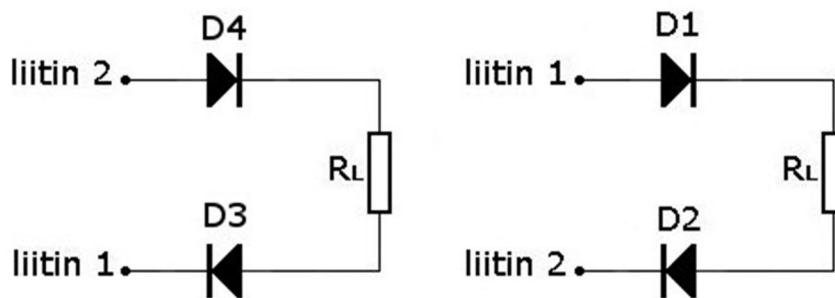
Diodeilla on muutamien mikrosekuntien suuruinen viivästys toiminnassaan, minkä aikana tyhjennysalueet diodeissa eivät ole muodostuneet. Tyhjennysalue estää diodia johtamasta estosuuntaan. Viivästys näkyy, kun jännitteitä kytketään koekytkentälevylle banaaniliittimien kautta. Viivästys voidaan havaita lyhyenä aikana, jolloin diodit ovat johtavia myös estosuuntaan. Viivästyksen aikana tasasuuntaussillan ulostulo näyttäytyy maadoituksena. Sovellukseen nähden diodien viivästyksellä ei ole suurta merkitystä. Tämä voidaan perustella sillä, että käyttäjä ei huomaa viivästystä sen ollessa ajallisesti hyvin lyhyt. [1, s. 26 - 27.]

Tasasuuntaussillan haitallisena ominaisuutena voidaan pitää diodien kynnsjännitteiden aiheuttamaa jännitehäviötä. Kynnsjännitteellä tarkoitetaan diodin myötäsuuntaisesti kytkettävää jännitettä, jota suuremmalla jännitteellä diodin läpi johtuu myötäsuuntaista virtaa anodilta katodille. Kun kynnsjännitteet otetaan huomioon, käyttöjännitettä on kasvatettava kahden diodin kynnsjännitteen verran kuormaan haluttavasta jännitteestä. [2, s. 25 - 27.]

Tasasuuntaussillan maanastassa oleva koekytkentäkuorman maadoituspotentiaali on yhden diodin kynnsjännitteen verran suurempi kuin todellinen maa. Koekytkentälevylä käytettyjen diodien kynnsjännite on diodin datalehden mukaan noin 1,1 V diodia kohden, 25 celciusasteen lämpötilassa. Lämpötilan kasvaessa kynnsjännite laskee.

[4, s. 1 - 2; 3, s. 183.]

Kuvassa 3 esitetään koekytkentää vastaava piiri, kun banaaniliittimiä on käytetty teholahteenä. Koekytkennässä käyttöjännitteen tulisi olla 5 V. Tästä syystä, Kirchhoffin jännitelain mukaan, kuvan 3 kaltaiseen piiriin olisi syötettävä 7,2 V, että kuormajännite saadaan 5 V:n suuruiseksi. Kuormavastus syntyy käyttöjännitteen ja maadoituksen välillä esiintyvien komponenttien ja johtimien yhteen lasketuista resistansseista. Kuvassa 3 kuormavastus on merkitty symbolilla R_L . [5, s. 26 - 30.]



Kuva 3. Tasasuuntaussillan vastinpiirit kuormitettuna

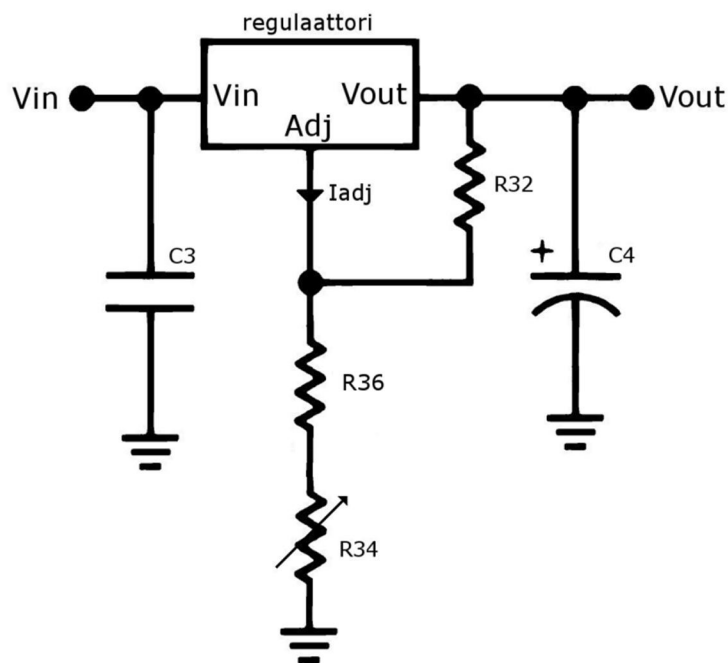
Kuvan 3 virtapiirit ovat sähköiseltä toiminnaltaan identtisiä, ja kuvissa on esitetty eri tilanteissa myötäsuuntaan johtavat diodit. Oikeanpuoleisessa piirissä käyttöjännite on kytketty liittimeen 1 ja vasemmanpuoleisessa piirissä käyttöjännite on kytketty liittimeen 2. Tasasuuntaussillan ominaisuuksista johtuen voidaan käyttöjännitteenä käyttää teoriassa myös vaihtojännitettä. Suunnittelutyö on kuitenkin toteutettu tasajännitesovellusta ajatellen. Tasasuuntaussillan ulostulonasta jatkuu lineaarisen regulaattorin sisäänmenonastaan. Kuvassa 3 lineaarinen regulaattori esitettiin osana kuormavastusta, eikä regulaattorin jännitehäviötä otettu huomioon tässä yhteydessä. [2, s. 60 - 62.]

2.3 Jänniteregulaattori

Käyttöjännite on tasasuuntauksen lisäksi myös reguloitu, kun tehoa syötetään koekytkentälevylle banaaniliittimien kautta. Jännitteen regulointi toteutettiin lineaarisella regulaattorilla, regulointiasteessa tapahtuvasta suuresta tehohäviöstä huolimatta. Syynä

lineaarisen regulaattorin käyttöön oli hakkuriregulaattorin ulostulojännitteessä helposti ilmenevät häiriöt. [2, s. 881 - 889.]

Regulaattorin tarkoitus on tarjota tasaista jännitettä lähdöstään, riippumatta sisäänmenossa tapahtuvasta jännitteen muutoksesta tai syötettävän jännitteen suuruudesta. Muutokset regulaattorin sisäänmenossa voivat teoriassa vaihdella regulaattorin sisäänmeno-jännitteen maksimiarvosta aina regulaattorissa tapahtuvan jännitehäviön ja ulostuloon haluttavan lähtöjännitteen summaan asti, kun regulaattorin tehonkesto ei huomioida. Koekytkeälevyn regulaattorissa tämä vastaa jännitettä 7 - 40 V. Jännitteen reguloinnissa käytettiin kuvan 4 mukaista kytkentää:



Kuva 4. Regulaattorin kytkentä [2, s. 888 - 890; 6, s. 16]

Regulaattorin sisäänmenon jännitteen kesto maihin nähden on maksimiarvoltaan 40 V ja jännitehäviön suuruus regulaattorissa pienimmillään 2 V. Regulaattorin ulostulojännite pyritään säätämään piirilevyn valmistuksen yhteydessä noin 5 V:iin säätövastuksella R34. Tässä yhteydessä on huomioitava, että ulostulojännitteen arvo muodostuu kuorman haluttavasta 5 V:n jännitteestä sekä regulaattorin ulostulon ja maadoitusnastan välisen diodin 1,1 V:n kynnsjännitteestä, jos jännite mitataan regulaattorin ulostulon ja banaaniliittimen väliltä. [5, s. 26 - 30.]

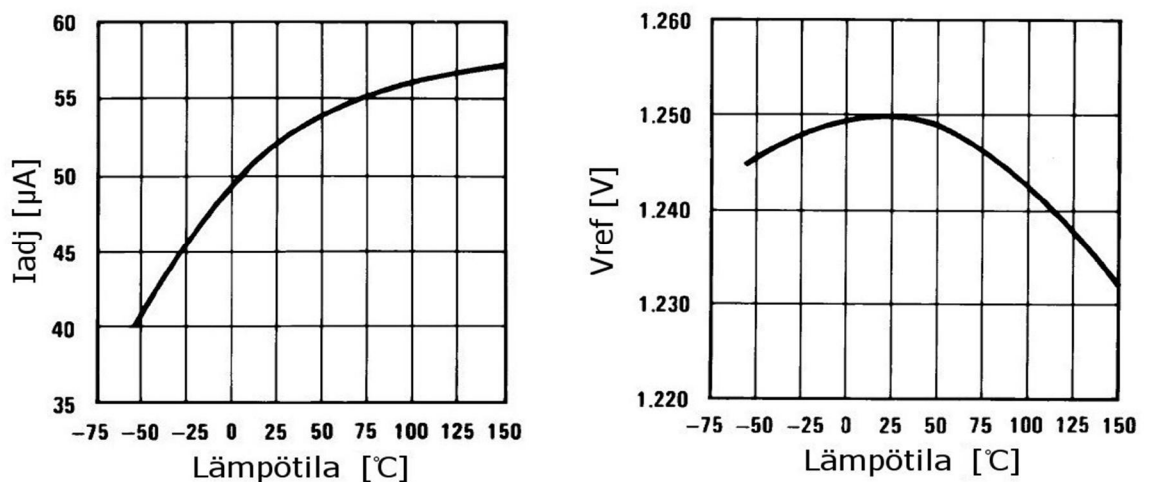
Regulaattorin lähtöjännite voidaan laskea kaavan 1 avulla. Kaavassa 1 mainittu referenssijännite muodostuu kuvan 4 (s. 6) kytkennässä regulaattorin ulostulosta säätönastasta, joka on merkitty kuvaan lyhenteellä Adj. Referenssijännite on luotu jännitteenjaoilla, joka toteutuu kytkennän vastuksilla R32, R34 ja R36. Referenssijännitteen suuruus on 1,25 V, kun säätövirta on noin 52 μA . [6, s. 5.]

$$V_{out} = V_{ref} * \left(1 + \frac{R_{34} + R_{36}}{R_{32}}\right) + I_{adj} * (R_{34} + R_{36}) \quad (1)$$

V_{ref} on referenssijännite yli vastuksen R32

I_{adj} on regulaattorin säätönastasta tuleva virta. [6, s. 9; 2, s. 889 - 890.]

Säätönastasta tuleva säätövirta muuttuu regulaattorin lämpötilan funktiona, ja virtaa voidaan pitää referenssijännitteen virhetekijänä. Säätövirran muutos johtaa referenssijännitteen muutokseen, joka aiheuttaa vastaavasti muutoksia ulostulojännitteessä. Referenssijännitteen ja säätövirran lämpötilariippuvuutta kuvataan seuraavasti:



Kuva 5. Säätövirran ja referenssijännitteen lämpötilariippuvuus [6, s. 6]

Regulaattorin R32 vastuksen arvo on tyypillisesti 240 Ω , ja se pyritään sijoittamaan mahdollisimman lähelle regulaattorin koteloä piirilevyn kuparivetojen resistanssien minimoimiseksi. Vastuksena R34 käytetään yleisesti potentiometriä, jolla ulostulon jännitettä voidaan säätää. Vastuksella R36 on lisätty säätövastuksen resistanssiin 240 Ω :n vakioarvo, josta säätö lähtee liikkeelle. [6, s. 8.]

Jos säätövastusta ei haluta käyttää voidaan kaavasta 1 johtaa vastuksen R34 mitoittamiseksi kaava 2 ja käyttää tilalla tavallista vastusta:

$$R_{34} = \frac{V_{out} - V_{ref}}{\left(\frac{V_{ref}}{R_{32}} + I_{adj}\right)} - R_{36} \quad (2)$$

V_{out} on ulostuloon haluttava jännite.

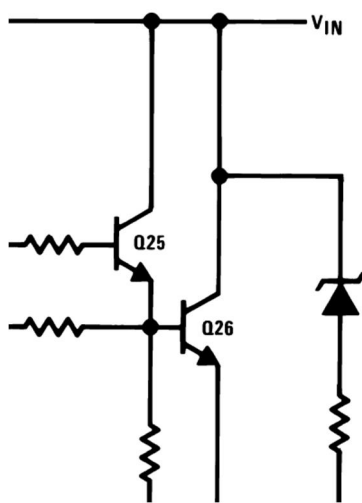
Vastus R34 on koekytkenälevyllä säätövastus, joka säätöalueella 1 - 1 000 Ω . Kaavalla 2 voidaan ratkaista, että säätövastuksen 472 Ω :n arvolla saadaan regulaattorin ulostuloon haluttu 5V. Säätövastuksen koko säätöalueella saadaan regulaattorin ulostulojännitettä säädettyä alueella 2,5 - 7,8 V. Säätövastuksen säädön kanssa on kuitenkin varottava, että ulostulojännitettä ei säädetä liian pieneksi sisäänmeno jännitteeseen nähden, koska tällöin regulaattoriin kertyy liian paljon tehoa. Hienosäätö tehdään regulaattorille valmistuksen yhteydessä tai ennen levyn käyttöönottoa mittaamalla ulostulon jännitettä maihin nähden, kun regulaattoriin on kytketty jännitteet. Ulostulojännitteen tulisi olla maadoittavaan banaani liittimeen nähden noin 6,1 V, että kuormaan kytkettyvä jännite on riittävä.

Säätövastuksen käyttämisen etuna on virhetekijöiden eliminoimisen helppous. Ulostulojännitteessä havaittavia mahdollisia virhetekijöitä ovat vastuksien toleranssien aiheuttamat vastusarvojen epätarkkuudet, säätönastasta tuleva säätövirta, piirilevyn kuparivetojen resistanssien aiheuttamat jännitehäviöt ja komponenttien lämpötilojen muutokset. Säättämällä R34 vastuksen arvoa voidaan nämä virhetekijät eliminoida ulostulojännitteestä. Virhetekijöitä on pyritty eliminoimaan myös kondensaattoreilla C3 ja C4, jotka esitettiin kuvan 4 (s. 6) kytkennässä.

Regulaattorin sisäänmenonastassa on maihin nähden kytkettynä ohituskondensaattori C3, jonka tarkoituksena on päästää läpi korkeataajuisia vaihtojännitekomponentteja ja tasoittaa regulaattorin sisäänmenossa näkyvää tasajännitettä. Regulaattorin ulostulonastassa oleva elektrolyyttikondensaattori C4 on hakkuriregulaattorin toiminnan kannalta usein kriittisempi ja huonosti valittuna voi aiheuttaa oskillointia muistuttavan ilmiön lähtönastan jännitteeseen. Regulaattorina käytetty piiri ei lukeudu hakkuriregulaattoreihin, joten ulostulon kapasitanssin mitoittamisessa ei tarvita tarkkoja laskelmia.

[2, s. 881 - 886; 6, s. 8.]

Lineaarisen regulaattorin ja hakkuriregulaattorin erottaa sisäisestä kytkennästä. Lineaariregulaattoreissa on sisäisen rakenteen viimeisenä vaiheena käytetty NPN-transistoreilla toteutettua Darlington kytkentää. Vastaavasti hakkuriregulaattoreissa viimeisenä vaiheena on usein vain yksi PNP-transistori. Kuvassa 6 esitetään regulaattorin sisäisessä kytkennässä transistoreilla toteutettu Darlingtonin kytkentä, jonka läpi suurin osa regulaattorin läpi kulkevasta virrasta kulkeutuu. Darlingtonin kytkentä on toteutettu kahdella transistorilla, joista käytetään myös nimitystä Darlingtonin pari. Darlingtonin kytkennällä saavutetaan huomattavasti yhtä transistoria suurempi virtavahvistuskerroin. [2, s. 890 - 891; 6, s. 14.]



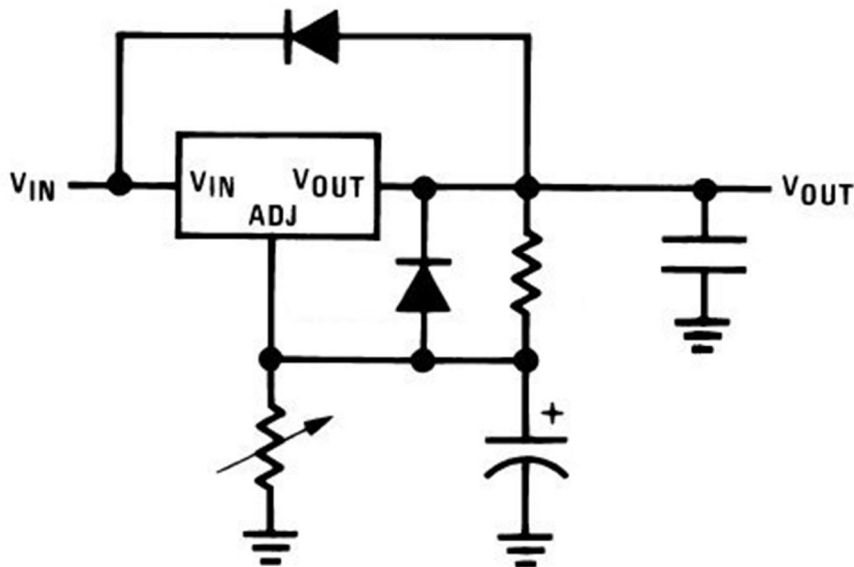
Kuva 6. Lineaariregulaattorin Darlingtonin pari ja zenervakauttaminen [6, s. 14]

Lineaarisen regulaattorin ulostulojännite on lähes poikkeuksetta sisäisellä kytkennällä vakautettu, eikä tällöin välttämättä tarvita ulostulokondensaattoria toiminnan vakauttamiseen. Toiminnan vakauttamisen toteuttaa regulaattorin sisäinen rakenne, mikä estää referenssi jännitteen muuttumista. Regulaattorin toimintaa vakauttavat piirit ovat usein kuvassa 6 esitetyn kaltaisia, zenerdiodien ja vastuksien sarjaan kytkentöjä, joilla kytketään referenssijännitettä ylläpitävään vastukseen R32 lisää tai vähemmän resistanssia. Kytkentä tapahtuu, kun zenerdiodin zenerjännite ylittyy. [3, s. 182 - 184.]

Zenerdiodille on tyypillistä, että ne johtavat virtaa rikkoutumatta myös estosuuntaan, kun estosuuntainen zenerjännite ylittyy. Zenervakauttaminen perustuu zenerdiodin ominaisuuteen, missä estosuuntainen jännite ei pääse nousemaan zenerjännitettä suuremmaksi. Jännitteen ylittäessä zenerdiodin zenerjännitteen, kytkeytyy zenerdiodi johtamaan ja käytännössä pienentämään varauksen määrää katodin puolella.

Estosuuntainen virta zenerdiodin läpi kasvaa, jos estosuuntaista jännitettä yritetään nostaa zenerjännitteestä. Toimintaa vakauttavassa kytkennässä voi olla zenerdiodien ja vastuksien lisäksi myös transistoreita ja vaikutus referenssijännitteeseen voidaan ajatella tapahtuvat säätövirran suurenemisen tai pienenemisen kautta. [3, 182 - 184.]

Sisäisestä vakauttamisesta huolimatta käytetyn regulaattorin ulostulonastassa ei suositeta käytettävän kapasitiivista kuormaa arvolta 500 - 5 000 pF. Ulostulokondensaattorin sarjaresistanssin suuruus on tyypillisesti 0,3 - 22 Ω ja tarkemmat vaatimukset ulostulokondensaattoriin liittyen on yleensä annettu regulaattorin datalehdessä, käytettävästä regulaattorista riippuen. Koekytkentälevyn regulaattorin ulostulonastaan suunniteltiin 100 μ F:n alumiinielektrolyyttikondensaattori C4, sillä teoriassa suurempi kapasitanssi regulaattorin ulostulossa madaltaa lähtöimpedanssia ja johtaa parempaan transienttivasteeseen. Suurilla lähtöjännitteillä ja yli 100 μ F:n ulostulokapasitanssin kanssa tulisi käyttää suojausdiodeja kuvan 7 tavoin, joten suurempaa ulostulokondensaattoria ei käytetty. [6, s. 8.]



Kuva 7. Regulaattorin suojaaminen virtapiikeiltä [6, s. 9]

Suojausdioidien tarkoitus on estää ulostulokondensaattorin purkautuminen regulaattorin läpi väärään suuntaan ja estää siten regulaattorin vaurioituminen. Suojausdiodeja käytetään myös sellaisten järjestelmien yhteydessä joissa esiintyy suuria ja lyhytaikaisia virtapiikkejä regulaattorin sisäänmenon puolella. [6, s. 8.]

Regulaattorin tehohäviö riippuu regulaattorin yli olevasta jännitteestä ja läpi kulkevasta virrasta kaavan 3 mukaan:

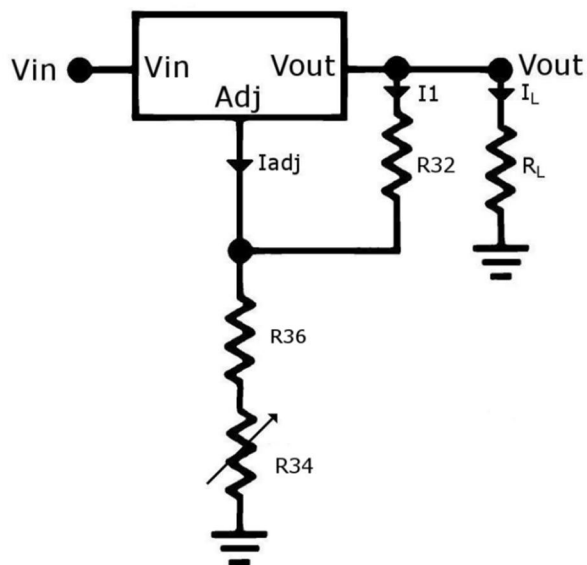
$$P_D = U * I_{tot} = (V_{in} - V_{out}) * I_{tot} \quad (3)$$

P_D on tehohäviö

U on regulaattorin jännitehäviö eli regulaattorin yli oleva jännite

I_{tot} on regulaattorin läpi kulkeva kokonaisvirta. [5, s. 45 - 47.]

Regulaattorissa tapahtuva jännitehäviö on minimiarvoltaan 2 V, mikä tarkoittaa, että sisäänmenojännitteen tulisi olla vähintään 2 V suurempi kuin ulostulojännitteen. Sisäänmeno jännitteeseen on huomioitava myös ulostuloon haluttavan jännitteen suuruus. Jos sisäänmenojännitettä nostetaan 7 V:n minimiarvosta kasvaa regulaattorin yli oleva jännite ulostulojännitteen pysyessä vakiona, mikä edelleen johtaa suurempaan tehohäviöön regulaattorissa. Regulaattorin sisäänmenojännitteen tulisi olla tehohäviön kannalta optimaalisessa tilanteessa vain hieman yli 2 V suurempi kuin ulostulojännitteen. Regulaattorissa tapahtuvan tehohäviön laskemiseen käytetyt virrat esitetään kuvassa 8:



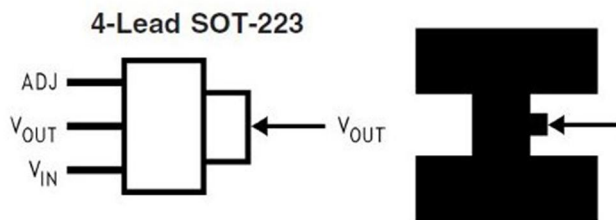
Kuva 8. Regulaattorin läpi kulkevat virrat [5, s. 45 - 47; 6, s. 1 - 16]

Kirchhoffin virtalain mukaan regulaattorin läpi kulkeva virta on kuvassa 8 esitettyjen virtojen summa. Regulaattorin ulostulokondensaattorin vuotovirran oletettiin olevan niin pieni, että se jätettiin tässä yhteydessä huomioimatta. Sulakkeesta johtuen

kuormavirran I_L suuruus voi maksimissaan olla 500 mA. Kun vastuksen R32 arvon tiedetään olevan 240Ω , ja vastuksen yli olevan jännitteen olevan 1,25 V voidaan kaavalla 4 laskea sen läpi kulkeva virta, jonka suuruudeksi saadaan 5,2 mA. [5, s. 30.]

$$I_1 = \frac{V_{ref}}{R_{32}} \quad (4)$$

Näillä tiedoilla kokonaisvirran voidaan pyöristää olevan maksimiarvolta 530 mA. Jännitehäviö regulaattorissa on noin 4,8 V, kun banaaniliittimelle syötetään 12 V. Ulostulojännite on samassa tilanteessa noin 6,1 V maadoittavaan banaaniliittimeen nähden, koska se koostuu diodinkynnysjännitteestä ja 5 V:n kuormajännitteestä. Tällöin tehohäviön suuruudeksi saadaan kaavalla 3 ylöspäin pyöristäen noin 2,6 W:n teho. Teho on komponentin kokoon nähden niin suuri, että komponentin jäähdytystä on parannettava ulkoisilla rakenteilla. Regulaattorin kotelon tyyppi ja yleinen jäähdytysmenetelmä esitetään kuvassa 9:



Kuva 9. Regulaattorin kotelo ja jäähdytyskuvio [5, s. 45 - 47; 6, s. 1 - 12]

Kuvassa 9 esitettiin jäähdytysmenetelmänä yleisesti käytetty piirilevyn juotospuolelle tuleva kuparitaso, mikä on kontaktissa regulaattorin toiseen ulostulonastaan. Kontakti on merkitty kuvaan nuolilla. Regulaattorin kotelossa olevat 3 muuta nastaa eivät ole kontaktissa jäähdytykseen käytettävään kuparitasoon. Kontaktilla pyritään johtamaan lämpöä komponentin sisältä kuparilevylle, jonka tarkoitus on edelleen luovuttaa lämpöä ympäristöön. [7, s. 165 - 167.]

Kuparitason pinta-alalla ja paksuudella on merkitystä, sillä pinta-alaltaan suurempi kuparitaso johtaa lämpöä paremmin ympäristöön ja paksumpi kuparitaso pystyy johtamaan enemmän lämpöä kerrallaan. Jotta saadaan selville, miten suuren pinta-alan

kuparitason tulee kattaa riittävään jäähdytykseen, on laskettava komponentin suurin sallittu lämpötilan nousu kaavalla 5:

$$T_{R_{max}} = T_{J_{max}} - T_{A_{max}} \quad (5)$$

$T_{R_{max}}$ on suurin sallittu lämpötilan nousu

$T_{J_{max}}$ on suurin sallittu regulaattorin lämpötila kaikissa olosuhteissa, 125 °C

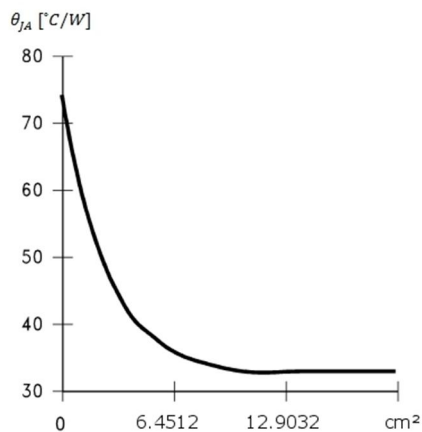
$T_{A_{max}}$ on suurin ympäristön lämpötila. [6, s. 9 - 10; 7, s. 165 - 167.]

Suurimmaksi sallituksi lämpötilan nousuksi saadaan 95 °C, kun oletetaan ympäristön lämpötilan olevan suurimmillaan 30 °C. Suurimmasta sallitusta lämpötilan noususta saadaan edelleen laskettua terminen resistanssi kaavalla 6. Terminen resistanssi kuvaa tässä yhteydessä sallittua lämpötilan nousua komponentissa esiintyvän tehon yksikköä kohden:

$$\theta_{JA} = T_{R_{max}} / P_D \quad (6)$$

θ_{JA} on terminen resistanssi. [6, s. 9 - 10; 7, s. 165 - 167.]

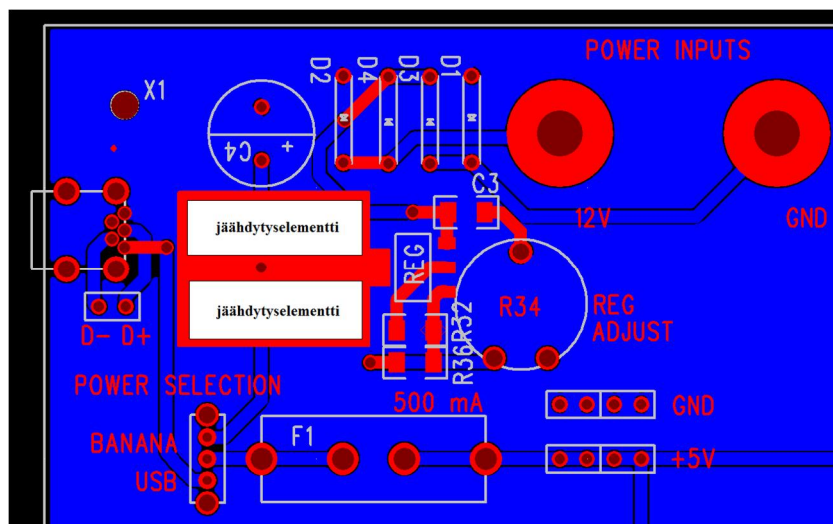
Termisen resistanssin arvoksi saadaan 37,4 °C/W tilanteessa, jossa banaaniliittimille on syötetty 12 V. Suuremmalla syöttöjännitteellä on huomioitava, että terminen resistanssi pienenee ja jäähdytyksen tarve komponentille kasvaa. Laskettua arvoa voidaan verrata suoraan regulaattorin datalehdessä esiintyvään kuvaajaan, jonka avulla voidaan selvittää tarvittavan jäähdytyksen määrä. Kuvassa 10 esitetään terminen resistanssi kuparitason pinta-alan funktiona:



Kuva 10. Termisen resistanssin suhde kuparitason pinta-alaan [1, s. 35; 6, s. 9]

Kuvasta 10 (s. 13) nähdään, että $6,5 \text{ cm}^2$ suuruinen kuparitaso regulaattorin alapuolella olisi yksin riittävä menetelmä komponentin jäähdyttämiseen 12 V syöttöjännitteellä. Jäähdytyksen riittävyydestä haluttiin varmistua myös suuremmilla jännitteillä, joten jäähdytys toteutettiin kolmella jäähdytys-elementillä ja pinta-alaltaan noin 5 cm^2 suuruisella kuparitasolla. Jäähdytys-elementit liimattiin Alutronicin valmistamalla lämpöä johtavalla piirasvaliimalla. Piirasvaliimauksen yhteydessä jäähdytys-elementit puristettiin liimauskohtaa vasten mahdollisimman suurella puristusvoimalla, että piirasvaliimakerroksen paksuus tulisi mahdollisimman pieneksi. Piirasvaliimakerroksen paksuus tulisi suurimmillaan olla 0,1 mm lämmönjohtokyvyn varmistamiseksi. [7, s. 165 - 167.]

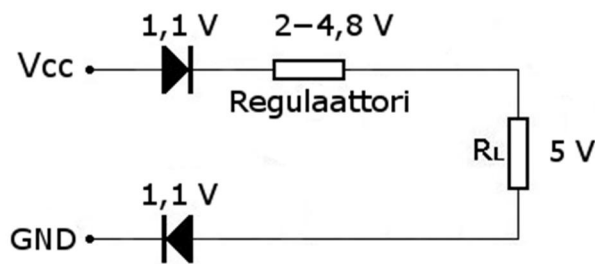
Jäähdytys-elementeistä kaksi liimattiin kuparitasolle ja yksi komponentin kotelon päälle. Terminen resistanssi oli arvoltaan $63 \text{ }^\circ\text{C/W}$ komponentin päälle liimatussa jäähdytys-elementissä ja kuparitasolle liimatuissa elementeissä $51 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Teoriassa jäähdytykseen olisi riittänyt myös vain yksi termiseltä resistanssiltaan alle $37,4 \text{ }^\circ\text{C/W}$ suuruinen elementti hyvin sijoitettuna. Jäähdytykseen ei käytetty tuuletusta, sillä normaalin tuuletuksen arvioitiin riittävän. Kuvassa 11 esitetään regulaattorin kytkentä suunnitteluohjelman kaaviossa. Kuvassa on myös kuparitasolle liimattujen jäähdytys-elementtien sijainti regulaattoriin nähden:



Kuva 11. Kuparitaso ja jäähdytys-elementit [1, s. 35; 6, s. 1 - 12]

Regulaattori on sisäisellä kytkennällä suojattu ylikuumentumiselta. Regulaattori kytkeytyy itsenäisesti pois käytöstä kuumentuessaan yli sallitun $125 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilan. Regulaattorin ulostulo on myös oikosulkusuojattu, mikä tekee siitä koekytkentöihin erittäin hyvin

sopivan. Regulaattorin suunniteltu tehonkesto rajoittaa banaaniliittimille kytkettävän käyttöjännitteen maksimiarvoa. Minimiarvoa rajoittavat tasasuuntaussillan diodien kynnyksjännitteet ja regulaattorissa tapahtuva pienin mahdollinen jännitehäviö. Banaaniliittimelle kytkettävän käyttöjännitteen suuruus tulisi siten olla 9,2 - 12 V. Jännitteen ollessa 9,2 V banaaniliittimellä saadaan kuormaan vielä haluttu 5 V:n suuruinen jännite. Kuvassa 12 esitetään vastinpiiri, missä näkyy diodit, regulaattori ja koekytkentäkuorma, kun käyttöjännite otetaan banaaniliittimillä [5, s. 26.]:



Kuva 12. Koekytkennän vastinpiiri [5, s. 26]

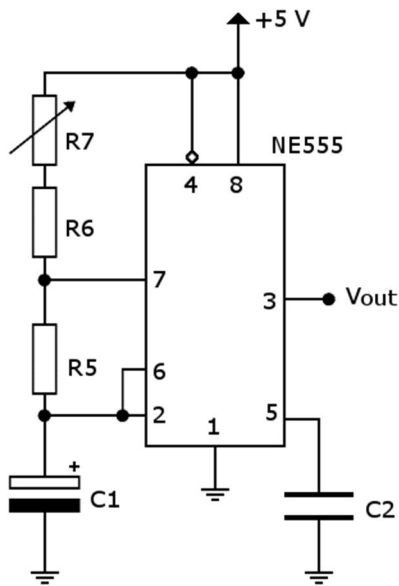
Kuvassa 12 esitettiin komponenttikohtaiset jännitehäviöt. Kuvasta 12 voidaan myös havaita regulaattorin jännitehäviön vaihtelevan käyttöjännitteen suuruudesta riippuen. Maksimiarvoa suurempaa sisäänmenojännitettä voidaan jossain määrin käyttää, sillä regulaattorin tehonkesto on laskettu regulaattorin suurimmalla mahdollisella virtakuormituksella ja koekytkennöissä jäädään suurimman osan ajasta huomattavasti alle tehon laskennassa käytetystä 530 mA:n suuruisesta virrasta. Tehonkesto on hieman ylimitoitettu suurimpaan mahdolliseen virtakuormitukseen. [5, s. 45.]

Teoriassa banaaniliittimiin voidaan kytkeä myös vaihtojännitelähde. Banaaniliittimille syötettävän vaihtojännitteen suuruus voi maksimissaan olla noin 17 V amplitudiltaan, mikä vastaa tehollisarvoltaan noin 12 V:n tasajännitettä. Suunnittelu on kuitenkin toteutettu tasajännitesovellusta ajatellen, eikä toiminta vaihtojännitteellä ole varmaa. [8, s. 16 - 17.]

2.4 Toiminnan ajastus

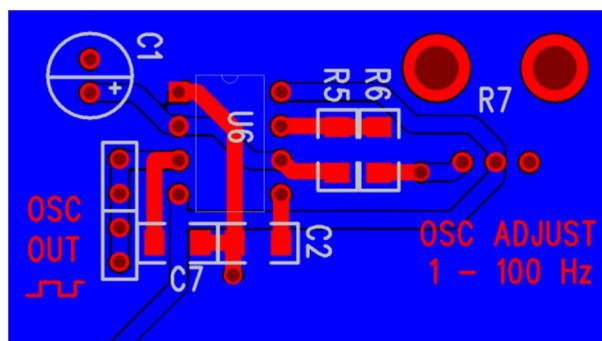
Koekytkentälevylle toteutettiin kanttiaalto-oskillaattori käyttämällä 555-ajastinpiiriä. Käytettyä ajastinpiirikytkentää kutsutaan toimintansa johdosta myös astabiiliksi multivibraattoriksi, sillä kytkennän ulostulo pysyy molemmissa loogisissa tiloissa määrätyn

ajan. Loogisella tilalla tarkoitetaan jännitetasoa. Loogisen ykkösen tila on digitaalitekniikassa usein 5 V:n suuruinen ja loogisen nollan tila maadoitusta vastaavassa tasossa. Edellä mainitut loogiset tilat ovat koekytkentälevylle suunnitellun kanttiaalto-oskillaattorin ulostulosignaalia vastaavia. Käyttöjännitteen oskillaattori saa sulakkeelta ja oskillaattorin ulostulo on yhdistetty kytkentäkannoille. Oskillaattorin kytkentä esitetään kuvassa 13:



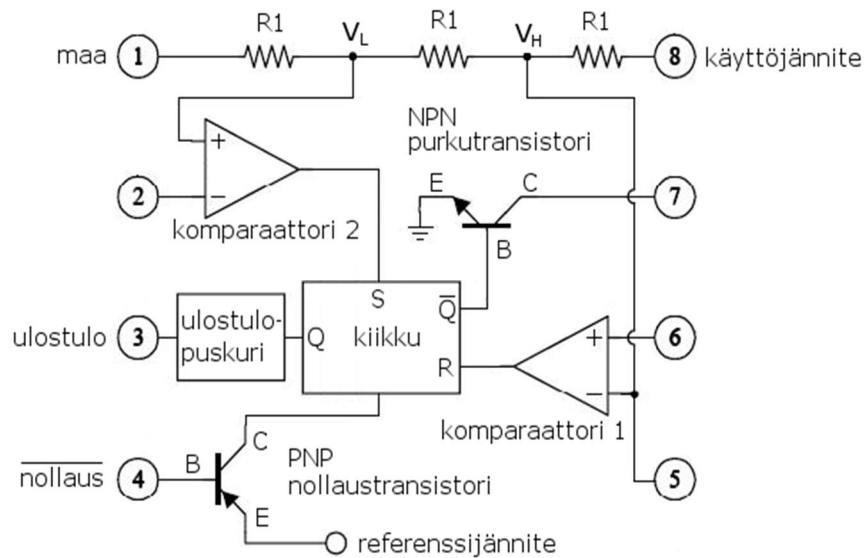
Kuva 13. Kanttiaalto-oskillaattorin kytkentä [3, s. 1075; 9, s. 58; 10, s. 403 - 409]

Oskillaattorin tarkoitus on antaa koekytkennässä käytettävälle logiikalle ajastukseen tarvittava signaali, jonka laskevalla tai nousevalla reunalla koekytkennän sekvenssipiirit suorittavat loogisia operaatioita. Kuvassa 14 esitetään oskillaattorin kytkentä suunnitteluohjelman kaaviossa. Kuparivetojen pituudet on pyritty minimoimaan oskillointitaajuuteen vaikuttavien komponenttien välillä.



Kuva 14. Oskillaattorikytkentä suunnitteluohjelmassa [3, s. 1075; 10, s. 406]

Oskillaattorin ulostulossa näkyvää kanttiaaltosignaalia voidaan säätää taajuusalueella 1 - 100 Hz kuvassa 14 esitetyllä 100 k Ω :n säätövastuksella R7. Säätövastuksen säätöalue on 1 – 100 000 Ω . Kytkennän vastuksilla R7, R6 ja R5 vaikutetaan kondensaattorin C1 latautumis- ja purkautumisaikaan. Oskillaattorista ulostulevan signaalin taajuus on riippuvainen ajasta, jossa kondensaattori latautuu ja purkautuu. Oskillaattorin toimintaperiaate selitetään sisäisen kytkennän avulla, joka esitetään kuvassa 15:



Kuva 15. Ajastinpiirin sisäinen kytkentä [3, s. 1071 - 1078; 10, s. 403 - 409]

Kuvasta 15 nähdään, että ajastinpiiri sisältää kaksi operaatiovahvistimen piirrosmerkillä kuvattua komparaattoria, RS-kiikun, purkutransistorin, nollaustansistorin, ulostulopuskurin ja muutamia vastuksia. Ulostulopuskurin tarkoitus on muokata piirin lähtöimpedanssi mahdollisimman pieneksi, että signaali saadaan kulkeutumaan ulostuloon kytkettäville piireille mahdollisimman hyvin. [10, s. 1077.]

Kuvassa 15 esitetyillä vastuksilla on luotu komparaattoreille vertailujännitteet V_H ja V_L . Vastukset ovat yhtä suuria, mistä syystä käyttöjännite jakautuu vastusten yli tasaisesti ja vertailujännitteille voidaan kirjoittaa jännitteenjaon mukaiset kaavat:

$$V_H = \frac{2 * R_1}{3 * R_1} * V_{cc} = \frac{2}{3} V_{cc} \quad (7)$$

$$V_L = \frac{1 * R_1}{3 * R_1} * V_{cc} = \frac{1}{3} V_{cc} \quad (8)$$

V_{cc} on piirin käyttöjännite. [3, s. 1074.]

Komparaattorit toimivat siten, että ne vertailevat sisäänmenojen välistä jännite-eroa ja ulostulojännite määräytyy suuremman sisäänmenojännitteen mukaan. Komparaattori antaa ulostuloon positiivisen käyttöjännitteen, kun positiivisen sisäänmenon jännite on negatiivista sisäänmenonastaa suurempi. Vastaavasti komparaattori antaa ulostuloon negatiivisen käyttöjännitteen, kun komparaattorin negatiivisessa sisäänmenonastassa on positiivista sisäänmenoa suurempi jännite. [10, s. 311 - 315.]

Kuvasta 15 (s. 17) havaitaan, että komparaattorin 1 positiivinen ja komparaattorin 2 negatiivinen sisäänmeno on kytkettynä kondensaattorille C1. Kondensaattorin jännitteen ylittäessä vertailujännitteen V_L suuruuden komparaattorin 2 sisäänmenossa, vaihtaa komparaattori ulostulon tilan nolllaksi. Kondensaattorin jännitteen ylittäessä komparaattorin 1 vertailujännitteen V_H suuruuden vaihtaa komparaattori vastaavasti ulostulonsa tilan, mutta tällä kertaa positiiviseksi, sillä kondensaattorin jännite on kytketty komparaattorin positiiviseen sisäänmenoon. [3, s. 1076 - 1077; 10, s. 406 - 407.]

Käyttöjännite on koekytkentälevyn tapauksessa 5 V ja tästä voidaan laskea kaavoilla 6 ja 7, että referenssijännitteiden V_L ja V_H suuruudet ovat 1,67 V ja 3,33 V. Komparaattoreiden ulostulotilojen muutoksia kondensaattorin jännitteen U_c muuttuessa esitetään seuraavasti:

Taulukko 1. Komparaattoreiden ulostulojen loogiset tilat [3, s. 1076 - 1077; 10, s. 406]

U_c [V]	Komparaattori 1	Komparaattori 2
5 - 3,33	1	0
3,33 - 1,67	0	0
1,67 - 0	0	1

Komparaattorin 1 ulostulo on edelleen kytkettynä RS-kiikun R-sisäänmenoon ja vastaavasti komparaattorin 2 ulostulo on kytkettynä kiikun S-sisäänmenoon. RS-kiikun sisäänmenot toimivat siten, että R-sisäänmeno nolllaa kiikun ulostulon ja S-sisäänmeno asettaa ulostulon loogiseen ykköseen. Kiikulla on kielletty tila, jossa R- ja S-sisäänmenot eivät saa olla samanaikaisesti arvossa 1, koska tällöin kiikun toiminta muuttuu epävakaaksi kiikun yrittäessä asettaa ja nolllata lähtönsä arvoa samanaikaisesti. [10, s. 372 - 377.]

RS-kiikun kielletystä tilasta johtuen komparaattorilähtöjen on käytävä taulukon 1 mukaisesti nollassa, ennen kuin toinen komparaattorilähtö voi jälleen asettua arvoon 1. Taulukko 1 voidaan edelleen laajentaa taulukoksi 2, josta nähdään RS-kiikun lähtöjen riippuvuus R- ja S-sisäänmenojen tiloista. Taulukossa 2 RS-kiikun lähtöä kuvaa Q. Taulukon \overline{Q} on nimeltään lähdön inversio, ja se vastaa vastakkaista arvoa kuin lähtö, nollauksen tai käynnistyksen jälkeistä ensimmäistä tilaa lukuun ottamatta.

[10, s. 372 - 377.]

Taulukko 2. RS-kiikun toiminta ajastinpiirissä [10, s. 372 - 377]

U_c [V]	$\overline{\text{nollaus}}$	R	S	Q	\overline{Q}
x	0	x	x	0	0
5 - 3,33	1	1	0	0	1
3,33 - 1,67	1	0	0	ei muutosta	ei muutosta
1,67 - 0	1	0	1	1	0

Taulukosta 2 nähdään, että RS-kiikun lähdössä ei tapahdu muutosta sisäänmenojen ollessa arvossa 0 ja 0. Kiikku säilyttää tällöin edellisen tilansa. Taulukossa esiintyvällä x:llä tarkoitetaan, että asetuksella ei ole merkitystä nollauksen arvolla. Nollalla aktiivinen ja ulkopuolelta tuleva nollaus on ajastinpiirissä toteutettu kuvan 15 (s. 17) NPN-transistorilla. Transistorin toiminta esitetään taulukossa 3:

Taulukko 3. Nollauksen toteutus ajastin piirissä [3, s. 220 - 221]

Jännitteet	$\overline{\text{nollaus}}$	Tila
$E > B < C$	0	saturaatio
$E < B > C$	1	suljettu

Taulukosta nähdään, että transistori toimii jänniteohjattavana kytkimenä, jolla on 2 aktiivista tilaa. Saturaatiotilassa transistori toimii täysin johtavana ja toteuttaa nollauksen. Tällöin virta pääsee kulkemaan vapaasti emitterin E ja kollektorin C välillä. Suljetussa tilassa transistori käyttäytyy avoimena osana piiriä. Purkutransistori toimii nollaustransistorin tavoin jänniteohjattavana kytkimenä. Erona on toiminnan suunta jännitteisiin nähden, sillä purkutransistorin on NPN-transistori ja nollaustransistori on

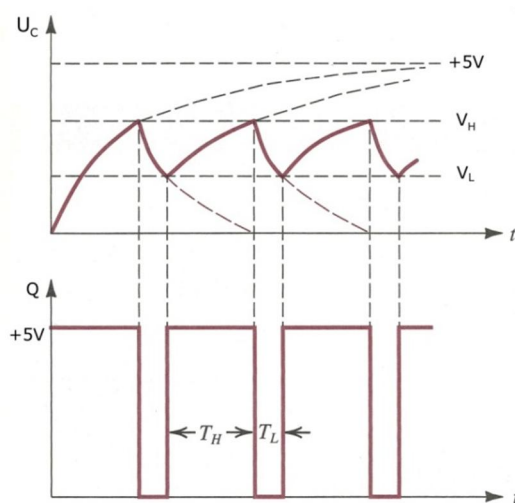
PNP-transistori. Purkutransistoria ohjataan RS-kiikun lähdön inversiolla. Purkutransistorin toiminta esitetään taulukossa 4:

Taulukko 4. Purkutransistorin toiminta [3, s. 220 - 221]

Jännitteet	\overline{Q}	Tila
$E < B > C$	1	saturaatio
$E > B < C$	0	suljettu

Purkutransistori on kytketty vastuksen R_5 läpi kondensaattorille, ja sen tarkoituksena on purkaa kondensaattorin varausta transistorin ollessa johtavassa tilassa. Purkutransistoria ohjataan RS-kiikun lähdön inversiolla. Purkutransistorin kannan B ollessa loogisessa tilassa 1 transistori johtaa. [3, s. 1076; 10, s. 406 - 407.]

Taulukosta 2 (s. 19) huomataan, että kondensaattorijännitteen kasvaessa piirin käynnistyksessä 3,33 V:n suuruuteen alkaa purkutransistorin läpi kulkemaan virtaa ja kondensaattorin jännite laskemaan. Jännite kondensaattorissa pääsee laskemaan 1,67 V:n arvoon sillä kondensaattorijännitteen alueella 3,33 - 1,67 V ei tapahdu muutoksia RS-kiikun lähdöissä, eikä siten purkutransistorin tilassa. Kondensaattorin jännitteen laskiessa alle 1,67 V:n purkutransistori ei johda, ja tällöin kondensaattorin jännite pääsee jälleen kasvamaan 3,33 V:n suuruuteen. Tämä jännitteen oskillointi on kondensaattorissa toistuvaa, ja sen mukana oskilloi myös RS-kiikun molemmat lähdöt. RS-kiikun lähdöissä oskillointi-ilmiö näyttäytyy kanttiaaltona. Kuvassa 16 esitetään kondensaattorin jännitteen ja piirin ulostulon käyttäytyminen:



Kuva 16. Oskillointi ulostulossa ja kondensaattorissa [3, s. 1077]

Kuvasta 16 (s. 20) havaitaan, että kondensaattorin C1 latautuessa oskillaattorin ulostulo on loogisessa ykkösessä ja kondensaattorin purkautuessa vastaavasti loogisessa nollassa. Kuvassa 16 (s. 20) aikaa, jonka ulostulo viettää loogisessa ykkösessä, on kuvattu ajalla T_H . Aikaa jonka ulostulo viettää loogisessa nollassa on vastaavasti kuvattu ajalla T_L . [3, s. 1077; 10, s. 407.]

Kondensaattorin latautuessa virta kulkee kondensaattorille vastuksien R5, R6 ja R7 läpi. Latautuessa kondensaattori jännite nousee referenssijännitteestä V_L arvoon V_H . Yleisesti sarjaan kytketyssä RC-piirissä latautuvan kondensaattorin jännite käyttäytyy matemaattisesti kaavan 9 mukaan:

$$U_C = V_{CC} * (1 - e^{-t/RC}) \quad (9)$$

t on aika

R on vastuksen resistanssi

C on kondensaattorin kapasitanssi

V_{CC} on piirin käyttöjännite. [8, s. 132 - 137.]

Oskillaattorin kytkentä vastaa kondensaattorin latautuessa kaavassa 9 esitettyä sarjaan kytkettyä RC-piiriä sillä teoriassa voidaan olettaa, että sisäänmenon impedanssi on komparaattoreissa ääretön. Komparaattorit eivät teoriassa tarvitse virtaa nastoihin 2 ja 6. Kondensaattorin latautuessa on purkutransistori myös suljetussa tilassa, joten nastassa 7 ei kulje virtaa. Latautuessaan piiri käyttäytyy vastuksien R5, R6 ja R7 suhteen sarjaan kytkettynä kondensaattorille C1. Soveltaen kaavaa 9 kytkennän kondensaattorin varautuminen voidaan esittää matemaattisesti kaavana 10:

$$U_C = V_{CC} * \left(1 - e^{-t/(C_1(R_5 + R_6 + R_7))}\right) \quad (10)$$

Kaava 10 olettaa, että latautumisen alkuarvo on suuruudeltaan 0, ja loppuarvo on käyttöjännitteen suuruinen. Kaavasta voidaan ratkaista aika T_H , joka tarvitaan oskillointiaajuuden kaavan johtamiseksi. Ulostulon ylhäällä oloaika T_H saadaan kaavasta 10 ratkaisemalla ylhäällä oloajan alku- ja loppuarvo. Sijoittamalla kaavaan 10 kondensaattorijännitteen U_C suuruudeksi V_L ja ratkaisemalla yhtälön toiselle puolelle muuttuja t

saadaan T_H :n alkuarvo t_1 . Ulostulon ylhäällä oloajan alkuarvolle t_1 on johdettu kaava 11:

$$t_1 = -C_1(R_5 + R_6 + R_7) * \ln\left(1 - \frac{V_L}{V_{CC}}\right) \quad (11)$$

Vastaavanlainen kaava voidaan johtaa ulostulon ylhäällä oloajan loppuarvolle t_2 , sijoittamalla kaavaan 10 kondensaattorin jännitteen tilalle referenssijännite V_H ja ratkaisemalla kaavasta yhtälön toiselle puolelle muuttuja t . Loppuarvon t_2 ratkaisemiseen on johdettu kaava 12:

$$t_2 = -C_1(R_5 + R_6 + R_7) * \ln\left(1 - \frac{V_H}{V_{CC}}\right) \quad (12)$$

Ulostulon ylhäällä oloaika voidaan esittää kaavojen 11 ja 12 erotuksena. Erotus esitetään kaavassa 13 ja toisessa muodossa kaavassa 14:

$$T_H = t_2 - t_1 \quad (13)$$

$$T_H = -C_1(R_5 + R_6 + R_7) * \ln\left(1 - \frac{V_H}{V_{CC}}\right) - \left(-C_1(R_5 + R_6 + R_7) * \ln\left(1 - \frac{V_L}{V_{CC}}\right)\right) \quad (14)$$

Ottamatta huomioon toleranssien aiheuttamia komponenttiarvojen muutoksia kaavalla 14 voidaan laskea, että T_H vaihtelee 7,495 mS:n ja 835,665 mS:n välillä. Ylhäällä oloaika on riippuvainen säätövastuksen arvosta. Kondensaattorin purkautuessa voidaan olettaa, että kaikki virta kondensaattorilta kulkeutuu purkutransistorille, piirin nastaan 7, vastuksen R5 läpi. Tilanne vastaa purkautuvaa ja sarjaan kytkettyä RC-piiriä. Matemaattinen malli esitetään kaavassa 15:

$$U_c = V_{CC} * e^{-t/(CR)} \quad (15)$$

Kaavasta 15 voidaan johtaa oskillaattorin ulostulosignaali alhaalla oloaika T_L . Kaavassa on oletus, että kondensaattorijännite lähtee purkautumaan käyttöjännitteen suuruudesta. Kaava olettaa myös, että purkautuminen tapahtuu maadoituspotentialiin saakka. Kaava 15 voidaan johtaa kaavan 16 (s. 23) muotoon, mikä vastaa paremmin oskillaattorin tilannetta. Kaavassa 16 (s. 23) oletetaan, että purkautuminen lähtee liikkeelle referenssijännitteen V_H suuruudesta. [3, s. 1078; 8, s. 132 - 137.]

$$U_C = V_H * e^{-t/(C_1 R_5)} \quad (16)$$

Purkautumista tapahtuu referenssijännitteeseen V_L asti, joten kaavasta 16 voidaan edelleen johtaa purkautumisen kestolle kaava 17 sijoittamalla kondensaattorijännitteen tilalle referenssijännitteen V_L suuruus ja ratkaisemalla yhtälöstä aika t .

[3, s. 1078; 8, s. 132 - 137.]

$$T_L = -C_1 R_5 * \ln\left(\frac{V_L}{V_H}\right) \quad (17)$$

Purkautumisen ajallinen kesto referenssijännitteeseen V_L asti on yhtä suuri kuin ulostulon alhaalla oloaika, mistä johtuen kaavassa 17 esitettiin symboli T_L . Kaavalla voidaan laskea, että T_L on noin 2,485 mS, kun komponenttien toleranssien aiheuttamia komponenttien arvojen muutoksia ei oteta huomioon. Oskillaattorin ulostulossa näkyvän kanttiaalto signaalin jakson aika on aika, jonka oskillaattorin kanttiaalto viettää ylhäällä ja alhaalla, signaalin kahdessa peräkkäin olevassa pulssissa. Jakson aika esitetään kaavoissa 18 ja 19:

$$T = T_H + T_L \quad (18)$$

$$T = -C_1(R_5 + R_6 + R_7) * \ln\left(1 - \frac{V_H}{V_{cc}}\right) + C_1(R_5 + R_6 + R_7) * \ln\left(1 - \frac{V_L}{V_{cc}}\right) - C_1 R_5 * \ln\left(\frac{V_L}{V_H}\right) \quad (19)$$

T on jakson aika [3, s. 1078; 10, s. 408.]

Oskillaattorin kanttiaaltosignaalin jakson ajasta voidaan edelleen johtaa kaava oskillointitaajuudelle. Taajuus on jakson ajan käänteisluku, ja se esitetään kaavoissa 20 ja 21:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_H + T_L} \quad (20)$$

$$f = \frac{1}{C_1 * (R_5 + R_6 + R_7) * \left(\ln\left(1 - \frac{V_L}{V_{cc}}\right) - \ln\left(1 - \frac{V_H}{V_{cc}}\right)\right) - C_1 R_5 * \ln\left(\frac{V_L}{V_H}\right)} \quad (21)$$

Sijoittamalla kaavaan 21 kaavassa esiintyvien muuttujien arvot ja olettamalla, että säätövastus R_7 on arvoltaan 1 Ω , saadaan taajuudeksi 87,391 Hz, mikä vastaa oskillointitaajuuden säädön ylärajaa. Vastaavasti olettamalla, että säätövastus on maksimiarvoonsa 100 k Ω , saadaan kaavalla 20 laskettua taajuuden säädön alaraja, mikä on teoreettiselta suuruudeltaan noin 1,191 Hz. Säätövastuksen toleranssi on $\pm 20\%$

ilmoitetusta 1 - 100 k Ω :n resistanssista, joten edellä esitetyt taajuudet ovat keskimääräisiä arvoja, joita kyseisillä komponenteilla saadaan kytkennässä tuotettua. Resistanssin toleranssista johtuva epätarkkuus aiheuttaa epätarkkuutta enimmäkseen taajuuden säätöalueen alarajataajuuteen, joka voi komponentista riippuen vaihdella noin 0,995 - 1,483 Hz. Muiden komponenttien toleranssien merkitys on säätövastuksen toleranssia pienempi. [8, s. 9.]

Taajuuden lisäksi ulostulon kanttiaallossa kiinnostavaa on pulssisuhde. Kun kondensaattorin latautumisaikaa muutetaan pidemmäksi, näyttäytyy muutos oskillaattorin ulostulon kanttiaallossa ylhäällä olevan reunan leveyden muutoksena. Signaalin jakso vie enemmän aikaa loogisen ykkösen tilassa, eli T_H kasvaa. Vastaavasti kondensaattorin latautumisaikaa lyhentämällä T_H laskee. Vastuksen R_5 ollessa säätymätön pysyy kanttiaalto alhaalla olevan reunan leveyden suhteen vakiona, sillä kondensaattorin purkautumisen nopeus vastuksen R_5 läpi on aina sama. Teoriassa kanttiaallon alhaalla olo aika T_L on aina yhtä pitkä. [3, s. 1076 - 1078; 10, s. 406 - 409.]

Oskillaattori käyttäytyy pulssinleveysmodulaattorin tavoin. Kanttiaallon pulssisuhdetta ja sen muutoksia voidaan tarkastella kaavoilla 22 ja 23. Pulssisuhde kuvaa puolijaksojen suhdetta jakson aikaan.

$$D_{on} = \frac{T_H}{T_H + T_L} = \frac{T_H}{T} \quad (22)$$

$$D_{off} = \frac{T_L}{T_H + T_L} = \frac{T_L}{T} \quad (23)$$

D_{on} on suhde jolloin signaali on 1

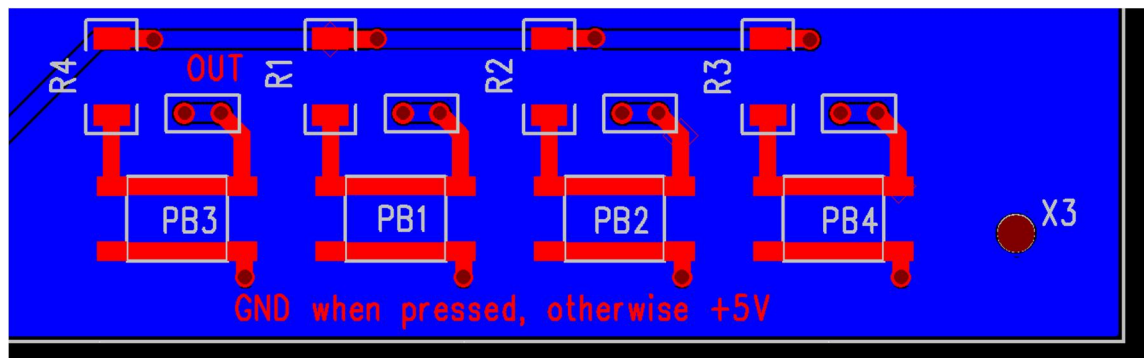
D_{off} on suhde jolloin signaali on 0. [3, s. 1078; 10, s. 408.]

Kaava 22 kertoo prosentuaalisen määrän jonka kanttiaallon positiivinen puolijakso vie loogisen ykkösen tilassa suhteessa jakson aikaan. Vastaavasti kaava 23 kuvaa prosentuaalista määrää, joka jakson ajasta kuluu signaalin loogisen nollan tasossa. Pulssisuhteet muuttuvat säätövastuksen resistanssin muuttuessa. Säätövastuksen ollessa 100 k Ω :n säädössä saadaan pulssisuhteeksi, jossa signaali on loogisen 1 tilassa, kaavalla 22 noin 99,7 %. Säädön ollessa 1 Ω :n arvossa saadaan samalla kaavalla pulssisuhteeksi 75,1 %. Oskillaattorikytkennän voidaan siten sanoa moduloivan kanttiaallon

pulssin leveyttä 75,1 - 99,7 % ylhäällä olevan reunan suhteen ja 0,3 – 24,9 % alhaalla olevan reunan suhteen. [3, s. 1078; 10, s. 408; 11, s. 249 - 252.]

2.5 Toiminnan ohjaaminen

Koekytkentälevyllä koekytkettäviä perusporttipiirejä voidaan ohjata tekemällä nastoihin tilan muutoksia kytkentälevyn kytkimillä tai painonapeilla. Kytkimet ja painonapit on sijoitettu levyn alareunaan, että niiden käyttäminen johdotetussa koekytkennässä olisi mahdollisimman helppoa. Painonappeja on levyllä yhteensä 4 ja ne esitetään suunniteluohjelman piirikaaviossa kuvassa 17:



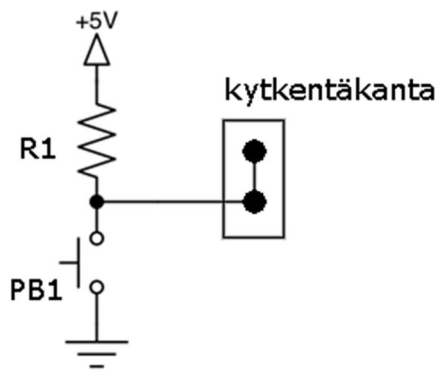
Kuva 17. Koekytkentälevyn painonapit

Kuten kuvasta 17 voidaan nähdä, on jokaista painonappia kohden ylösvetovastus. Ylösvetovastuksen tarkoituksena on pitää painonappikohtaiset kytkentäkannat positiivisessa käyttöjännitteessä, kun painonappia ei paineta. Ylösvetovastus rajoittaa myös virran suuruutta painonappia painettaessa ja estää oikosulkua muodostumasta. Painonappia painettaessa näkyy kytkentäkannoilla maadoitus. [11, s. 215.]

Painonapit on tarkoitettu erityisesti nollalla aktiivisten nastojen toiminnan ohjaamiseen. Nollalla aktiivisia nastoja ovat useiden piirien nollaustastat. Nollalla aktiivisella nastalla tarkoitetaan, että nastasta tapahtuva toiminto käynnistyy piirissä sisäänmenopulssin saavuttaessa nollatason. Toiminto suoritetaan, kun nollalla aktiiviseen nastaan on syötetty ylhäällä olevaa pulssia, joka muutetaan alhaalla olevaksi pulssiksi. [11, s. 215.]

Painonappia painettaessa alhaalla oleva pulssi saadaan toteutettua ja nollalla aktiivinen toiminto ohjattavassa piirissä käynnistettyä. Ylösvetovastukset ovat arvoltaan 2,2 kΩ,

minkä johdosta yhden painonapin kytkentäkannalta saadaan maksimissaan 2,3 mA:n suuruinen virta. Yhdellä painonapilla pystytään tästä syystä ohjaamaan vain rajallinen määrä perusporttipiirejä kerrallaan, sillä jokainen painonapille kytketty porttipiirin sisäänmenonasta vaatii pienen virran. Yhden painonapin ja siihen liittyvä kytkentä esitetään kuvassa 18:



Kuva 18. Painonappien ylösveto [11, s. 215]

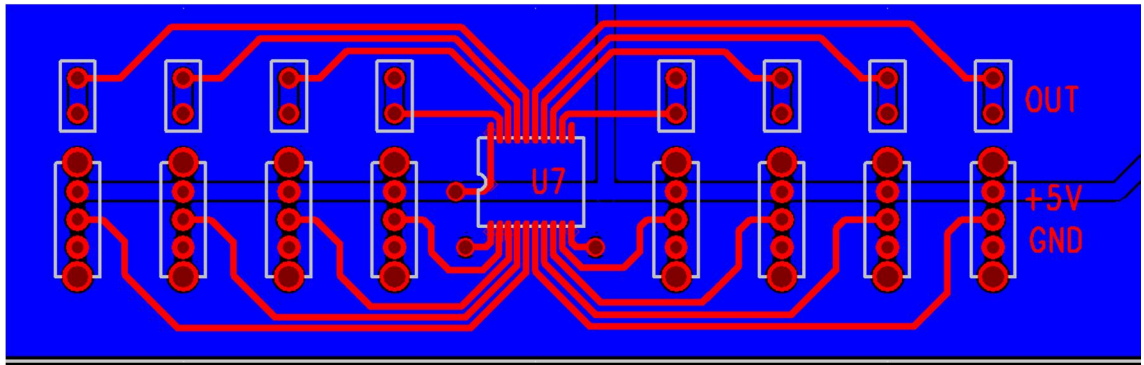
Painonappien lisäksi on kytkentälevyllä kytkimiä, joita voidaan käyttää painonappien tavoin logiikan toimintojen ohjaamiseen. Kytkimien toiminnan ero painonappeihin nähden on niiden lukittuminen loogisen ykkösen tai nollan tilaan. Käytetyt painonapit eivät ole pohjaan lukittuvia, eikä niitä siten saa jäämään loogisen nollan tilaan.

Kytkimet ohjaavat painonappien tavoin käyttöjännitteen tai maadoituksen kytkentäkannoille. Jokaisella kytkimellä on 2 eri asentoa. Kytkimen ollessa yläasennossa on kytkimen viereisellä kytkentäkannalla käyttöjännite ja kytkimen ollessa ala-asennossa näkyy kytkentäkannalla maadoitus. Kytkimien asennon vaihdon yhteydessä on tyypillistä, että kytkin ei välittömästi lukitu haluttuun tilaan.

Teoriassa kytkimen kytkeytyminen tiettyyn asentoon tapahtuu aina useaan kertaan ennen varsinaista kytkeytymistä. Tätä ilmiötä kutsutaan kytkinvärähtelyksi, ja se aiheuttaa useissa sekvenssipiireissä ongelmia, jos kytkimet kytketään ajastukseen vaikuttaviin nastoihin sellaisenaan. Pahimmassa tapauksessa piirin toiminta käynnistyy useaan kertaan ja toiminta muuttuu hallitsemattomaksi. [11, s. 215; 12, s. 3 - 4.]

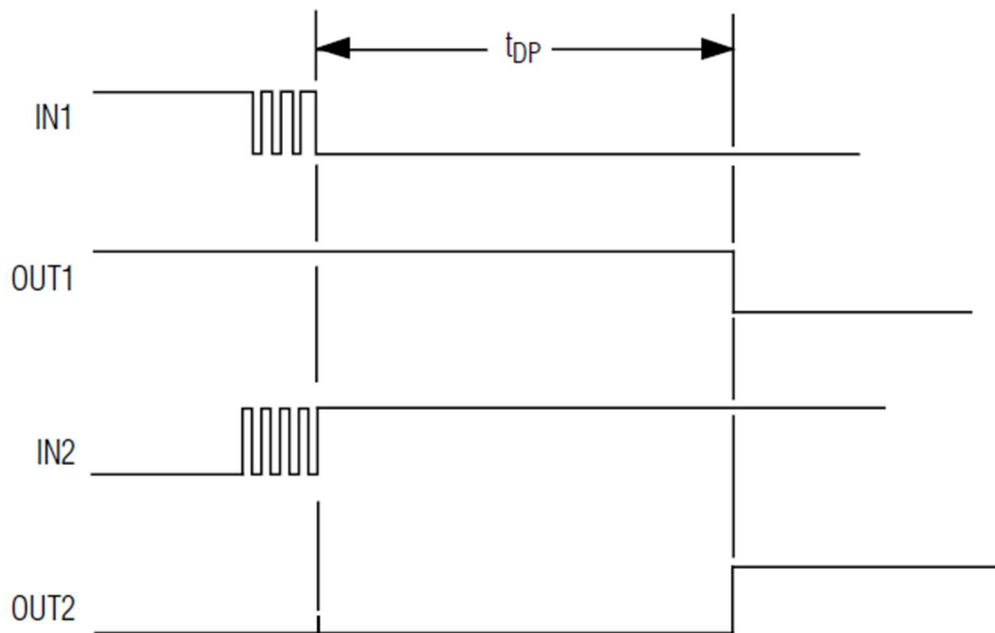
Kytkinvärähtelyn poistoon on käytetty Maximin valmistamaa piiriä, joka poistaa kytkinvärähtelyä luomalla viivästyksen kytkimiltä tulevien signaalien muutoksiin.

Kytkinvärähtelyä poistavaan piiriin liitettiin kaikki koekytkentälevyn kahdeksan kytkintä. Kuvassa 19 esitetään kytkimiin liittyvä kytkentä suunnitteluohjelman kaaviossa:



Kuva 19. Kytkimien kytkeminen piiriin [12, s. 7]

Kuvasta 19 voidaan nähdä, että kytkinvärähtelyä poistava piiri sijaitsee oikein sijoitettuna kytkimien ja kytkentäkantojen välillä. Toimiakseen piiri ei tarvitse kuin maadoituksen ja käyttöjännitteen. Kuvassa 20 esitetään teoreettinen kytkinvärähtely kytkinvärähtelyä poistavan piirin sisäänmenossa:



Kuva 20. Kytkinvärähtelyn poisto [11, s. 215; 12, s. 3 - 5]

Kuvasta 20 havaitaan kytkinvärähtelyä poistavan piirin ulostulon vaste. Sisäänmenossa 1 esitettiin kytkimen tilan muutos käyttöjännitteestä maadoitukseen ja sisäänmenossa 2 muutos tapahtuu vastakkaiseen suuntaan.

Kytkimen tilan muutos tapahtuu ensimmäisellä nousevalla tai laskevalla reunalla. Kuvassa 20 voidaan nähdä, että kytkinvärähtely muistuttaa kanttiaaltomaista oskillointia käyttöjännitteen ja maadoituksen välillä.

Kytkinvärähtelyä poistavan piirin toiminta perustuu siihen, että piiri havaitsee sisäänmenossa tapahtuvan jännitteen muutoksen ja odottaa kunnes muuttunut sisäänmeno jännite asettuu tiettyyn arvoon. Asettumisen jälkeen piiri odottaa kuvassa 20 (s. 27) esitetyn viivästyksen ajan t_{DP} , mikä on tyypillisesti 40 mS.

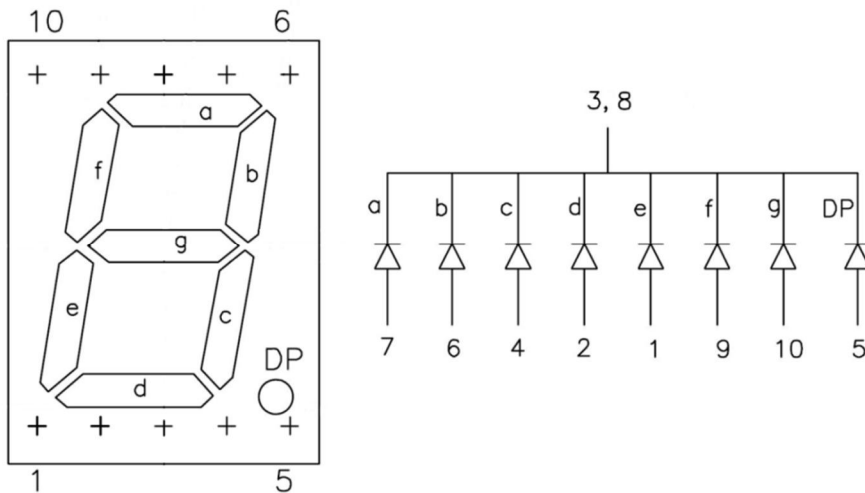
Viivästyksen jälkeen piiri kytkee kytkimeltä saapuvaa jännitettä vastaavan loogisen tilan ulostuloonsa. Viivästyksen aikana piiri antaa ulostuloonsa edellistä loogista tilaa. Kytkimen tilan muutos näyttäytyy kytkentäkannoilla siten viiveellä, mutta käyttäjä ei huomaa tässä eroa viivästyksen ollessa ajallisesti hyvin lyhyt. [12, s. 1 - 5.]

2.6 Toiminnan tarkkailu

Koekytettävän logiikan toimintaa voidaan tarkkailla levyn näytöillä ja ledeillä. Kytkentälevyllä on paikat kahdelle 7-segmenttinäytölle, jotka voidaan liittää suoraan kannoille. Näyttöjä käytetään usein ohjauspiirien kanssa, joita voidaan kytkeä koekytkentälevyn muihin kantoihin ja johdottaa edelleen 7-segmenttinäytöille.

Tyypillisesti ohjauspiirit muuntavat binäärikoodatun desimaaliluvun 7-segmenttinäytölle sopivaan muotoon. Hexadesimaalilukujen esittäminen segmenttinäytöillä sen sijaan vaatii mikroprosessorin, jossa käännös segmenttinäytölle toteutetaan ohjelmalla. [10, s. 16; 11, s. 231 - 232.]

Koekytkennässä käytettävien 7-segmenttinäyttöjen tulisi olla yhteiskatodikytkettyjä, koska yhteisanodikytketyissä segmenttinäytöissä valodiodit kytkeytyvät koekytkentälevyn kannalla estosuuntaisesti. Kuvassa 21 (s. 29) esitetään yhteiskatodikytketyn 7-segmenttinäytön sisäinen kytkentä. [11, s. 224.]



Kuva 21. Yhteiskatodikytketty 7-segmentinäyttö [11, s. 223 - 224; 13, s. 1]

Kuvasta 21 nähdään, että sisäinen kytkentä segmenttinäytössä vastaa kahdeksaa valodiodia joiden katodit on yhdistetty samaan nastaan. Kuvassa esitettiin myös komponentin fyysinen muoto. Kuvan numerot vastaavat komponentin nastojen numerointia. [13, s. 1.]

Koeytkennöissä käytettävien segmenttinäyttöjen sisältämien valodiodien virrankesto on datalehden mukaan 30 mA ja kynnyksjännite voi vaihdella 1,85 V - 2,5 V. Kynnyksjännitteen muuttumiseen vaikuttaa komponentin lämpeneminen, sillä lämmitessään diodin kynnyksjännite lähtee laskemaan. Virran suuruus vaikuttaa valon intensiteettiin. [13, s. 2 - 3.]

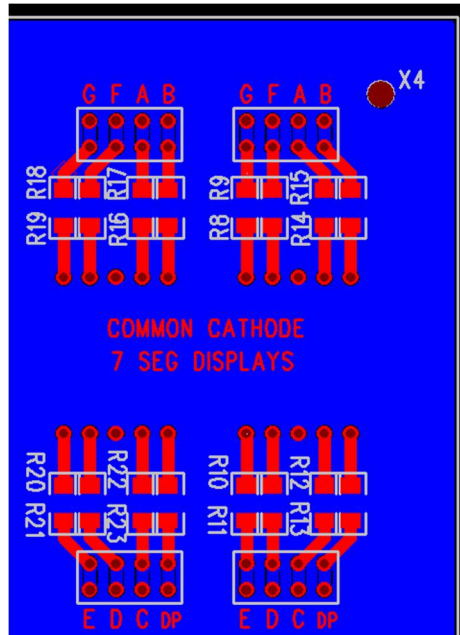
Kynnyksjännitteestä ja virrankestosta johtuen segmenttinäytön sisäiset valodiodit on suojattava etuvastuksella tavallisten valodiodien tavoin. Etuvastuksen tarkoitus on rajoittaa valodiodille kulkevan virran suuruus. Etuvastuksen suuruus voidaan laskea kaavalla 24:

$$R = \frac{V_{CC} - V_T}{I_F} \quad (24)$$

V_T on kynnyksjännite huoneen lämpötilassa

I_F on myötäsuuntainen virta valodiodissa. [2, s. 130 - 134.]

Kaavalla 24 saadaan etuvastuksen suuruudeksi noin 300Ω , kun valodiodin virraksi määritetään 10 mA. Etuvastuksina käytettiin 330Ω :n suuruisia vastuksia. Kuvassa 22 esitetään segmenttinäyttöjen ja vastuksien sijainti piirikaaviossa:



Kuva 22. Segmenttinäyttöjen kytkentä [2, s. 130 - 135]

Kuvasta 22 nähdään, että koekytkentälevylle merkittiin valodiodien kirjaintunnukset. Tämä helpottaa ohjauspiirien johdottamista ja segmenttinäyttöihin liittyvän kytkennän ymmärtämistä koekytkentöjä tehtäessä.

2.7 Prototyyppi

Koekytkentälevystä jrsittiin prototyyppi käyttämällä LPKF52 Protomat -piirilevyn jrsintä. Pototyypistä pyrittiin tekemään mahdollisimman samankaltainen kuin valmis levy olisi ollut piirilevyn valmistajalta tilattuna. Prototyypistä jrsittiin pois ylimääräinen kupari levyn komponentti puolelta.

Mittauksia tehtiin vain prototyypin aktiivisille komponenteille, joilla tarkoitetaan rakenteellisia kokonaisuuksia, joihin jännitteet on levyn kautta valmiiksi kytkettyinä. Näitä rakenteellisia kokonaisuuksia ovat regulaattori, kanttiaalto-oskillaattori ja kytkinvärähelyä poistava piiri.

2.7.1 Regulaattorin kuormitettavuus

Mittauksessa selvitettiin regulaattorin lämpenemisen määrä suhteessa kuormavirtaan. Kuormana käytettiin 10 Ω :n tehovastuksia, mitkä olivat mittauksessa sarjaan kytkettyinä. Regulaattorin lämpötilaa tarkkailtiin yleismittarilla regulaattorin kotelon ulkopuolelta. Ennen mittausta regulaattorin ulostulojännite säädettiin 5 V:n kytkennän potentiometrillä ja samalla todettiin jännitteen säätävän suunnitelman mukaisella alueella. Regulaattorin yli jäi 5,2 V:n jännite, koska tasasuuntaussillan diodien kynnysjännitteet eivät vastanneet täysin suunnittelussa käytettyjä arvoja. Mittauksessa banaaniliittimiin syötettiin 12 V.

Kuomaresistanssin ollessa 50 Ω saatiin kuormavirran suuruudeksi noin 100 mA, ja lämpötila regulaattorin yllä olevassa jäähdytys-elementissä oli 41 - 50 °C. Kuomaresistanssilla 40 Ω kuormavirran suuruus kasvoi 134 mA:n arvoon, ja lämpötila vaihteli 60 - 70 °C. Vastaavasti kuormalla 30 Ω virta kasvoi 170 mA:n arvoon, ja lämpötila kohosi suurimmillaan 94 °C arvoon.

Mittauksissa todettiin, että lämpöä kerääntyi regulaattorin yllä olevalle jäähdytys-elementille, eikä lämpöä johtunut juuri ollenkaan kuparitasolla oleville elementeille. Mittaustuloksiin vedoten voidaan sanoa, että jäähdytysmenetelmää täytyy parantaa. Kuvassa 11 (s. 14) esitetyn kuparitason olisi pitänyt yltää komponentin alle, että lämpö olisi johtunut paremmin. Vaarana on, että koekytkentälevyn käyttäjä saattaa koskettaa kuumia osia.

Mittausten yhteydessä oikosulkusuojauksen todettiin toimivan. Oikosulkutilanteessa sulake palaa ensimmäisenä ja muut komponentit säästyvät vaurioilta. Oikosulkusuojauksen toimivuus todettiin tekemällä oikosulku ulostulon ja maadoituksen välille useita kertoja.

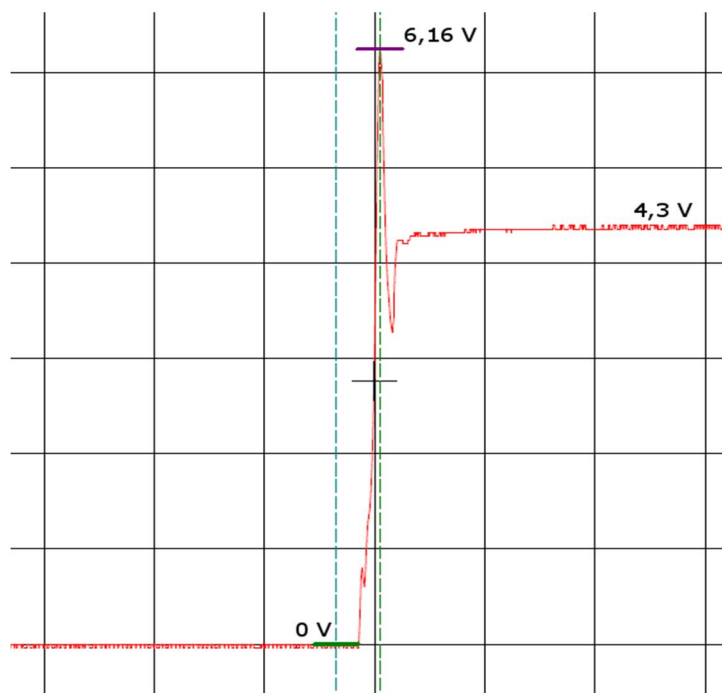
2.7.2 Kanttiaalto-oskillaattori

Kanttiaalto-oskillaattorissa kiinnostavaa oli ulostulosignaalin taajuuden säätöalue ja nousevan, sekä laskevan reunan häiriöttömyys. Mittauksessa jännitelähteeltä syötettiin maadoitus ja 5 V:n käyttöjännite sulakkeen viereisille kytkentäkannoille, jonka kautta

ne pääsivät kulkemaan kuparivetoja pitkin oskillaattoriin. Taajuutta mitattiin oskilloskoopilla signaalin jaksonajan kautta. Potentiometri säädettiin minimi ja maksimiarvoihin, jolloin taajuus alueeksi saatiin mitattua 1,463 - 111,483 Hz.

Kanttiaallostta mitattiin myös nousevan ja laskevan reunan muodot mahdollisten häiriöiden varalta. Laskevan reunan muoto oli normaalia laskevaa reuna vastava ja reunan laskuajaksi mitattiin noin 100 nS. Pulssin nousevaa reuna mitattiin taajuuden säätöalueelta useata eri kohdasta ja todettiin, että taajuudella ei ollut nousevan reunan muotoon merkitystä.

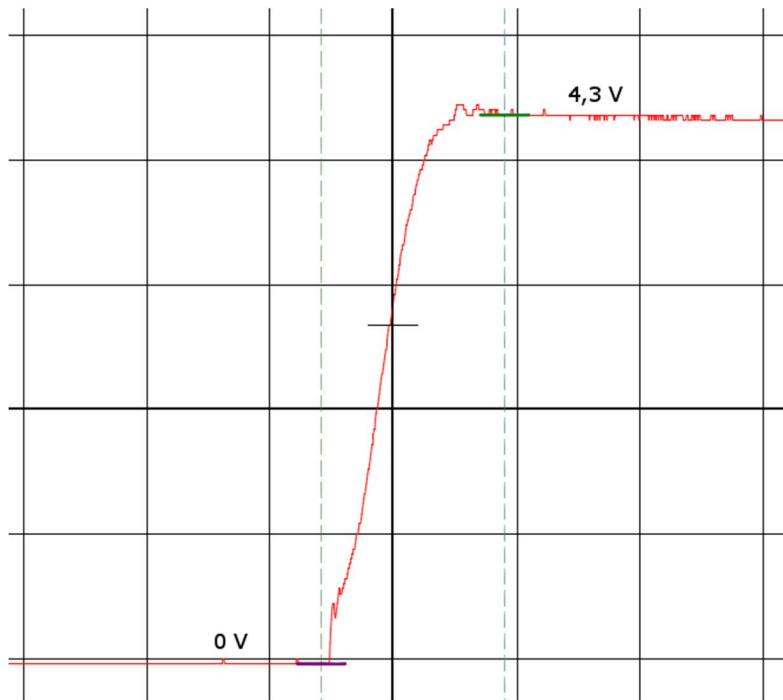
Nousevalla reunalla havaittiin mittauksissa häiriö, mikä toistui signaalin jokaisella nousevalla reunalla. Häiriö esitetään kuvassa 23:



Kuva 23. Nousevan reunan häiriö, $1 \frac{V}{div}$, $1 \frac{\mu S}{div}$

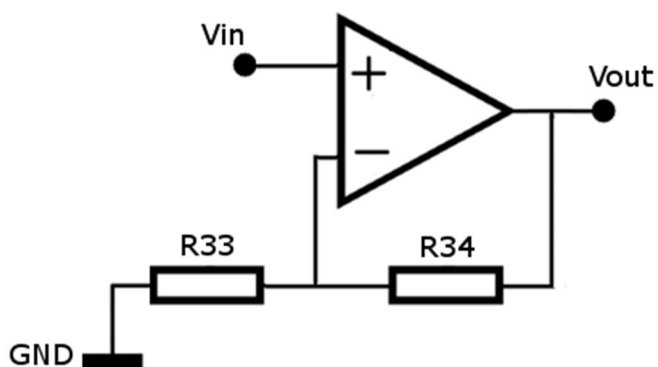
Kuvassa 23 esitettiin häiriö, joka tyypillisesti poistetaan ohituskondensaattorilla. Oskillaattorin ulostuloon mitoitettiin ohituskondensaattori juottamalla ulostulonastaan yksi kondensaattori kerrallaan maihin nähden. Kondensaattorin kapasitanssin arvoa vaihdettiin mittaustulosten mukaisesti sopivaan suuntaan. [3, s. 31 - 33.]

Mittauksissa todettiin, että 30 nF kondensaattori oli sovellukseen parhaiten sopiva. Kuvassa 24 esitetään nouseva reuna ohituskondensaattorin lisäyksen jälkeen:



Kuva 24. Suodatettu nouseva reuna, $1 \frac{V}{div}$, $1 \frac{\mu S}{div}$

Oskillaattoriin liittyvät mittaustulokset esitetään liitteessä 1. Mittauksissa todettiin, että kanttiaalto-oskillaattorin ulostulosignaalin jännitetasot eivät vastanneet jännitetasoja, joita koekytkennoissä käytettävät piirit tarvitsevat ajastukseen. Kanttiaallon jännitteen yläraja oli mittauksissa noin 4,3 V, kun tarvittava yläraja olisi ollut 5 V. Oskillaattorin ulostuloon lisättiin ensimmäisen asteen aktiivinen operaatiovahvistin kytkentä, jolla oskillointi muokattiin 0 - 5 V:n. Vahvistimena käytettiin operaatiovahvistin kytkentää, joka esitetään kuvassa 25:



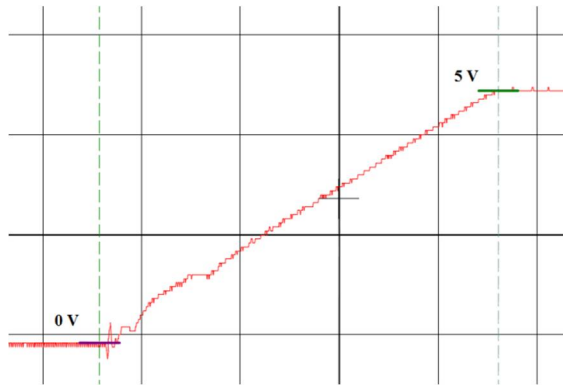
Kuva 25. Kanttiaallon vahvistus [2, s. 595 - 598; 3, s. 99 - 100]

Kytkenän vastukset ovat arvoltaan $8,2 \text{ k}\Omega$ ja $2,7 \text{ k}\Omega$. Vahvistus voidaan laskea kaavalla 25:

$$A = 1 + \frac{R_{34}}{R_{33}} \quad (25)$$

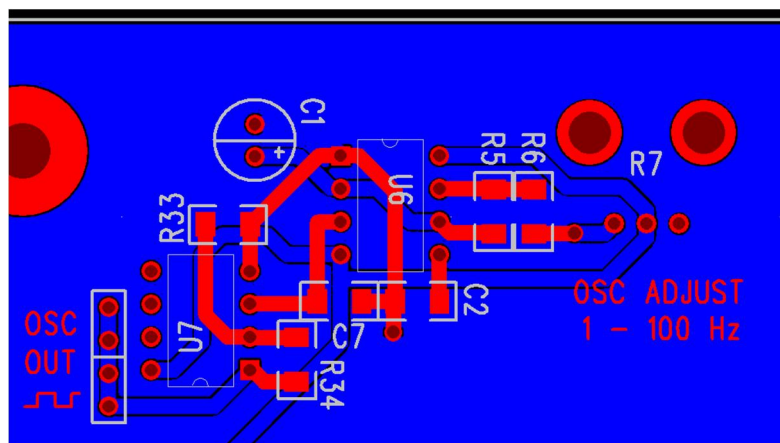
A on vahvistus. [2, s. 598; 3, s. 100.]

Kytettä pystyy vahvistamaan sisäänmenon jännitteen nelinkertaisesti. Kytkenässä vahvistusta rajoittava tekijä on käyttöjännite, joten vahvistus tapahtuu vain käyttöjännitteeseen asti. Kuvassa 26 esitetään mittauksissa havaittu nouseva reuna, kun oskillaattorin ulostuloon on lisätty vahvistin:



Kuva 26. Vahvistetun kanttiaallon nouseva reuna, $2 \frac{\text{V}}{\text{div}}$, $1 \frac{\mu\text{s}}{\text{div}}$

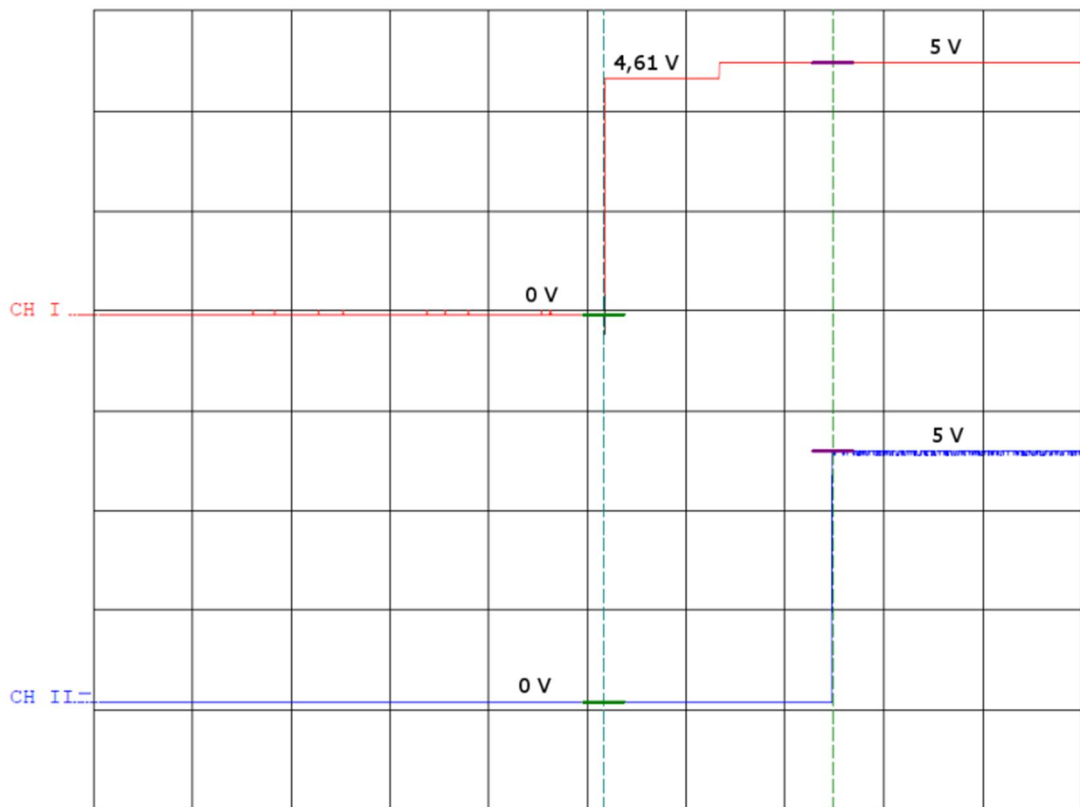
Kanttiaalto-oskillaattorin kytkentään liittyvän potentiometrin havaittiin olevan prototyypissä liian lähellä levyn reunaa, sillä potentiometrin säätönappi yltyi levyn reunan tasalle. Potentiometriä siirrettiin reunasta noin 5 mm levyn keskikohtaan päin. Muokkauksien jälkeinen kanttiaalto-oskillaattorin kytkentä esitetään kuvassa 27:



Kuva 27. Kanttiaalto-oskillaattorin kytkentä muutoksien jälkeen [3, s. 99 - 100; 10, s. 403 - 409]

2.7.3 Kytkinvärähtelyn poisto

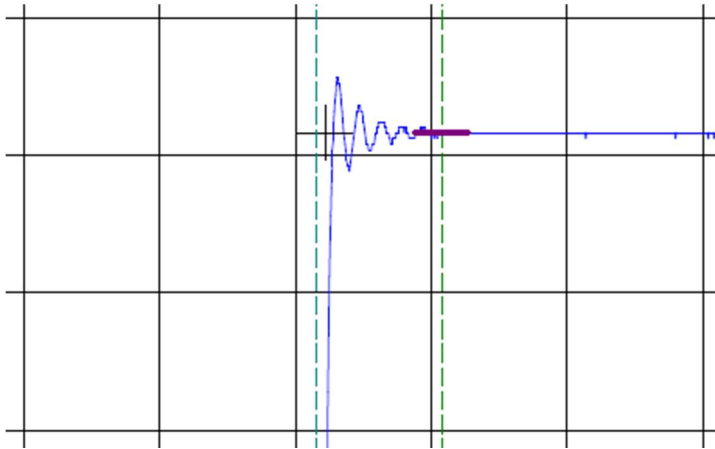
Kytkinvärähtelyn poiston varmistamiseksi tehtiin mittaus, missä kytkimeltä syötettävää signaalia tarkkailtiin värähtelyä poistavan piirin sisäänmenossa samaan aikaan kuin ulostulossa. Mittauksessa havaittiin, että kytkimeltä tuleva signaali asettui kytkettäessä ensin 4,61 V:n tasolle noin 51 μ S:n ajaksi ennen kuin käyttöjännite pääsi täysin johtumaan kytkimen läpi ja signaalin taso kohoamaan 5 V:n tasolle. Sama ilmiö havaittiin signaalin laskevalla reunalla, kun kytkin kytkettiin 5 V:n tasosta maatasoon. Kytkinvärähtelyä poistavan piirin viivästystoiminto riitti kattamaan häiriöllisen ajan ja piirin tuottaman viivästyksen pituudeksi mitattiin 58 mS. Kuvassa 28 esitetään mittauksissa havaittu kytkinvärähtelyn poiston toiminta:



Kuva 28. Kytkinvärähtelyn poiston mittaukset, $2 \frac{V}{div}$, $20 \frac{mS}{div}$

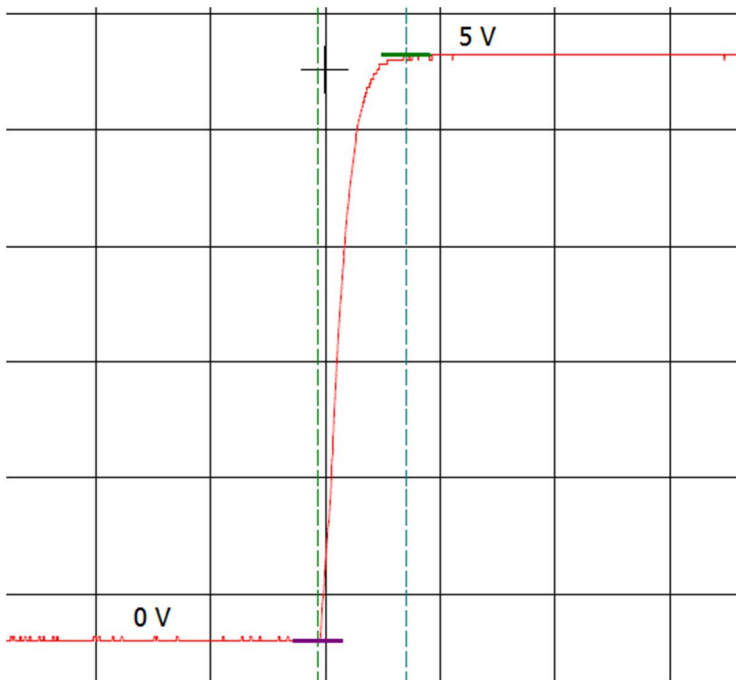
Kuvassa 28 oskilloskoopin kanavaan 1 on kytketty piirin sisäänmeno, ja kanavaan 2 on kytketty piirin ulostulo. Kytkinvärähtelyä poistavan piirin ulostulossa ilmeni signaalin nousevalla reunalla eksponentiaalisesti vaimenevaa värähtelyä, jonka ensimmäinen piikki oli amplitudiltaan noin 0,5 V:n suuruinen. Värähtelyn alkuperäksi oletettiin

piirilevyn kuparivetojen induktanssin vaikutus. Kuvassa 29 esitetään värähtely piirin ulostulon nousevalla reunalla:



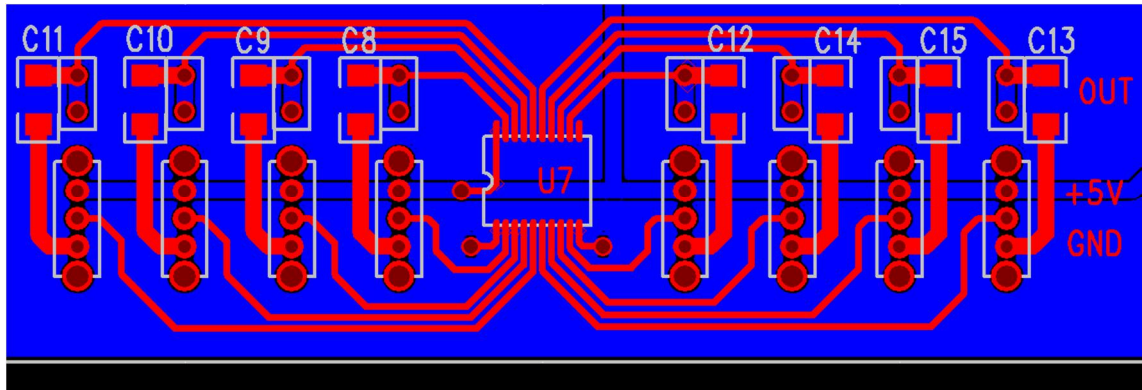
Kuva 29. Nousevan reunan häiriö, $1 \frac{V}{div}$, $1 \frac{\mu S}{div}$ [8, s. 142 - 143]

Kytkinvärähtelyä poistavan piirin ulostulosta häiriö poistettiin 1 nF:n ohituskondenssaattoreilla. Mittauksissa todettiin, että ohituskondenssaattoriksi 220 pF:n kapasitanssi oli liian pieni ja 2,2 nF:n kapasitanssi liian suuri. Mittaustulokset on esitetty liitteessä 2. Kuvassa 30 esitetään kytkinvärähtelyä poistavan piirin ulostulossa ohituskondenssaattorilla suodatettu nouseva reuna:



Kuva 30. Häiriötön signaali kytkinvärähtelyä poistavan piirin ulostulosta, $1 \frac{V}{div}$, $1 \frac{\mu S}{div}$

Ohituskondensaattorit liitettiin jokaiseen piirin ulostuloon. Ohituskondensaattori ovat kaikki arvoltaan 1 nF. Kuvassa 31 esitetään kytkinvärähtelyä poistava kytkentä ohituskondensaattoreiden lisäyksen jälkeen:

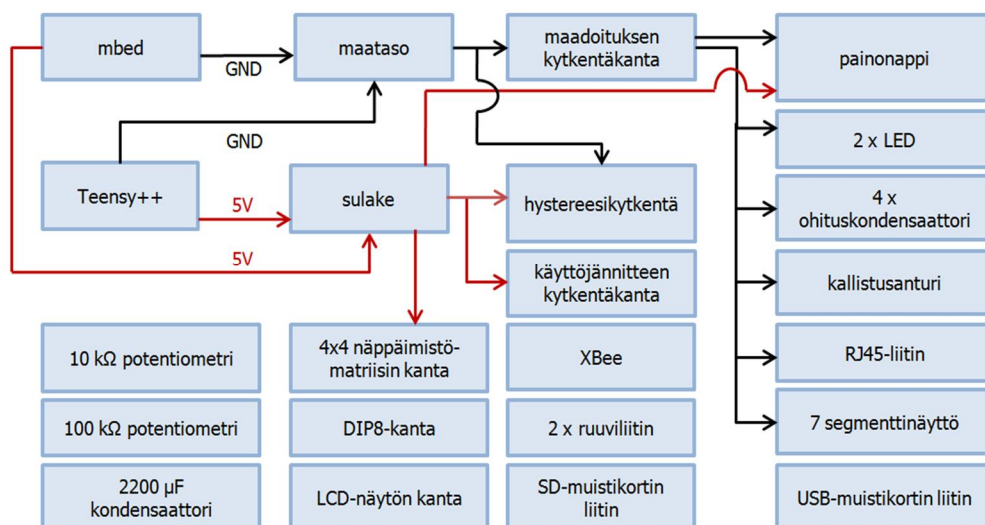


Kuva 31. Muutoksien jälkeinen kytkentä [3, s. 31 - 33; 12, s. 1 - 5]

3 Sulautettujen järjestelmien kehitysalusta

3.1 Lohkokaavioesitys

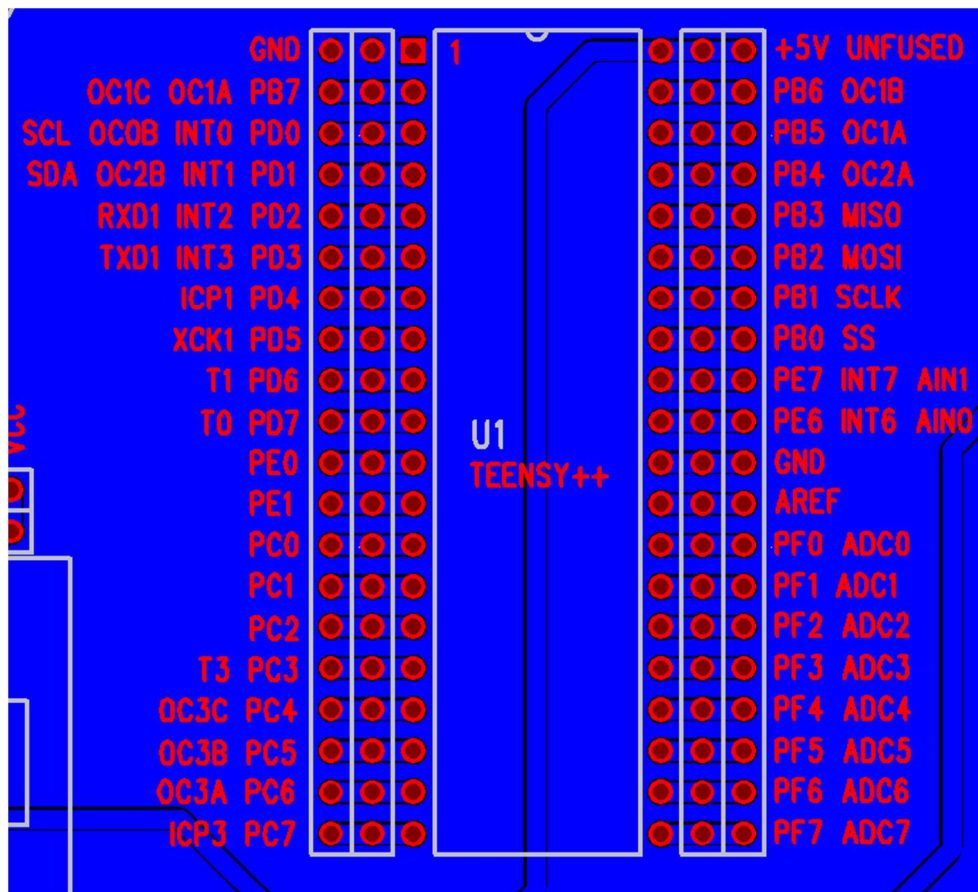
Sulautettujen järjestelmien kehitysalusta vastaa digitaalitekniikan opetuksessa käytettävää koekytkentälevyä kokonsa ja tarkoituksensa puolesta. Kehitysalustan suunnittelussa on oletettu, että käyttäjällä on digitaalitekniikan koekytkentälevyn käyttäjää paremmat tiedot ja taidot digitaalisesta tekniikasta. Kuvassa 32 esitetään kehitysalustan rakenteelliset kokonaisuudet lohkokaaivioesityksessä:



Kuva 32. Sulautettujen järjestelmien kehitysalusta

Kuvassa 32 (s. 37) pyrittiin tuomaan esille, miten käyttöjännite ja maadoitus on liitetty eri rakenteiden välillä. Kehitysalustan suunnittelussa oletettiin, että mbed tai Teensy++-mikrokontrollerikortti on kytkettynä kehitysalustaan käytön aikana. Kehitysalustan komponentit saavat käyttöjännitteen ja maadoituksen mikrokontrollerikorteissa olevan USB-liitännän kautta. Sulautettujen järjestelmien kehitysalustan layout -kuva esitetään liitteessä 5.

Sulautetuissa järjestelmissä mikrokontrollerit ohjaavat useita erilaisia toimintoja. Tyypillisimmät käyttökohteet ovat: digitaalinen signaalinkäsittely, pulssinleveys-modulaattori, A/D- tai D/A-muunnin, toimintojen ajastus, tiedonsiirto ja -käsittely, sekä toisen laitteen toiminnan ohjaus sarjaliikenteen tai otto- ja antolinjojen kautta. Toiminta on mikrokontrollerissa nastakohtaista ja ominaisuudet vaihtelevat piiristä riippuen. Kuvassa 33 esitetään Teensy++ mikrokontrollerikortin toiminnat nastakohtaisesti lyhenteinä, kuten ne on kehitysalustan silkkipainossa piirilevylle merkittyinä:

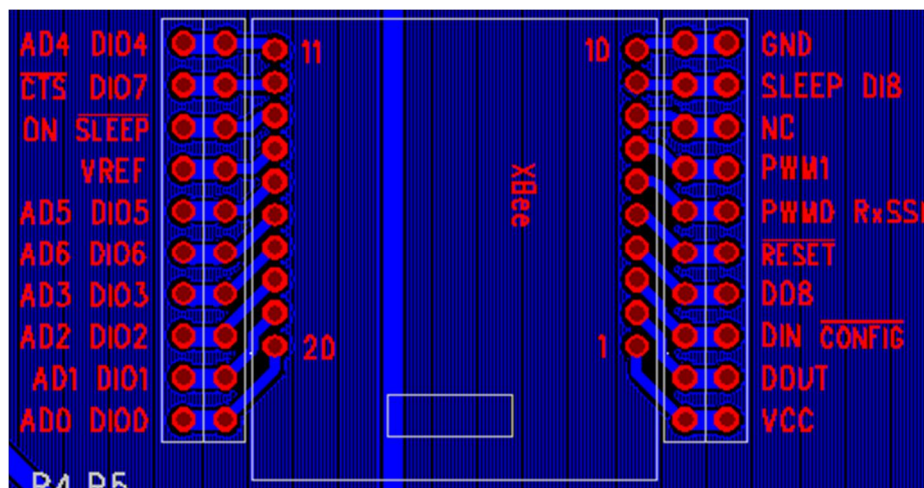


Kuva 33. Mikrokontrollerikortin nastojen merkinnät [11, s. 7 - 11; 14]

Merkintöjen tarkoitus on helpottaa johdotuksen tekemistä mikrokontrollerin ja oheislaitteen välillä, jolloin opetuksessa jää enemmän aikaa mikrokontrollereiden toiminnan ohjelmoimiseen. Mbed-mikrokontrollerikortin kytkentäkannalla on merkittyinä korttikohdattaiset toiminnot Teensy++-moduulin tavoin.

3.2 Tiedon siirto

Kehitysalustalla on mahdollista siirtää tietoa sekä langattomasti, että langallisesti. Langattomaan tiedonsiirtoon on mahdollista käyttää XBee-moduulia, joka voidaan liittää kehitysalustaan sellaisenaan. Kuvassa 34 esitetään XBee-moduulille suunniteltu kanta ja XBee-moduulin nastakohtaiset toiminnot.

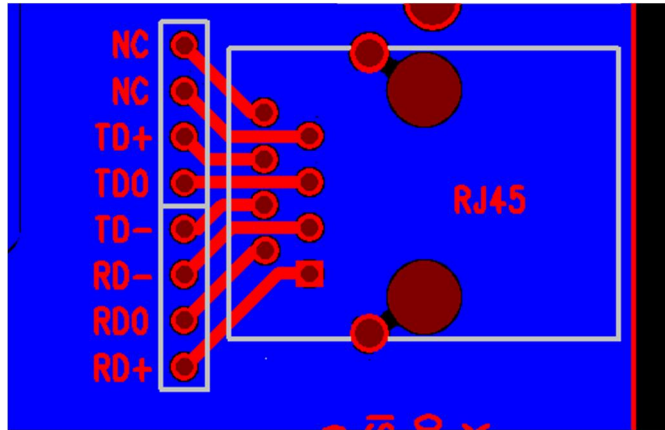


Kuva 34. XBee-moduulin kannanmerkinnät [15, s. 7]

XBee-moduulin toiminta perustuu IEEE 802.15.4 -standardiin. Standardin mukainen erikoisuus on matala virrankulutus, joka osaltaan rajoittaa tiedon siirtonopeutta. Matala virrankulutus kuitenkin mahdollistaa moduulin käyttämisen paristokäyttöisissä sovelluksissa vähän virtaa kuluttavien mikro-ohjaimien kanssa. Moduuleilla pystytään kommunikoimaan kahden pisteen välillä 250 kbps:n tiedonsiirtonopeudella. Linkin pituus vaihtelee 30 ja 100 metrin väliltä riippuen, kuinka esteettömästi radioaallot pääsevät tilassa kulkeutumaan. [15, s. 4.]

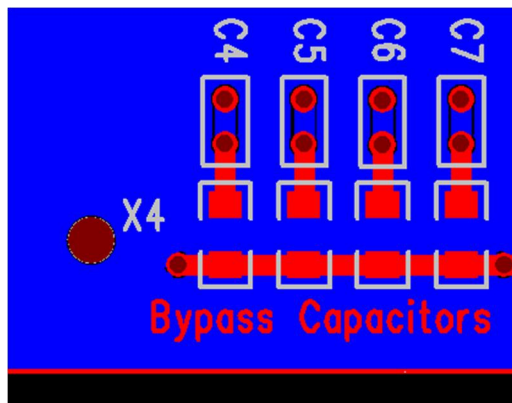
Langalliseen tiedonsiirtoon on kehitysalustalla käytössä RJ45-liitin johon voidaan kytkeä kaapeli tiedon siirtoa varten. Yleisesti käytetyin kaapeli on CAT5-tyyppinen, mikä sisältää 4 paria kierrettyjä parikaapeleita datan lähettämiseen ja vastaan ottamiseen. Pari-

kaapelien kiertämisellä pyritään vähentämään johtimissa kulkevan virran aiheuttaman magneettikentän kautta kytkeytyviä häiriöitä. Liitin on tarkoitettu Ethernet-verkkotekniikan yhdistämiseen mikrokontrollereille. Liittimen paikka piirilevyllä esitetään kuvassa 35:



Kuva 35. Ethernet-liitin ja liittimen merkinnät [16, s. 42 - 46]

Tiedonsiirrossa esiintyviä mahdollisia korkeataajuisia häiriöitä voidaan suodattaa kehitysalustan ohituskondensaattoreilla. Ohituskondensaattorit on suunniteltu yleiseen käyttöön ja ne ovat arvoltaan 100 nF. Ohituskondensaattorit on valmiiksi maadoitettu ja niitä voidaan johdottaa tarpeiden mukaan. Ohituskondensaattorit esitetään kuvassa 36:



Kuva 36. Ohituskondensaattorit [3, s. 31 - 33; 16, s. 21 - 22]

Keraamisten ohituskondensaattoreiden arvoksi valittiin 100 nF, koska teoriassa suurempi kapasitanssi johtaa pienempään reaktanssiin korkeammilla taajuuksilla kaavan 26 esittämällä tavalla. Käytännössä voidaan sanoa, että matalataajuiset häiriösignaalit

pääsevät helpommin kulkeutumaan kondensaattoreiden läpi maihin, kun kondensaattorin kapasitanssilla on suurempi arvo. Kapasitanssin ylittämistä on varottava, sillä ylittämisen johtaa pulssin reunojen kaareutumiseen.

$$X_c = -\frac{1}{2\pi f C} \quad (26)$$

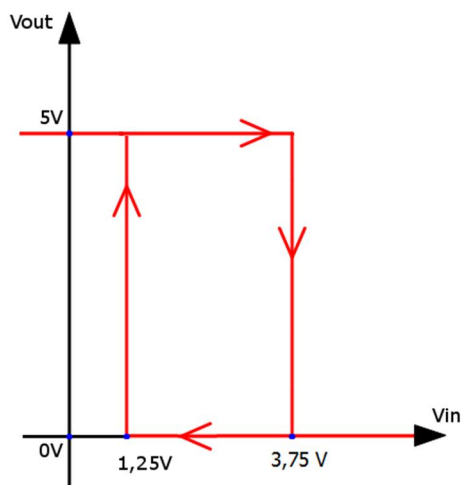
f on taajuus

C on kapasitanssi. [8, s. 54.]

3.3 Hystereesikytkentä

Kehitysalustalle toteutettiin hystereesikytkentä, mikä tunnetaan paremmin myös nimityksellä Schmitt-liipaisin. Kytkentä saa nimityksensä käyttäytymisestään. Kytkennällä pyritään suodattamaan kytkinvärähtelyä muistuttavia ilmiöitä pulssien nousevilla tai laskevilla reunoilla. [2, s. 649 - 651.]

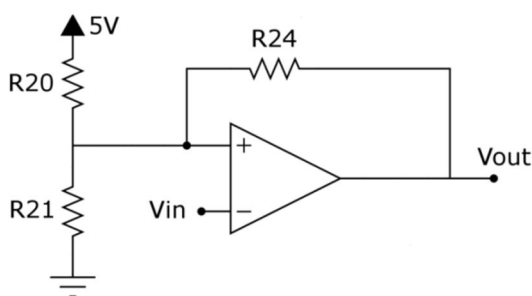
Toiminta perustuu siihen, että pulssin reunan noustessa Schmitt-liipaisimen sisäänmenossa tietyn raja-arvon ylitse ulostulossa tapahtuu muutos, mutta uuteen muutokseen tarvitaan ensimmäisen muutoksen raja-arvoa pienempi sisäänmenojännitteen arvo. Tällöin ulostulon nousevan reunan toiminta ei tapahdu samassa sisäänmenojännitteen arvossa kuin laskevan reunan toiminta, ja kytkinvärähtelyn kaltaista oskillointia ei pääse syntymään. Toiminta esitetään kuvassa 37:



Kuva 37. Schmitt-liipaisimen toiminta [2, s. 650]

Kuvassa 37 (s. 41) esitettiin toiminnan raja-arvot ja toiminnan käyttäytyminen. Sisäänmeno jännitteen kasvaessa yli 3,75 V:n muuttuu ulostulossa näkyvä signaali nol-laksi. Sisäänmenon laskiessa alle 1,25 V:n tason muuttuu ulostulosignaali loogiseksi ykköseksi. Ulostulon toiminta on käänteistä sisään menevään signaaliin nähden, joten toteutettu Schmitt-liipaisin on invertoiva. Raja-arvojen välisellä alueella liikuttaessa ulostulo säilyttää edellisen arvonsa.

Schmitt-liipaisin toteutettiin operaatiovahvistimella, jonka ulostulosta tehtiin takaisin-kytkentä positiiviseen sisäänmenonastaan. Positiiviseen sisäänmenonastaan on luotu referenssijännite jännitteenjaon avulla. Jännitteenjaon kytkennässä toteuttavat vastukset R20 ja R21, joiden rinnalle vastus R24 kytkeytyy riippuen operaatiovahvistimen ulostulon tilasta. Sisäänmenosignaali syötetään operaatio-vahvistimen invertoivaan sisäänmenonastaan. Kytkentä esitetään kuvassa 38:

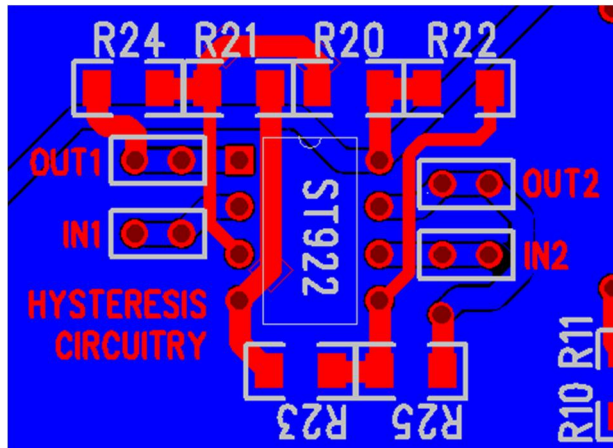


Kuva 38. Schmitt-liipaisimen kytkentä

Referenssijännite on 3,75 V:n suuruinen ulostulon ollessa loogisessa ykkösessä. Kun referenssijännite ylittyy negatiivisessa sisäänmenonastassa, ulostulo muuttuu maadoitukseksi, ja tällöin referenssijännite positiivisessa sisäänmenonastassa laskee 1,25 V:n suuruuteen.

Referenssijännitteen lasku perustuu siihen, että ulostulon muuttuessa loogiseksi nol-laksi R24 kytkeytyy rinnan vastuksen R21 kanssa ja näiden vastusten rinnankytkentä on resistanssiltaan pienempi kuin vastuksen R21 resistanssi yksinään. Vastus R21 on suuruudeltaan $10\,000\ \Omega$, kun vastuksien R21 ja R24 rinnankytkentä on suuruudeltaan noin $3\,333\ \Omega$. Tällöin jännitteenjaon mukaisesti pienemmän resistanssin yli jää vähemmän jännitettä ja referenssijännite laskee 1,25 V:n tasolle. [2, s. 649 - 651; 3, s. 99 - 103.]

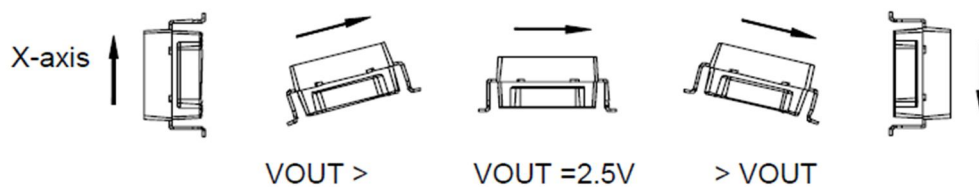
Ulostulon ollessa loogisen ykkösen tilassa kytkeytyy vastus R24 rinnan vastuksen R20 kanssa ja pienentää vastuksen R20 yli olevaa jännitettä siten, että referenssijännite vastuksen R21 yli pääsee kasvamaan 3,75 V:n tasolle. Kehitysalustalle Schmitt-liipaisimia toteutettiin yhteensä 2 kappaletta, koska käytettyyn operaatiovahvistin piiriin sisältyi 2 operaatiovahvistinta. Kuvassa 39 Schmitt-liipaisin piirin kytkentä esitetään suunnitteluohjelman kaaviossa merkintöineen:



Kuva 39. Schmitt-liipaisimet piirikaaviossa [17, s. 3]

3.4 Kallistusanturikytkentä

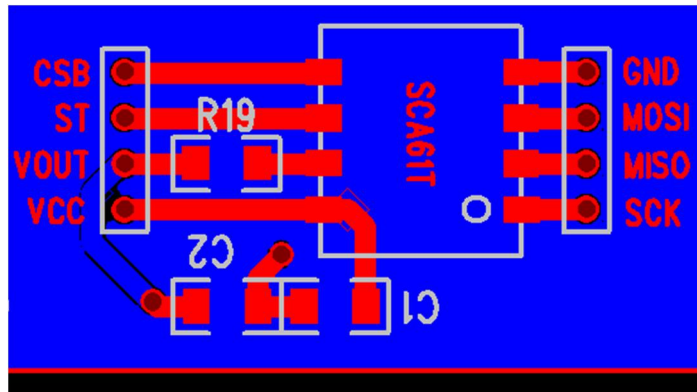
Kehitysalustalle toteutettiin VTI Technologies yrityksen valmistamalla SCA61T-anturilla kallistusanturikytkentä, mikä on tarkoitettu liitettäväksi mikrokontrollerille. Kallistusanturikytkennän avulla opiskelija saa käsityksen, miten anturisovelluksia voidaan luoda anturin ja mikrokontrollerin avulla. Kallistusanturilla voidaan lukea kallistuksen määrää SPI-väylä liitännän tai analogisen ulostulosignaalin kautta. Kallistusanturin analoginen ulostulojännite riippuu kallistuksen määrästä seuraavasti:



Kuva 40. Kallistusanturin ulostulojännite suhteessa kallistukseen [11, s. 275; 18, s. 9.]

Anturin herkkyys on $35 \text{ mV}/^\circ$. Kallistusanturin ollessa vaakatasossa saadaan analogiseen ulostuloon 2,5 V:n tasajännite. Kallistaminen vähentää tai lisää 2,5 V:n

ulostulojännitteeseen jännitettä anturin herkkyuden määrittelemän määrän. Anturin mittausvirheeseen vaikuttaa suuresti käyttöjännitteen tasaisuus. Anturin pitäisi saada mahdollisimman tasaista 5 V:n käyttöjännitettä, sillä käyttöjännitteen heilahtelut näkyvät ulostulon jännitteen heilahteluina. Käyttöjännite tulisi ottaa regulaattorilta tai vastaavalta kytkennältä, mikä estää käyttöjännitteen muuttumista. Kytkentä esitetään kuvassa 41:



Kuva 41. Kallistusanturin kytkentä suunnitteluohjelmassa [18, s. 9 - 12]

Kytkenän vastus R19 ja kondensaattori C2 muodostavat passiivisen alipäästösuodattimen, jonka tarkoitus on suodattaa ulostulojännitteestä vaihtojännite komponentteja. Vastus R19 on arvoltaan 5,1 k Ω ja kondensaattori C2 10 nF. Suodattimen -3 dB:n rajataajuus määräytyy kaavan 27 mukaan:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi * R_{19} * C_2} \quad (27)$$

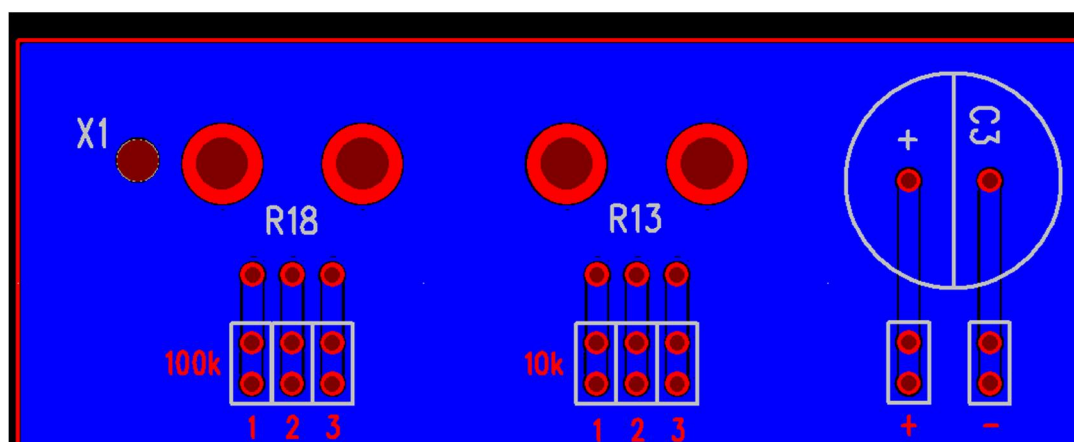
Kaavalla 27 saadaan rajataajuudeksi 3,122 kHz. Suodatin vaimentaa rajataajuutta korkeampia vaihtojännitekomponentteja vaimennuksella -20 dB/dekadi. Kytkennän kondensaattori C1 toimii ohituskondensaattorina ja tasoittaa käyttöjännitteen muutoksia. [8, s. 167 - 171.]

3.5 Toiminnan ohjaaminen

Toiminnan ohjaamiseen on kehitysalustalla vastaava painonappi kytkentä kuin digitaali-tekniikan koekytkentälevyllä. Painonapilla saadaan ohjattua laskevalla pulssinreunalla käynnistyviä toimintoja, sillä painonappiin on liitetty ylösvetovastus.

Painonapin lisäksi kehitysalustalta löytyy 2 potentiometriä R18 ja R13, joiden kaikki nastat ovat johdotettavissa kytkentäkantojen kautta. Potentiometrien säätöalueet ovat 1 - 100 000 Ω ja 1 - 1 000 Ω . Potentiometreillä pystytään tekemään jännitteenjakoa ja tarvittaessa syöttämään mikrokontrollerin analogisen signaalin sisäänmenonastaan jännitteenjaon mukaista analogista signaalia.

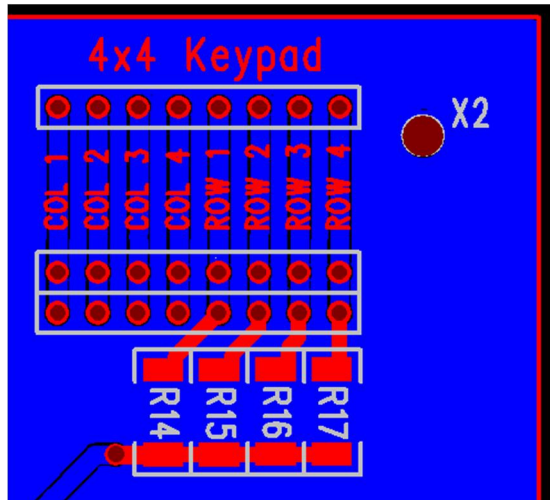
Säätövastuksia säätämällä saadaan analogisen signaalin jännitetasoa muutettua ja mikrokontrolleriin ohjelmoidusta ohjelmasta riippuen käynnistettyä erilaisia toimintoja eri jännitetasoilla. Potentiometrit esitetään suunnitteluohjelman kaaviossa kuvassa 42:



Kuva 42. Potentiometrit ja elektrolyyttikondensaattori

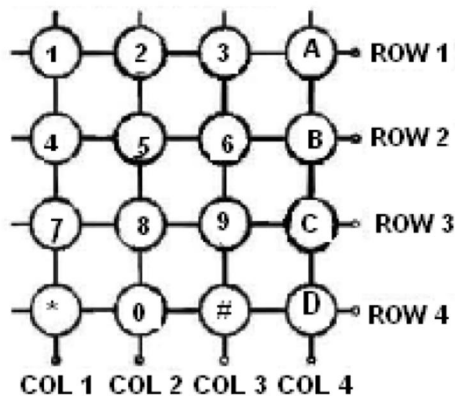
Kuvassa 42 esitettiin myös potentiometriä viereinen 2 200 μF :n suuruinen elektrolyyttikondensaattori C3. Yleisimmät käyttökohteet potentiometreille ja elektrolyyttikondensaattorille on RC-aikavakioon perustuvan viivepiirin luominen sekä pulssinleveysmodulaattorin signaalin muuntaminen analogiseksi signaalitasoksi, jolloin pulssinleveysmodulaattorilla voidaan ohjata analogista signaalia vaativia komponentteja. Elektrolyyttikondensaattori on yleiseen käyttöön tarkoitettu, ja käyttäjä pystyy käyttämään sitä myös muihin tarkoituksiin.

Kehitysalustan ohjausjärjestelmiin kuuluu myös näppäinmatriisi, mikä voidaan kytkeä sille suunniteltuun kantaan. Näppäinmatriisissa on 16 eri näppäintä, ja näppäinmatriisin käyttö vaatii mikrokontrolleria lukemaan, onko näppäimiä painettu. Näppäinmatriisiin kanta ja kytkentä esitetään kuvassa 43 (s. 46). [11, s. 215 - 219; 19.]



Kuva 43. Näppäinmatriisin kytkentä levyllä [11, s. 215 - 219; 19]

Näppäinmatriisin sisäisessä kytkennässä johtimet on sijoitettu päällekkäin siten, että matriisin näppäintä painettaessa kytketään samalla kyseisen näppäimen kohdalla olevien johtimien vaaka- ja pystyrivi yhteen. Näppäinmatriisin sisäinen kytkentä esitetään kuvassa 44:



Kuva 44. Näppäinmatriisin sisäinen kytkentä [19]

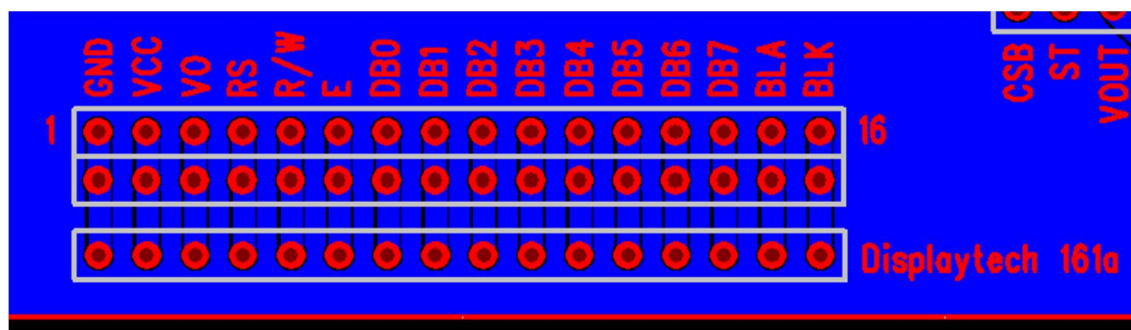
Näppäinmatriisin vaakarivit ovat oletusarvoisesti arvoissa 1111, koska ne on ylösvedetty ylösvedtovastuksilla. Matriisin näppäimen painalluksen huomaamiseen pystyrivit tulee liittää mikrokontrollerin antolinjaan. Antolinjalta kirjoitetaan näppäinmatriisin pystyriveille arvot siten, että vain yksi pystyrivi kerrallaan on 0:ssa. Tällöin mikrokontrollerin ottolinjoilla voidaan lukea vaakarivien arvot ja ohjelman avulla päätellä, mikä nappi on painettuna alas. [11, s. 215 - 219.]

Nollaksi kirjoitetun pystyrivin kohdalla olevan näppäimen vaakarivillä näkyy ylösveto-
vastuksista huolimatta 0, kun näppäin on painettuna alas. Nollaksi kirjoitetusta pystyri-
vistä ja nollana näkyvän vaakarivin risteymästä saadaan pohjaan painettu näppäin pää-
teltyä.

Mikrokontrollerin tulisi kirjoittaa jokainen pystyrivi nolllaksi useaan kertaan sekunnin
aikana, että nopeatkin painallukset ehditään lukea näppäimistöä. Jokaista kirjoitettua
nollaa kohden tulisi ohjelmassa tapahtua myös toiminto, mikä lukee kaikki näppäinmat-
riisin vaakarivit. [11, s. 215 - 219.]

3.6 Toiminnan tarkkailu

Kehitysalustalla toimintaa voidaan tarkkailla kahdella valodiodilla ja yhdellä segmentti-
näytöllä. Valodiodien ja segmenttinäytön kytkennät vastaavat täysin digitaalitekniikan
koekytkentälevyissä toteutettuja rakenteita. Lisäksi levyllä on liitännä mahdollisuus 16
nastaiselle LCD-paneelille. Liitännä on suunniteltu Displaytechin 161a paneelia varten.
Liitännä ja siihen liittyvät merkinnät esitetään kuvassa 45:



Kuva 45. LCD-paneelin liitännä [11, s. 231 - 241]

Paneeli tarvitsee toimiakseen mikrokontrolleri ohjauksen, ja sillä on mahdollisuus kir-
joittaa erilaisia symboleita perustuen syötettäviin databitteihin. Syötettävät databitit
määritellään mikrokontrollerin ohjelmassa ja ne voivat perustua erilaisiin ilmiöihin, ku-
ten moottorin kierroslukuun tai ilman kosteuteen. LCD-paneeli toimii vain sille syötetyn
tiedon näyttäjänä. [11, s. 231 - 241.]

Databittejä LCD-paneelille voidaan syöttää 8 nastaisesta portista ja databittien arvot määräävät paneelille syntyvän tekstirivin tai symbolijonon. Kuvassa 46 esitetään osa käytettävissä olevista symboleista:

upper 4 bit lower 4 bit	0000	0010	0011	0100	0101
0000	CG RAM (1)				
0001	(2)				
0010	(3)				
0011	(4)				

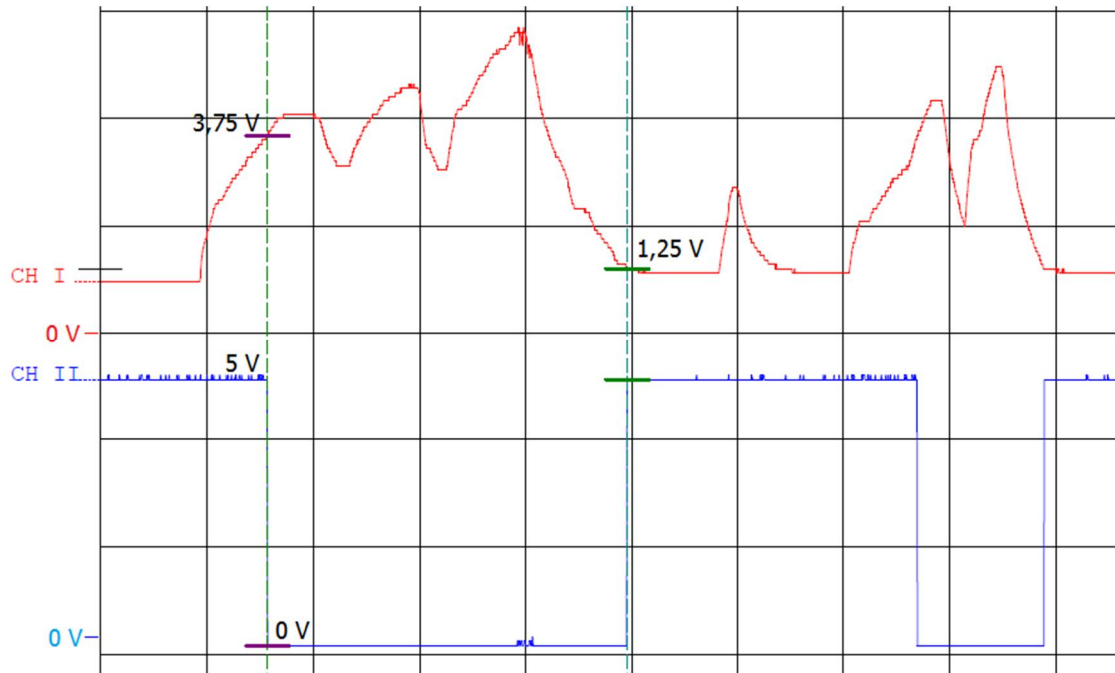
Kuva 46. LCD-paneelille kirjoittaminen [11, s. 231 - 241; 20, s. 7]

Kuvassa 46 esitettiin, kuinka databittien ylemmät neljä ja loput neljä alinta bittiä määräävät näytölle kirjoitettavan symbolin, LCD-paneelin datalehden mukaisesta taulukosta. Kuvassa 46 esitettiin pieni otos kaikista symboleista, mitä paneelilla pystytään kirjoittamaan. [20 s. 7.]

3.7 Prototyyppi

Sulautettujen järjestelmien kehitysalustasta tehtiin myös prototyyppi. Komponenttien sopivuus prototyyppiin varmistettiin ja prototyyppi todettiin toimivaksi. Kehitysalustan ainoa aktiivinen ja kokonaan itsenäisesti toimiva rakenne on hystereesikytkentä.

Hystereesikytkennän toimintaa mitattiin käyttäen tasajännitelähdettä tuottamaan hystereesikytkennälle sisäänmenosignaali analogisella säädöllä. Ulostulosignaalia ja sisäänmenosignaalia mitattiin oskilloskoopilla. Mittaustulokset esitetään kuvassa 47 (s. 49).



Kuva 47. Hystereesikytkennän mittaustulokset, $2 \frac{V}{div}$, $2 \frac{s}{div}$

Kuvaan 47 merkittiin signaalien nollassat ja toimintapisteiden mitatut jännitteet. Mittauskytkennässä kanavaan 2 kytkettiin hystereesikytkennän ulostulo ja kanavaan 1 kytkettiin analogisesti säädettävä testisignaali. Kuvasta nähdään, että kytkentä toimii suunnitelman mukaisesti. Ulostulon muutos vaatii muutoksen jälkeen eri toimintapisteen sisäänmenosignaalin. Mittaustulokset esitetään myös liitteessä 3.

4 Yhteenveto

Digitaalitekniikan koekytkentälevy ja sulautettujen järjestelmien kehitysalusta ovat opiskelijan oppimista edistäviä työvälineitä. Piirilevyjen juotospuolelle tehtyjen merkintöjen johdosta levyjen käyttäminen on helppoa.

Digitaalitekniikan koekytkentälevy palvelee opiskelijaa perusporttipiirien toiminnan opiskelussa. Se on tarkoitettu ominaisuuksiensa puolesta digitaalitekniikan alkeiden tehokkaaseen opettamiseen. Levyllä on mahdollista käyttää ohjelmoitavaa Teensy++ mikrokontrollerikorttia, mikä mahdollistaa levyn käyttämisen myös ohjelmoinnin perusteet opintokurssilla. Digitaalitekniikan koekytkentälevyn osalta asetettuihin tavoitteisiin päästiin regulaattorin kuormitettavuutta lukuun ottamatta.

Koekytkentälevyn regulaattorin jäähdytysmenetelmää olisi parannettava nykyisestä, sillä lämpö ei johtunut odotetusti kuparitasolle sijoitettuihin jäähdytyslementteihin. Regulaattorin kytkentää ja sijoittelua jälkeinpäin tarkasteltaessa havaittiin myös, että elektrolyyttikondensaattori C4 (s. 14) sijaitsee liian lähellä jäähdytyslementtejä. Elektrolyyttikondensaattori vanhenee nopeasti, kun se on sijoitettu kuumien osien viereen.

Sulautettujen järjestelmien kehitysalusta on työväline, joka palvelee opiskelijan oppimista siitä eteenpäin, mihin digitaalitekniikan koekytkentälevyn ominaisuuksilla päästään. Kehitysalusta on tarkoitettu erityisesti sulautettujen järjestelmien ohjelmoinnin opettamiseen. Rakenteet levyllä on jätetty johdotettaviksi, että opiskelijalle muodostuu kattava kuva siitä, miten laitteita liitetään toisiinsa käyttäen erilaisia väyliä. Sulautettujen järjestelmien kehitysalusta todettiin vastaavan asetettuja tavoitteita, eikä levyn prototyypissä esiintynyt mitään muutoksiin johtavia tekijöitä.

Opetuksen apuvälineinä levyt ovat riittävän selkeitä ja yksinkertaisia, että uusi käyttäjä pystyy omaksumaan niiden käytön nopeallakin aikavälillä. Tässä työssä esiintyvien kytkentä ja layout -kuvien avulla opiskelija pystyy omaksumaan rakenteiden toiminnan ja käyttötarkoituksen ongelmitta.

Lähteet

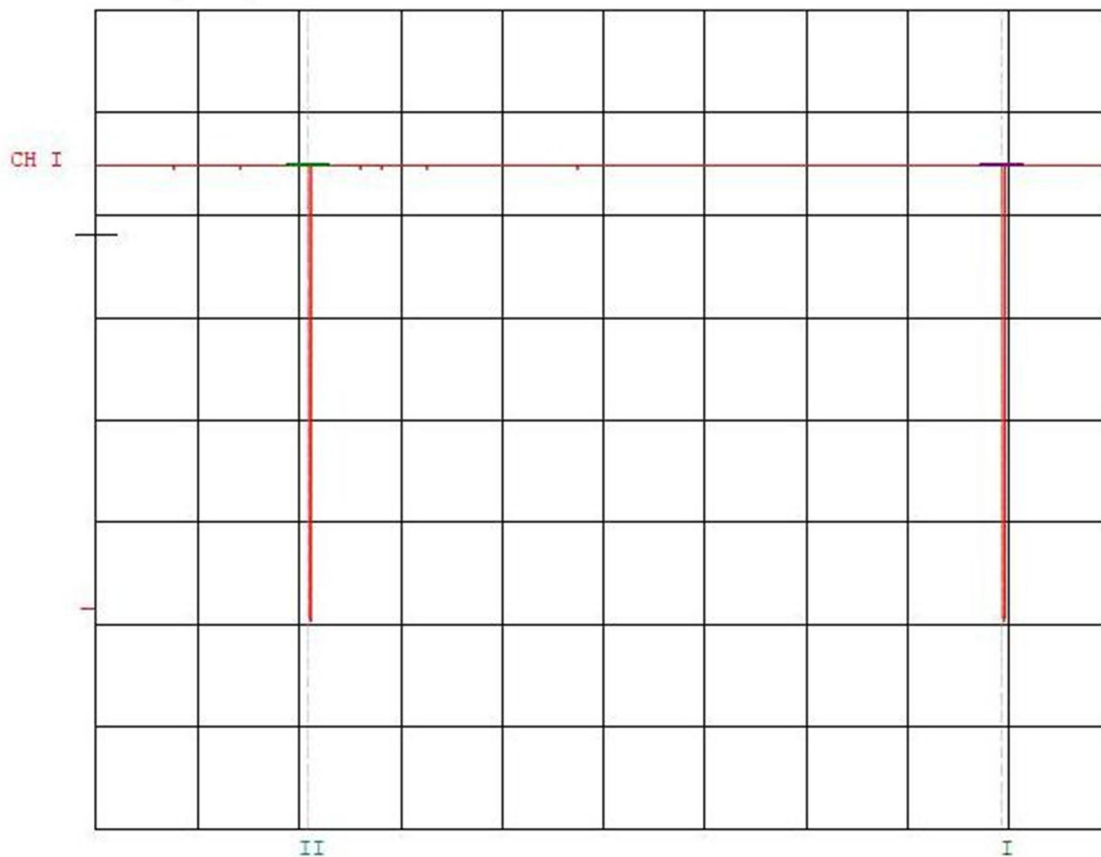
- 1 Niiranen, Jouko. 2007. Tehoelektroniikan komponentit. 4. painos. Helsinki: Otatieto.
- 2 Floyd, Thomas. 2005. Electronic Devices. International 7th ed. New Jersey: Pearson Education Ltd.
- 3 Sedra, Adel & Smith, Kenneth. 2011. Microelectronic Circuits. International 6th ed. New York: Oxford University Press Inc.
- 4 Standard diode. 2008. Verkkodokumentti. Vishay. <<http://www.farnell.com/datasheets/463939.pdf>>. Päivitetty 28.3.2008. Luettu 14.1.2011.
- 5 Tarkka, Pertti, Määttänen, Kari & Hietalahti, Lauri. 2003. Piirianalyysi 1. 2. painos. Helsinki: Edita Publishing Oy.
- 6 3-Terminal Adjustable Regulator. 2005. Verkkodokumentti. National Semiconductor. <<http://www.farnell.com/datasheets/7432.pdf>>. Päivitetty 1.5.2005. Luettu 14.1.2011.
- 7 Hautala, Mikko & Peltonen, Hannu. 2007. Insinöörin fysiikka osa 1. 8. painos. Saarijärvi: Lahden Teho-Opetus Oy.
- 8 Tarkka, Pertti & Hietalahti, Lauri. 2004. Piirianalyysi 2. Helsinki: Edita Publishing Oy.
- 9 Haltsonen, Seppo, Levomäki, Jaakko & Rautanen, Esko. 2006. Digitaalitekniikka. 3. painos. Helsinki: Edita Publishing Oy.
- 10 Floyd, Thomas. 2006. Digital Fundamentals. 9th ed. New Jersey: Pearson Education Ltd.
- 11 Koskinen, Jari. 2006. Mikrotietokonetekniikka, Sulautetut järjestelmät. 2. painos. Keuruu: Kustannusosakeyhtiö Otava.
- 12 CMOS Switch Debouncers. 2005. Verkkodokumentti. Maxim. <<http://www.farnell.com/datasheets/74837.pdf>>. Päivitetty 1.12.2005. Luettu 28.1.2011.

- 13 Single Digit Numeric Display. 2006. Verkkodokumentti. Kingbright. <<http://www.farnell.com/datasheets/57131.pdf>>. Päivitetty 2.11.2006. Luettu 30.1.2011.
- 14 Teensy++ 2.0 Pins. 2010. Verkkodokumentti. PJRC. <<http://www.pjrc.com/teensy/pinout.html>>. Päivitetty 10.4.2010. Luettu 12.2.2011.
- 15 OEM RF Modules. 2008. Verkkodokumentti. Digi International Inc. <<http://freedatasheets.com/downloads/XBee%20%20XBee-PRO%20%20DigiMesh%20%202.4%20OEM%20RF%20Modules.pdf>>. Päivitetty 9.12.2008. Luettu 12.2.2011.
- 16 Granlund, Kai. 2007. Tietoliikenne. Provoo: WSOY.
- 17 Dual Operational Amplifier. 2005. Verkkodokumentti. <<http://www.farnell.com/datasheets/7928.pdf>>. Päivitetty 1.8.2005. Luettu 28.2.2011.
- 18 SCA61T Inclinometer Series. 2006. Verkkodokumentti. VTI Technologies. <http://www.vti.fi/midcom-serveattachmentguid-2b9fadebe6fa4a0c24f144cd55fda22d/SCA61T_inclinometer_datasheet_8261900A.pdf>. Päivitetty 21.9.2006. Luettu 28.2.2011.
- 19 Keypads. 2006. Verkkodokumentti. Multicomp. <<http://www.farnell.com/datasheets/42270.pdf>>. Päivitetty 12.9.2006. Luettu 28.2.2011.
- 20 LCD Module. Verkkodokumentti. 2005. Displaytech Ltd. <<http://printers.compart.pl/Portals/0/pdf/lcd/displaytech/162a%20series-v11.pdf>>. Päivitetty 13.8.2005. Luettu 1.3.2011.

HAMEG Instruments

Measure time: 12:00:17
Measure date: 21.3.2011

CH1: 1,000V/DIV DC TB A: 100 ms TR: CH1+AC PT: 50



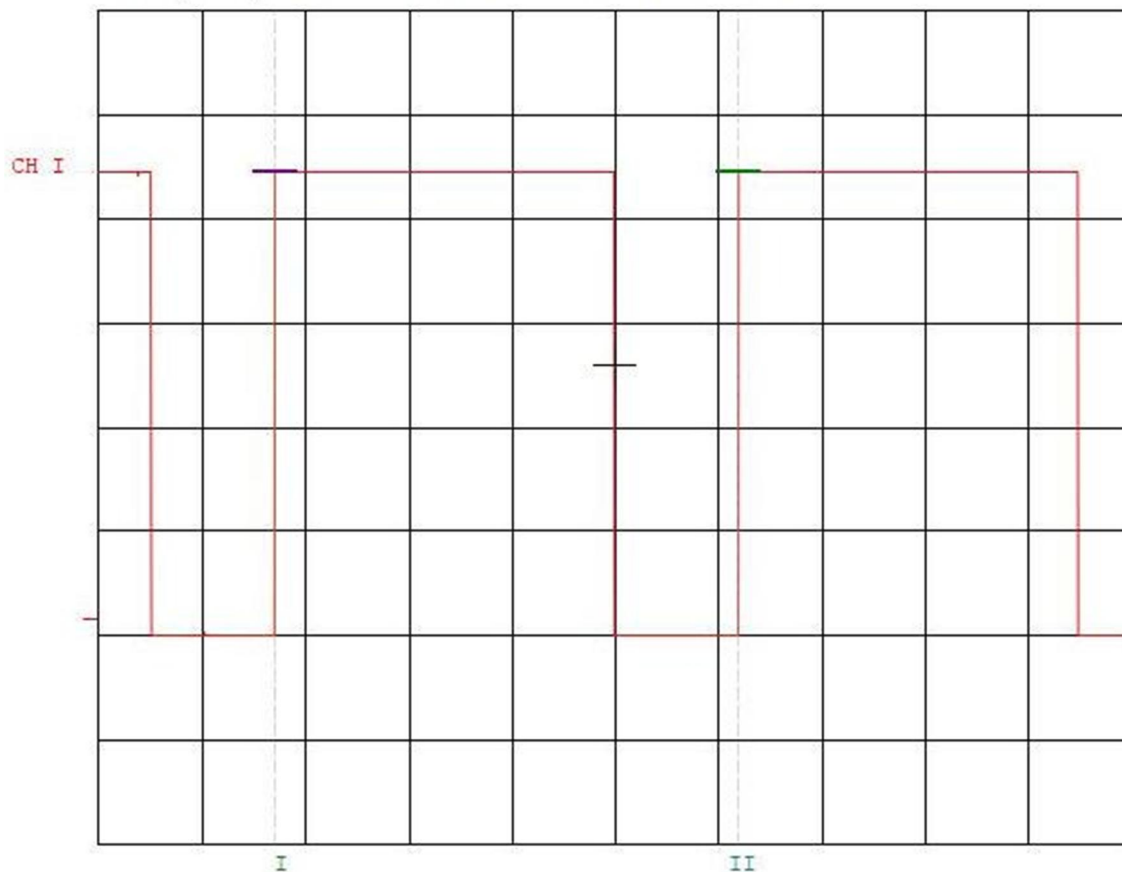
CH I : Cursor I: 4,320V Cursor II: 4,320V Diff. I-II: ,0000V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 683,500 ms 1/dt: 1,463 Hz

Notes:
Signaalin nolataso todettu maatasoksi oskilloskoopin näytöllä.
Säätövastus säädön maksimiarvossa.
Mittauksessa jaksonaika.

HAMEG Instruments

Measure time: 11:45:26
Measure date: 21.3.2011

CH1: 1,000V/DIV DC TB A: 2 ms TR: CH1-AC PT: 50



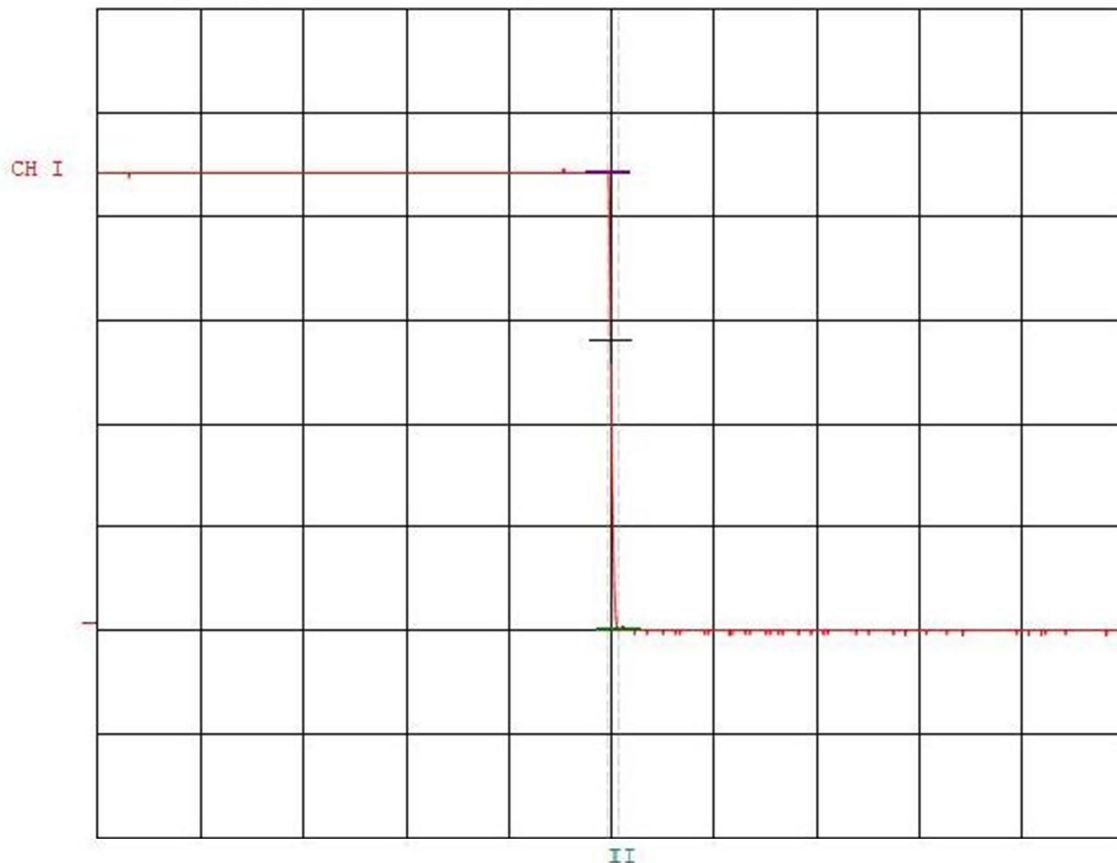
CH I : Cursor I: 4,280V Cursor II: 4,280V Diff. I-II: ,0000V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 8,970 ms 1/dt: 111,483 Hz

Notes:
Signaalin nollataso todettu maatasoksi oskilloskoopin näytöllä.
Säätövastus säädön minimiarvossa.

HAMEG Instruments

Measure time: 11:51:45
Measure date: 21.3.2011

CH1: 1,000V/DIV DC TB A: 1 μ s TR: CH1-AC PT: 50



CH I : Cursor I: 4,320V Cursor II: -,080V Diff. I-II: 4,4000V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 105,000 ns 1/dt: 9,524 MHz

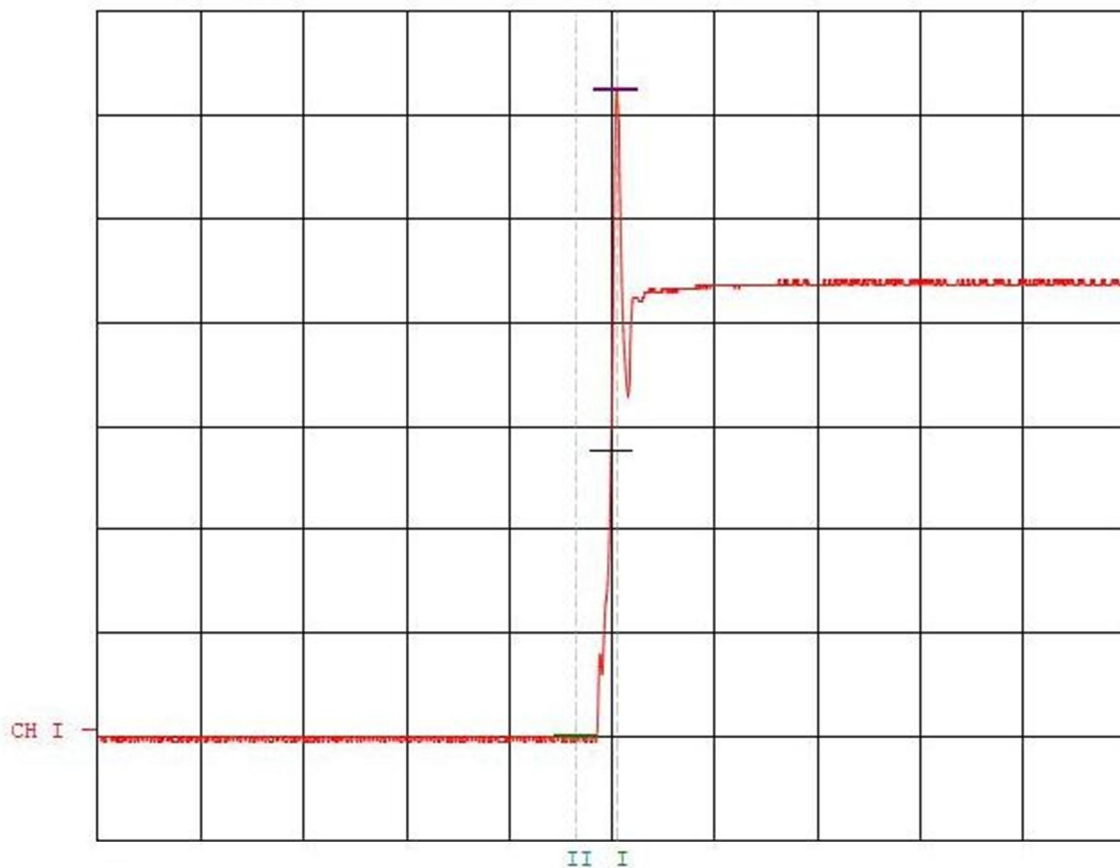
Notes:

Signaalin nollataso todettu maatasoksi oskilloskoopin näytöllä.
Säätövastus säädön minimiarvossa.
Mittauksessa laskeva reuna.

HAMEG Instruments

Measure time: 11:54:46
Measure date: 21.3.2011

CH1: 1,000V/DIV DC TB A: 1 μ s TR: CH1+AC PT: 50



CH I : Cursor I: 6,160V Cursor II: -,080V Diff. I-II: 6,240V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 395,000 ns 1/dt: 2,532 MHz

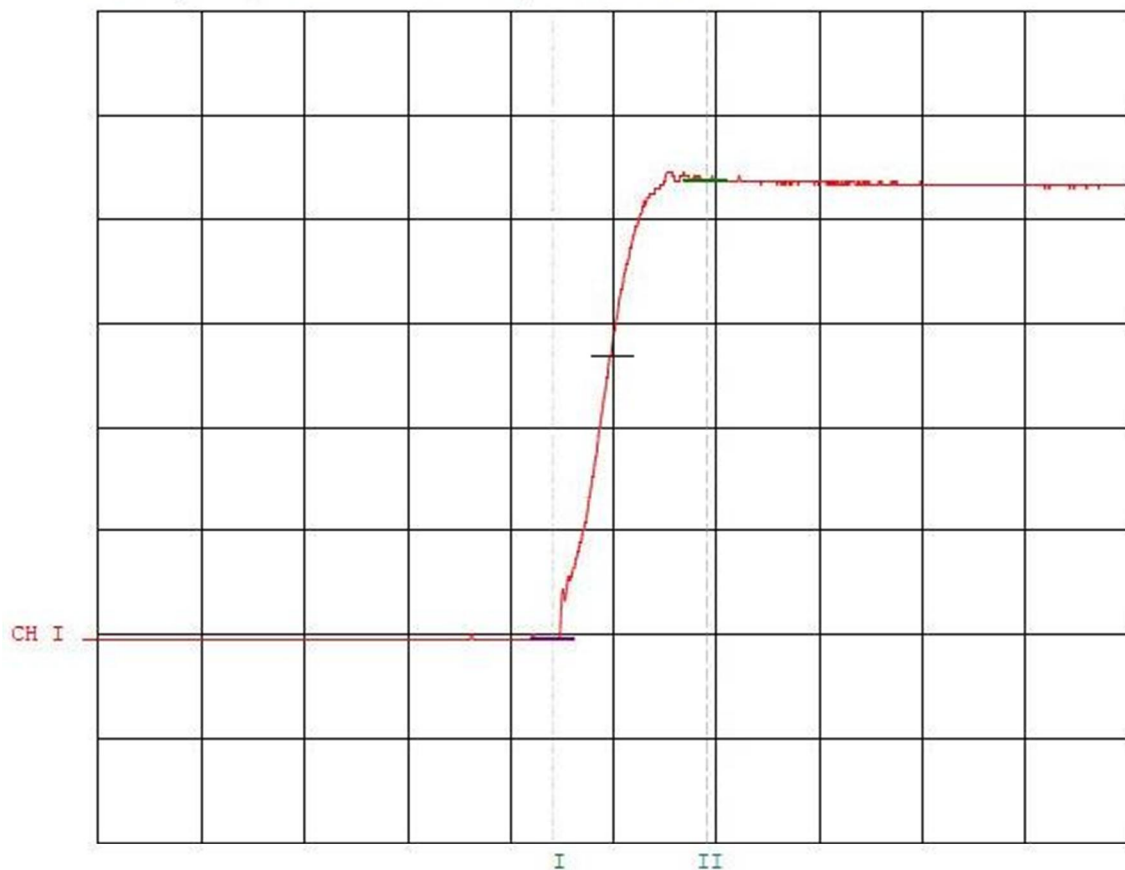
Notes:

Signaalin nollataso todettu maatasoksi oskilloskoopin näytöllä.
Säätövastus säädön minimiarvossa.
Mittauksessa nouseva reuna.

HAMEG Instruments

Measure time: 14:51:56
Measure date: 21.3.2011

CH1: 1,000V/DIV DC TB A: 1 μ s TR: CH1+AC PT: 50



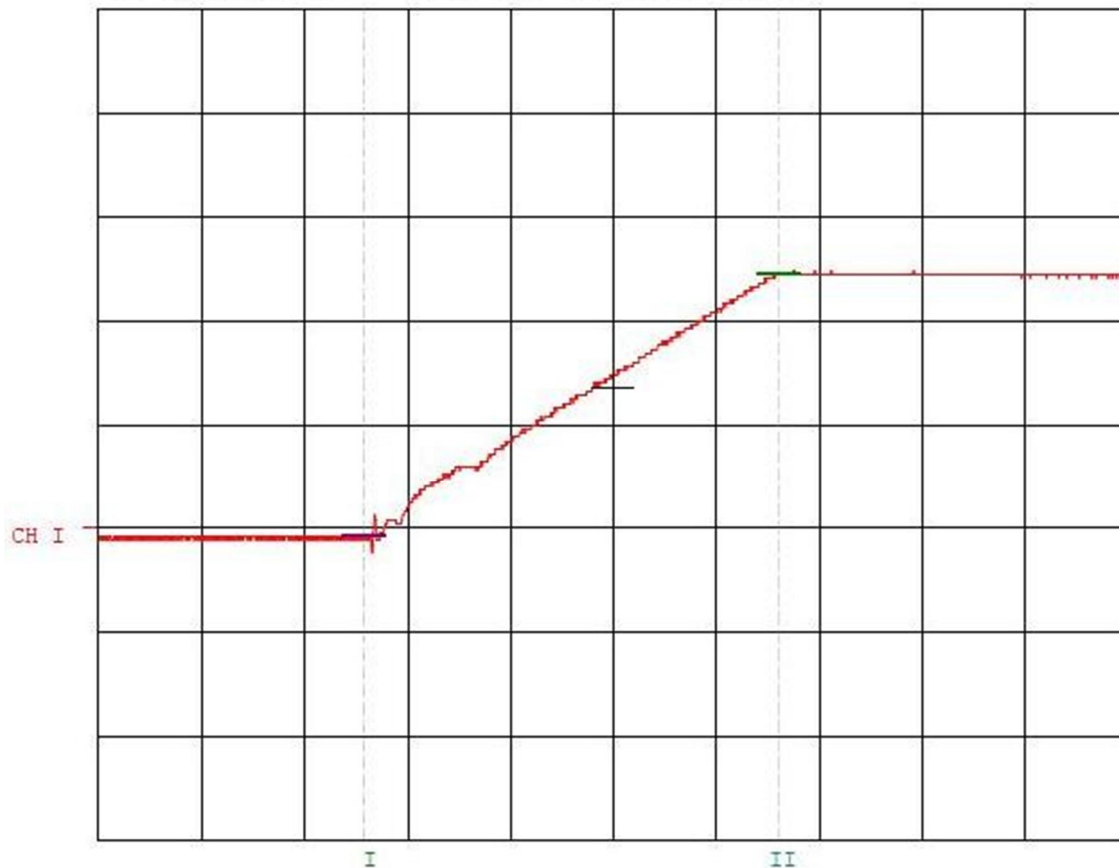
CH I : Cursor I: ,000V Cursor II: 4,400V Diff. I-II: -4,4000V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 1,485 μ s 1/dt: 673,401 kHz

Notes:
Kanttiaalto-oskillaattorin ulostulo ohituskondensaattorin lisäyksen jälkeen.
Ohituskondensaattori arvoltaan 33 nF.

HAMEG Instruments

Measure time: 17:50:51
Measure date: 22.3.2011

CH1: 2,000V/DIV DC TB A: 1 μ s TR: CH1+AC PT: 50



CH I : Cursor I: -,160V Cursor II: 4,880V Diff. I-II: -5,0400V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 4,035 μ s 1/dt: 247,831 kHz

Notes:

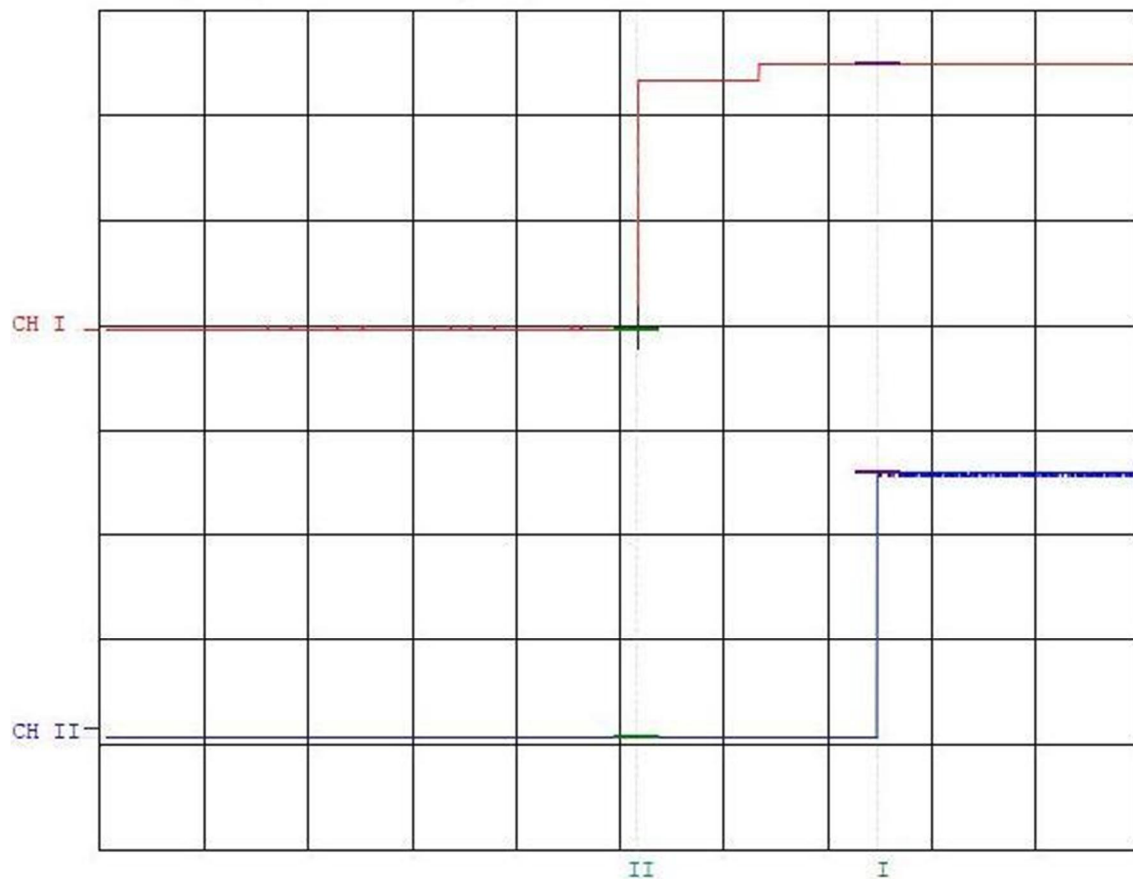
Kanttiaalto-oskillaattorin signaalin vahvistus takaisin 5 V tasolle.

Mittauksessa vahvistimen ulostulo signaali.

HAMEG Instruments

Measure time: 12:42:19
Measure date: 21.3.2011

CH1: 2,000V/DIV DC CH2: 2,000V/DIV DC TB A: 20 ms TR: CH1+AC PT: 50



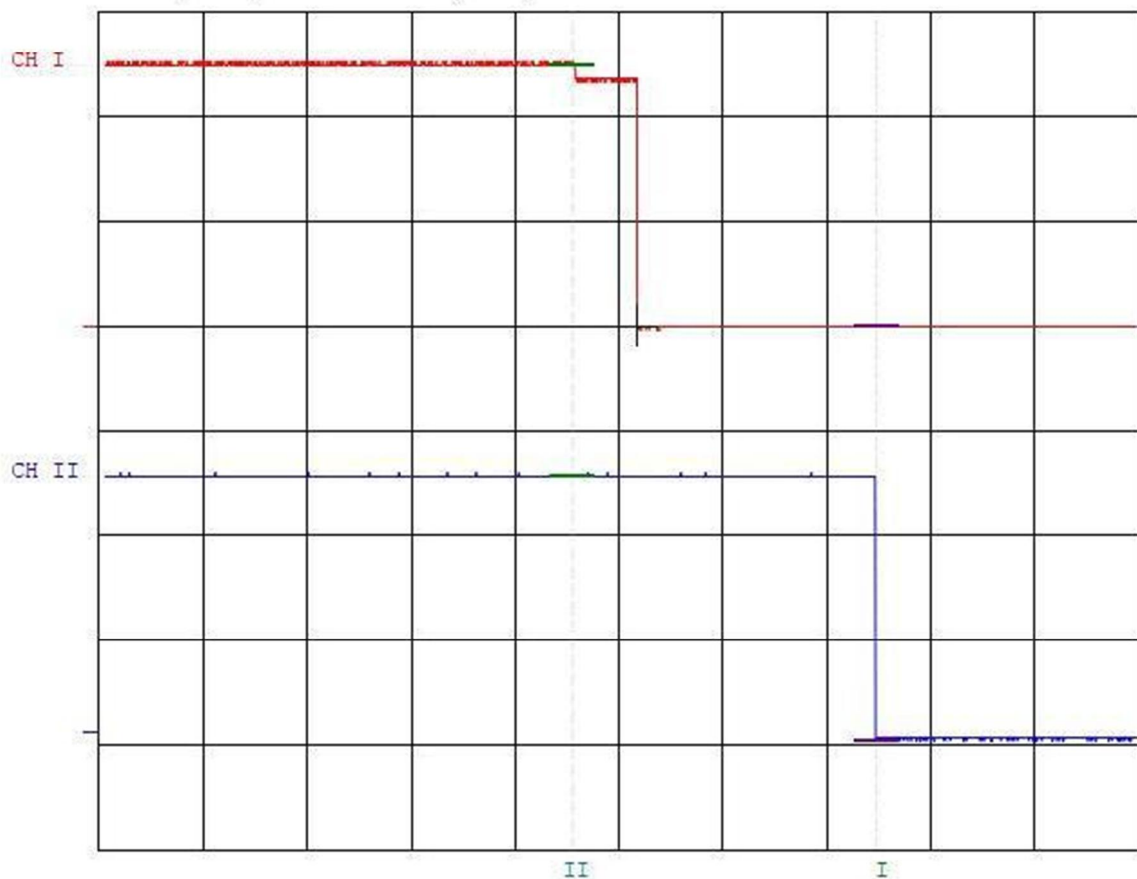
CH I : Cursor I: 5,040V Cursor II: ,000V Diff. I-II: 5,0400V
CH II: Cursor I: 4,880V Cursor II: -,160V Diff. I-II: 5,0400V
dt: 46,300 ms 1/dt: 21,598 Hz

Notes:
Kanava 1: kytkimeltä tuleva signaali. Signaali väriltään punainen.
Kanava 2: kytkinvärähtelyä poistavalta piiriltä tuleva signaali.
Mittauksessa nouseva reuna.

HAMEG Instruments

Measure time: 12:39:59
Measure date: 21.3.2011

CH1: 2,000V/DIV DC CH2: 2,000V/DIV DC TB A: 20 ms TR: CH1-AC PT: 50



CH I :	Cursor I: ,000V	Cursor II: 4,960V	Diff. I-II: -4,9600V
CH II:	Cursor I: -,160V	Cursor II: 4,880V	Diff. I-II: -5,0400V

dt: 58,500 ms 1/dt: 17,094 Hz

Notes:

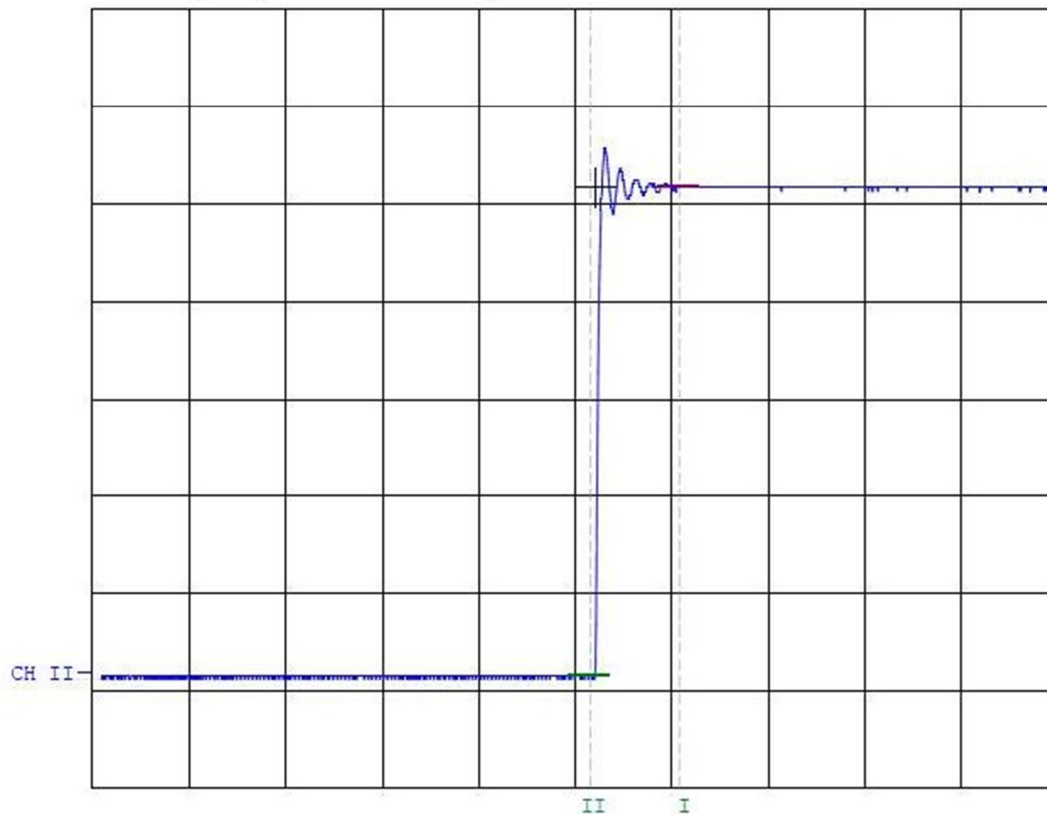
Kanava 1: kytkimeltä tuleva signaali. Signaali väriltään punainen.
Kanava 2: kytkinvärähtelyä poistavalta piiriltä tuleva signaali.

Mittauksessa laskeva reuna.

HAMEG Instruments

Measure time: 12:55:16
Measure date: 21.3.2011

CH2: 1,000V/DIV DC TB A: 1 μ s TR: CH2+AC PT: 50



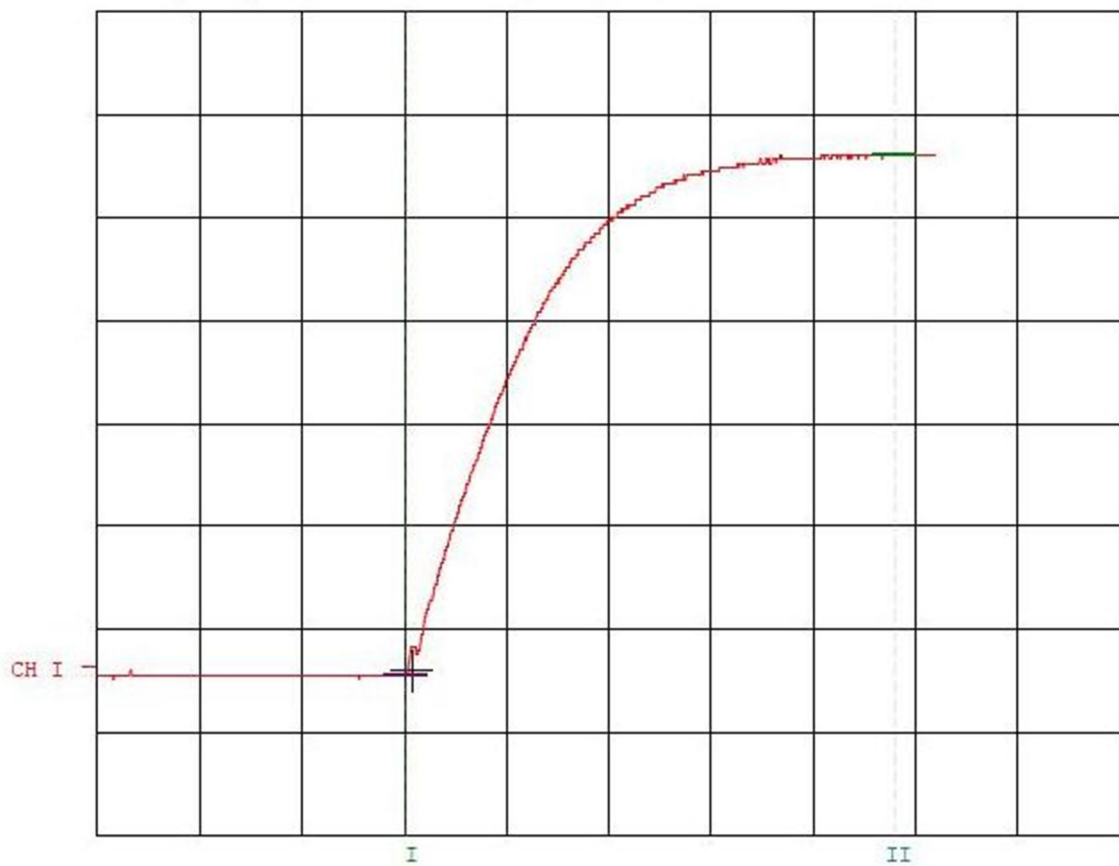
CH I : Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
CH II: Cursor I: 4,960V Cursor II: -,040V Diff. I-II: 5,0000V
dt: 925,000 ns 1/dt: 1,081 MHz

Notes:
Mittauksessa kytkinvärähtelyä poistavalta piiriltä tulevan signaalin nouseva reuna.

HAMEG Instruments

Measure time: 12:29:12
Measure date: 22.3.2011

CH1: 1,000V/DIV DC TB A: 1 μ s TR: CH1+AC PT: 50



CH I : Cursor I: -,080V Cursor II: 4,960V Diff. I-II: -5,0400V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 4,780 μ s 1/dt: 209,205 kHz

Notes:

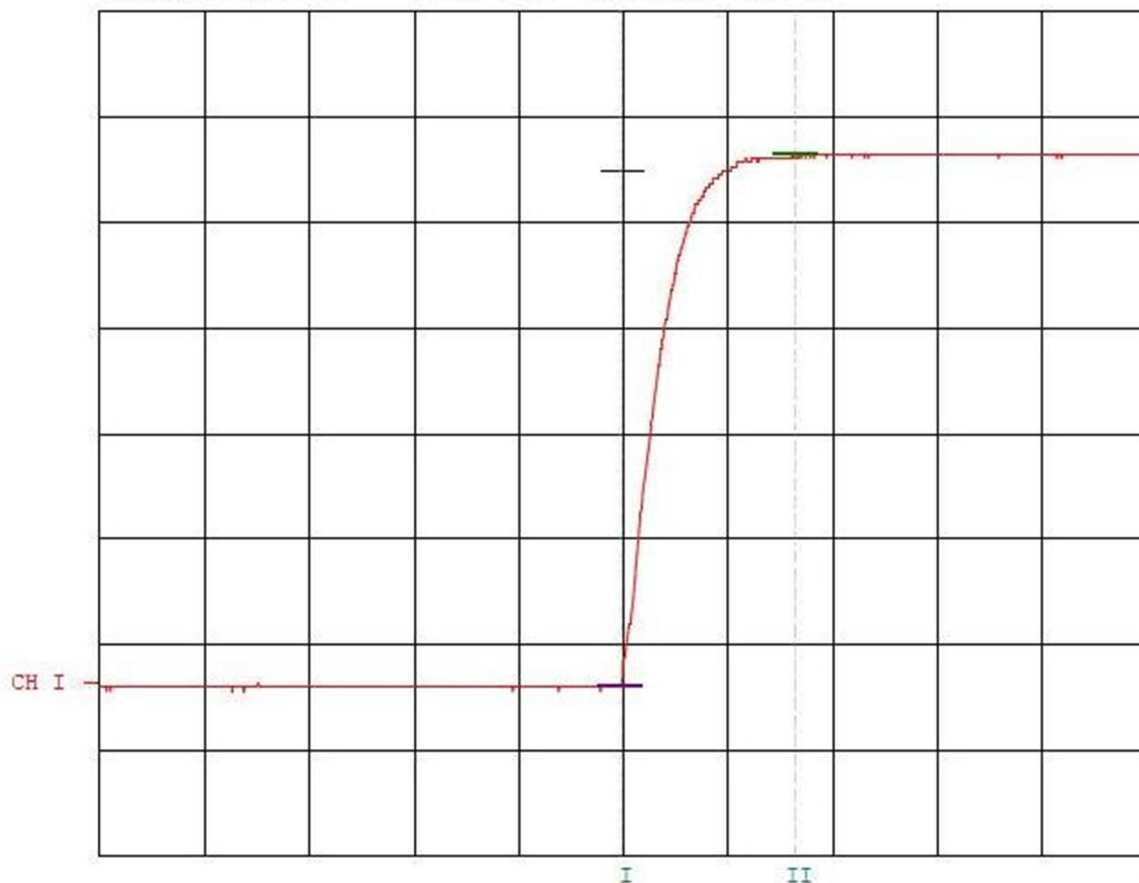
Kytkinvärähtelyn poistopiirin ulostulossa 6,8 nF ohituskondensaattori.

Häiriö poistuu mutta nouseva reuna taipuu.

HAMEG Instruments

Measure time: 12:41:15
Measure date: 22.3.2011

CH1: 1,000V/DIV DC TB A: 1 μ s TR: CH1+AC PT: 50



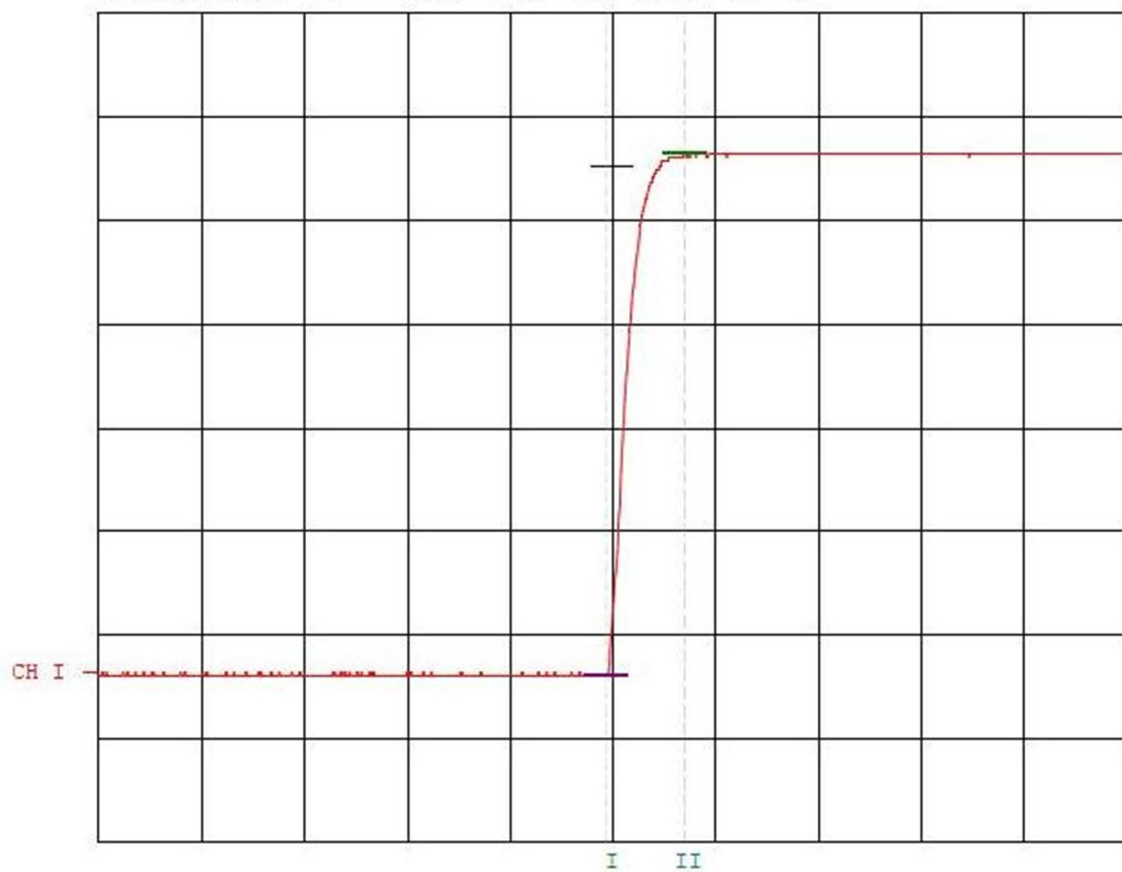
CH I : Cursor I: -,040V Cursor II: 5,000V Diff. I-II: -5,0400V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 1,665 μ s 1/dt: 600,601 kHz

Notes:
Kytkinvärähtelyn poistopiirin ulostulossa 2,2 nF ohituskondensaattori.
Häiriö poistuu mutta nouseva reuna taipuu.

HAMEG Instruments

Measure time: 12:52:24
Measure date: 22.3.2011

CH1: 1,000V/DIV DC TB A: 1 μ s TR: CH1+AC PT: 50



CH I : Cursor I: -,040V Cursor II: 5,000V Diff. I-II: -5,0400V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 765,000 ns 1/dt: 1,307 MHz

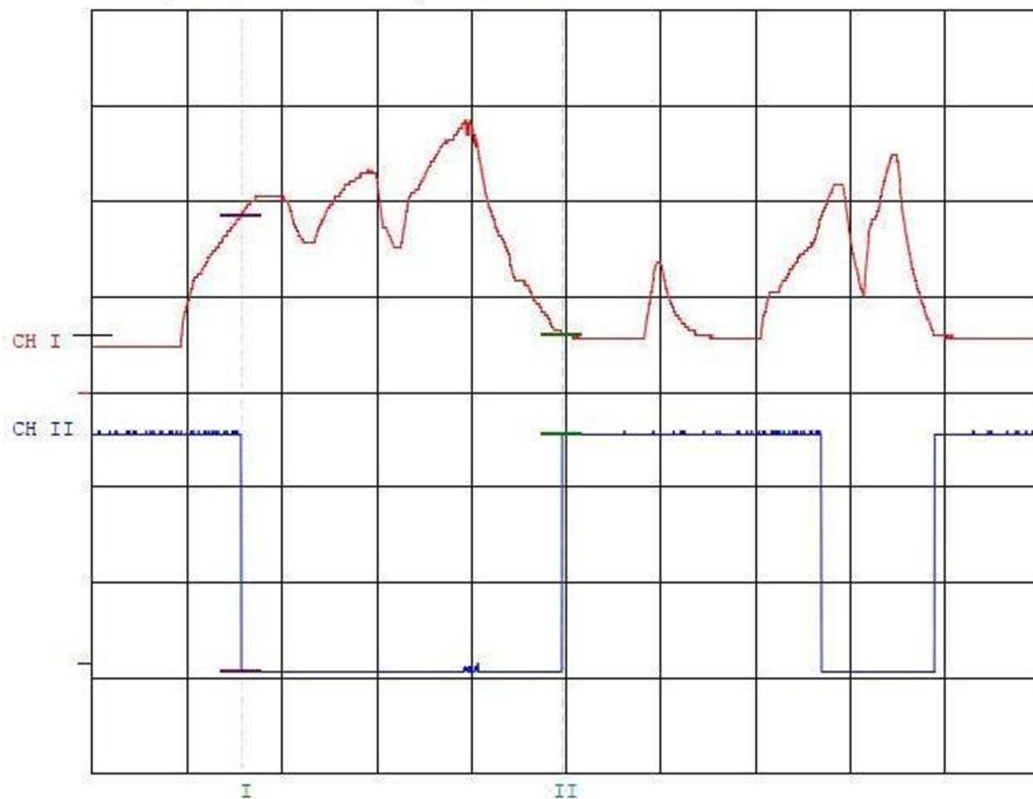
Notes:
Kytkinvärähtelyn poistopiirin ulostulossa 1 nF ohituskondensaattori.
Häiriö poistuu.

HAMEG Instruments

Measure time: 10:26:18

Measure date: 24.3.2011

CH1: 2,000V/DIV DC CH2: 2,000V/DIV DC TB A: 2 s TR: CH1+AC PT: 50



CH I : Cursor I: 3,680V

Cursor II: 1,200V

Diff. I-II: 2,4800V

CH II : Cursor I: -,160V

Cursor II: 4,800V

Diff. I-II: -4,9600V

dt: 6,780 s

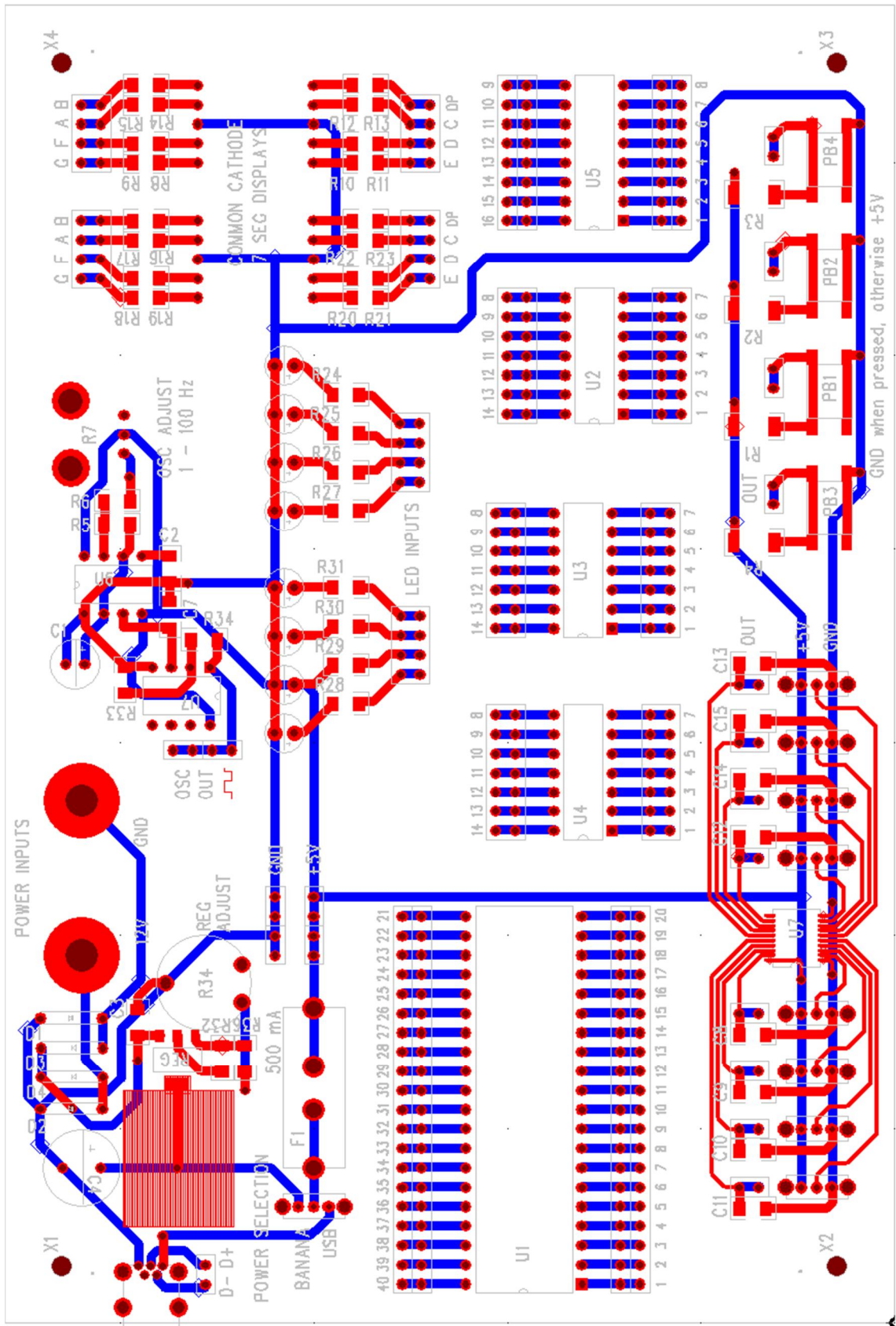
1/dt: 147,493 mHz

Notes:

Kanava 1: sisäänmenevä testaus signaali; analogisesti säädetty. Kuvaajassa punainen.

Kanava 2: Hystereesikytkennän vastesignaali. Kuvaajassa sininen.

Maataso on jätetty pois kuvasta.



Maataso on jätetty pois kuvasta.

