

Frans Korhonen

Pienitehoinen korkeajännitelähde aerosolimittauksiin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Elektroniikka

Insinöörityö

11.3.2013

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Frans Korhonen Pienitehoinen korkeajännitelähde aerosolimittauksiin 38 sivua + 3 liitettä 11.3.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	elektroniikan koulutusohjelma
Ohjaajat	laboratorioinsinööri Erkki Siivola yliopettaja Matti Fischer
<p>Tässä insinööriyössä suunniteltiin ja rakennettiin pienitehoinen säädettävä 10 kV:n tarkkuusjännitelähde, erityisesti DMA:han (<i>Differential Mobility Analyzer</i>) perustuvien aerosolimittausten tarpeisiin. Työssä panostettiin lähteen laajaan säätöalueeseen sekä tarkkuuteen erityisesti pienillä jännitteillä. Jännitelähteen käyttötarkoitus on halutun sähkökentän luominen DMA:n sisälle.</p> <p>Työssä suunniteltiin jännitelähde, joka helpottaa aerosolimittauksia, sen laajan säätöalueen, tarkkuuden sekä helpon käytettävyyden avulla. Aikaisemmin käytettyjen jännitelähteiden suurimmat ongelmat ovat niiden alimman tuotetun jännitteen rajallisuudessa ja stabiiliudessa. Lisäksi aikaisemmin käytössä olleita jännitelähteitä voidaan ohjata ainoastaan analogisilla signaaleilla, jotka ovat herkkiä häiriölle, ja tarvitsevat tietokoneeseen kytkettäessä erillisen ohjauskortin. Suunniteltu jännitelähde voidaan liittää tietokoneeseen sarjaportin kautta. Lisäksi usean jännitelähteen ohjaaminen samasta sarjaportista on mahdollista laitteita ketjuttamalla.</p> <p>Työssä tutkittiin ja ratkottiin erilaisia mittaustarkkuuteen vaikuttavia ilmiöitä, kuten vastusten epälineaarisuus jännitteen ja lämpötilan suhteen. Rakennettu laite sisältää kaksi hakkuriastetta ja operaatiovahvistimeen perustuvan lineaarisen shuntiregulaattorin. Laitteessa tuotetaan ja mitataan tasajännitesignaaleja, joiden tarkkuus on muutamia kymmeniä mikrovoltteja.</p> <p>Insinööriyön tuloksena syntyi tarkka korkeajännitelähde, josta voidaan rakentaa useampia kappaleita. Rakennetun jännitelähteen virhe asetuspöytästä on pienempi kuin 2 promillea yli 100 V:n jännitteillä sekä pienempi kuin 200 mV alle 100 V:n jännitteillä.</p>	
Avainsanat	korkeajännite, aerosolimittaus, sulautettu järjestelmä, mittaus- tekniikka, hakkurijännitelähde

Author Title	Frans Korhonen Low-Power High Voltage Supply for Aerosol Measurements
Number of Pages Date	38 pages + 3 appendices 11 March 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Instructors	Erkki Siivola, Laboratory Engineer Matti Fischer, Principal Lecturer
<p>In this thesis a 10 kV low-power high voltage supply for DMA (Differential Mobility Analyzer) based aerosol measurements was designed and constructed. The main focus was to achieve a wide output voltage range and precision with a single device. The main function of the device is to produce the desired voltage to the electrodes inside the DMA.</p> <p>The goal was to produce a high voltage supply that fits better to its task than the currently used ones. Previously used supplies lack precision in low voltages, so two voltage supplies are required to generate voltages in the whole range required. Also the lack of direct digital method of controlling the output voltage is an issue. Analog signals are sensitive to error and cannot be directly generated from a computer. An additional control device is required to generate analog signals. The constructed high voltage supply can be controlled digitally through a serial port and multiple devices can be connected to the same port by chaining the devices.</p> <p>One of the main challenges in the thesis was the resistor nonlinearity against high voltage and temperature. Other big challenges were generation and measurement of low voltage signals of a couple of μV. The device consists of two switching mode stages and a linear shunt regulator based on low offset operational amplifier. Switching mode stages are driven by microcontroller with pulse width modulation signals.</p> <p>As a result of the thesis, a reproducible precision high voltage supply was created. The constructed device output voltage error is less than 2 ‰ from setpoint on voltages above 100 V and less than 200 mV on voltages below 100 V.</p>	
Keywords	high voltage, aerosol measurement, embedded system, measurement technology, switch mode power supply

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Aerosolihiukkasten erottelu sähköisen liikkuvuuden avulla	2
3	Korkeajännitelähteen turvallisuus	4
4	Rakennetun korkeajännitelähteen toimintaperiaate	5
4.1	Jännitteen vaimennus jännitteenjaolla	5
4.2	Vaimennetun jännitteen mittaus	11
4.3	Jännitelähteen hakkuriosien toimintaperiaate	14
4.4	Korkean tasajännitteen luominen jännitteenkertojalla	21
4.5	Jännitelähteen lineaarisen jännitesäädön toiminta	23
4.6	Laitteen digitaalelektroniikka	25
4.7	Korkeajännitelähteen fyysinen toteutus.	29
5	Korkeajännitelähde tulevaisuudessa	32
6	Yhteenveto	35
	Lähteet	36
	Liitteet	
	Liite 1. Kytkenäkaaviot	
	Liite 2. Piirilevykuvat	
	Liite 3. Osaluettelo	

Lyhenteet

AD	<i>Analog to Digital</i> ; aanalologisesta digitaaliseen.
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> ; analogisesta digitaaliseen -muunnin.
DA	<i>Digital to Analog</i> ; digitaalisesta analogiseen.
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i> ; digitaalisesta analogiseen -muunnin.
DMA	<i>Differential Mobility Analyzer</i> ; differentiaalinen liikkuvuusanalysointilaite.
PPM	<i>Parts Per Million</i> ; miljoonasosa 0.001 %.
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> ; pulssinleveysmodulaatio.
USART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> ; yleiskäyttöinen sarjaliikenneväylä.

1 Johdanto

Aerosoleja tutkitaan Helsingin Yliopistossa Fysiikan laitoksessa ja Ilmakehätieteiden osastossa. Osastossa kehitetään menetelmiä ja rakennetaan laitteita, joilla voidaan mitata aerosoleja. Tämä insinööri työ liittyy pitkäaikaisten aerosolimittausten toteuttamiseen, ja aerosolihiukkasten kokojakauman mittaamiseen tarkasti ja luotettavasti. Mittauksissa tarvitaan tarkkaa korkeajännitelähdettä, joka tuottaa tarkasti 0 - 10 kV:n jännitteitä. (3 s. 1651; 4 s. 943; 5 s.143.)

Tässä insinööri työssä esitellään työtä varten suunniteltu 10 kV:n tarkkuuskorkeajännitelähde laboratoriokäyttöön. Työn jälkeen laitteesta voidaan valmistaa useita kappaleita Ilmakehätieteiden osaston mittauskäyttöön. Työssä suunnitellaan ja rakennetaan yksi toimiva laitteen prototyyppi ja mitataan sen tuottaman jännitteen tarkkuus.

Työssä suunniteltu tarkkuuskorkeajännitelähde on yksi aerosolimittalaitteiston osa. Aerosolihiukkasten kokojakauman mittauksissa tarvitaan absoluuttisesti tarkkaa jännitettä laajalla säätöalueella. Korkeajännitelähteen tulisi toimia pienilläkin jännitteillä. Tarkkuusjännitelähdettä tarvitaan staattisen sähkökentän luomiseen, joten sen ei tarvitse tuottaa merkittävästi virtaa.

Laitte pyritään suunnittelemaan siten, että se täyttää sille määritetyt vaatimukset. Laitteen tulee toimia jännitealueella 0 - 10 kV. Jännitteen absoluuttinen epätarkkuus on 1 ‰ asetusravosta yli 100 V:n jännitteillä. Alle 100 V:n jännitteillä tavoiteltava epätarkkuus on 100 mV. Laitte ottaa käyttösähkönsä 24 V:n tasajännitteestä. Laitteessa tulee olla analogisen ohjauksen potentiometri sekä digitaalinen ohjaus tietokoneen sarjaportin kautta. Tämän lisäksi usea laite tulee voida kytkeä samaan sarjaporttiin ketjuttamalla. Laitteen tulee toimia määritellyllä tarkkuudella laboratoriokäyttölämpötiloissa eli lämpötilassa 10 - 40 °C. Laitteen lähtöjännitteen asettumisnopeuden tulee olla parempi kuin 10 sekuntia.

2 Aerosolihiukkasten erottelu sähköisen liikkuvuuden avulla

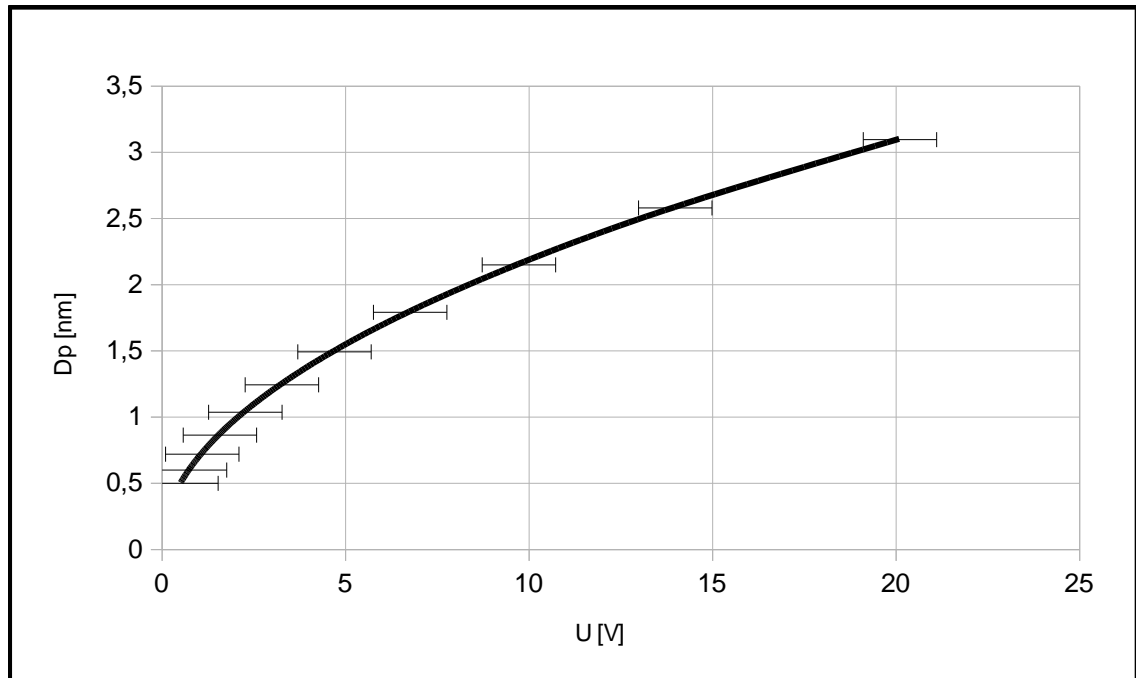
Aerosolihiukkasten vaikutusta ilmastoon ja ilmastomuutokseen ei vielä tunneta tarkasti. Osa aerosoleista vaikuttaa ilmastoon viilentävästi ja osa lämmittävästi. Lisäksi aerosolit toimivat pilvipisaroiden tiivistymisytiminä. Hiukkaset sirottavat valoa ja heikentävät näkyvyyttä. Pienhiukkasilla on lisäksi paljon terveysvaikutuksia. Tärkeänä tutkimuskohteena ovat 1-20 nm:n hiukkasten pitoisuudet ja kokojakauma, koska tieteellinen epävarmuus on suurin tällä kokoalueella. Kyseisen kokoalueen aerosolihiukkasilla on myös erityisen paljon terveysvaikutuksia. Pitkäaikaiset mittaukset ovat välttämättömiä aerosolien vaikutusten selvittämiseksi. (3 s. 1651; 4 s. 943; 5 s. 143.)

Aerosoli on kaasun ja siinä leijuvien hiukkasten seos. Hiukkaset voivat olla kiinteitä tai nestemäisiä, ja niiden halkaisija vaihtelee muutamista nanometreistä satoihin mikrometreihin. Kun hiukkasen elektronien lukumäärä eroaa protonien lukumäärästä, sitä sanotaan ioniksi. Ionin kokonaisvaraus on joko positiivinen tai negatiivinen. Sähkökentässä ioniin kohdistuu voima, joka pyrkii siirtämään sitä pois samanmerkkisistä varauksista. Esimerkiksi negatiiviseen ioniin kohdistuva voima siirtää ionia sähkökentän vastaisesti, kun taas positiivinen ioni pyrkii etenemään sähkökentän suuntaisesti.

Aerosolihiukkasten sähköisellä liikkuvuudella tarkoitetaan tietystä sähkökentästä aiheutuvan liikkumisnopeuden riippuvuutta hiukkasen halkaisijan ja varauksen suhteeseen. Varautunut hiukkanen liikkuu tasaisessa sähkökentässä sen sähköisestä liikkuvuudesta ja sähkökentän voimakkuudesta riippuvalla nopeudella. Aerosoli-ioni liikkuu sähkökentässä tasaisella nopeudella, kun sen liikettä vastustavat voimat kumoavat sähkökentästä aiheutuvan voiman. Pienemmillä aerosoleilla on suurempi liikkuvuus kuin suurilla aerosoleilla. Pienikokoisilla aerosoleilla liikettä vastustavat voimat ovat pienempiä, joten ne liikkuvat nopeammin kuin isot hiukkaset. Suuremmassa sähkökentässä varautunut aerosoli liikkuu nopeammin, kun taas pienemmässä sähkökentässä hitaammin. Aerosolin varausmäärä vaikuttaa siihen kohdistuvaan voimaan ja näin sen liikkuvuuteen.

DMA (*Differential Mobility Analyzer*) on varautuneiden hiukkasten jaotteluun käytetty laite. Se erottaa aerosolista varautuneita hiukkasia niiden sähköisen liikkuvuuden mukaan. Tietyllä sähkökentällä ja kaasun virtausnopeudella DMA erottaa tietyn liikkuvuuden omaavia hiukkasia. Sähkökentän luomiseen käytetään tyypillisesti jännitteitä 0 - 10 kV. Toiminta perustuu hiukkasten poikittaiseen liikkeeseen DMA:n sisällä. Oikean

matkan DMA:n sisällä liikkuvat varautuneet hiukkaset pääsevät ulos näytevirtaukseen, josta ne voidaan havaita erilaisin menetelmin. Väärän matkan liikkuneet hiukkaset poistetaan järjestelmän kaasukierrosta suodattimella. Kuvasta 1 näkyy kuinka erään DMA:n erottamien pienten hiukkasten halkaisija riippuu elektrodin jännitteestä. Alle 1 V:n jänniteilähtelulla on merkitystä erotustarkkuuteen. (1 s. 11-32; 2 s. 289-296.)



Kuva 1. Erään DMA:n erottamien pienten hiukkasten halkaisijan riippuvuus elektrodin jännitteestä. Vaaka-akselilla elektrodin jännite voltteina. Pystyakselilla erotetun hiukkasen halkaisija nanometreinä. Kuvassa on lisäksi apuviivat 1 V:n jännitevirheelle.

3 Korkeajännitelähteen turvallisuus

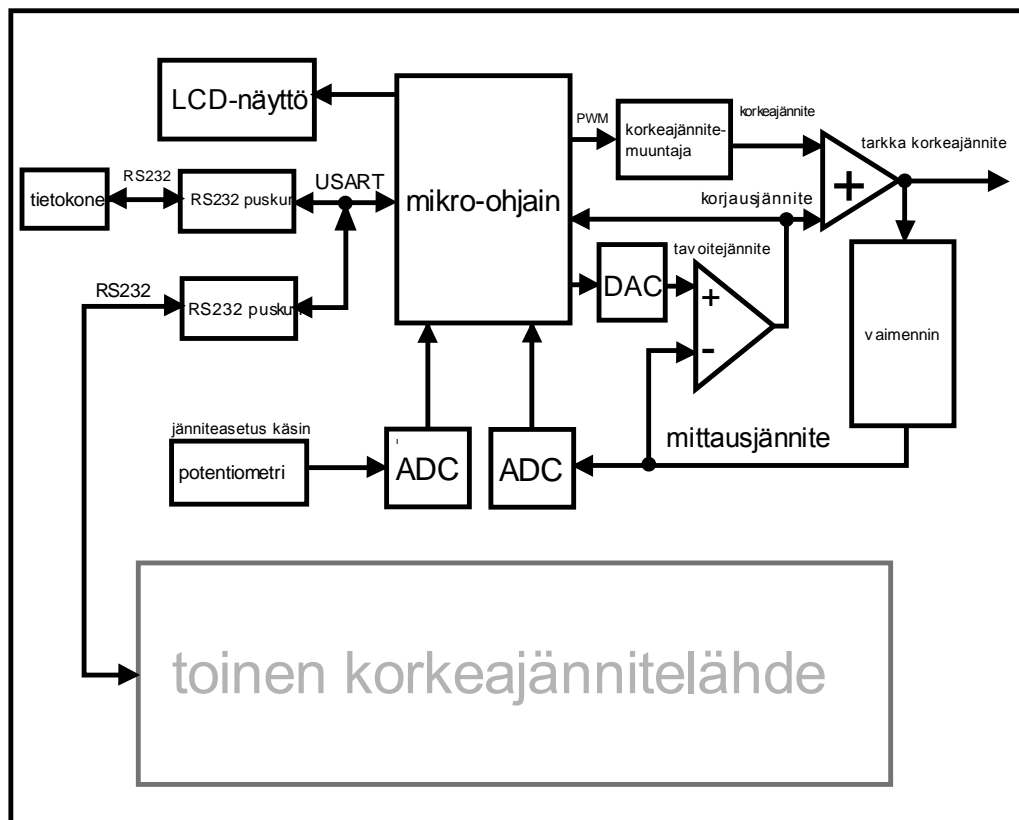
Korkeajännitelähteen suurin vaaranaiheuttaja on sähkövirran lihaksia stimuloiva vaikutus. Virta voi aiheuttaa pahimmassa tapauksessa vakavia vammoja tai jopa kuoleman, mikäli se pääsee kulkemaan sydämen kautta. Laitteen antama sähkövirta ei suoraan aiheuta palovammojen vaaraa, koska kokonaisvarausmäärät ja antoteho ovat lämpötehön kannalta pieniä. Kaikesta huolimatta tulipalon riski on aina olemassa sähkölaitteiden vikaantuessa. Ihmiselle hengenvaarallisena virtarajana pidetään 50 mA:n virtaa. (6; 7 s.14.)

Rakennetun laitteen lähdön virtaa vaimennetaan 10 M Ω :n sarjavastuksella. Vastus rajoittaa 10 kV:n jännitteessä tapahtuvan lähdön oikosulkuvirran pienemmäksi kuin 1 mA. Laite ei kykene tuottamaan täyttä oikosulkuvirtaa jatkuvasti, mutta oikosulun sattuessa laitteen sisäiset kondensaattorit purkavat hetkellisesti enemmän virtaa.

Korkeajännitelähde ei ole vaaraton, vaikka sen lähdön virtaa rajoitetaan. Jännitelähde voidaan kytkeä suureen ulkoiseen kapasitanssiin, jolloin kytketyn kapasitanssin oikosulkuvirta voi olla hengenvaarallinen. Lisäksi jännitelähteen sisällä olevat kondensaattorit kykenevät antamaan potentiaalisesti hengenvaarallista virtaa laitteen ollessa päällä. Lisäksi laitteen vikaantuminen voi aiheuttaa tilanteen, jossa sisäisten kondensaattorien varaus ei purkaudu, vaikka laite olisi pois päältä. Korkeajännitelähteen käyttö ja huoltotoimenpiteet vaativat aina erityistä huolellisuutta ja varovaisuutta.

4 Rakennetun korkeajännitelähteen toimintaperiaate

Korkeajännitelähteen laajasäätöinen tarkka toiminta perustuu lineaariregulaattorin ja hakkurilähteen yhdistämiseen (kuva 2). Lähtöjännite muodostetaan summaamalla jännitteet yhteen. Summaaminen toteutetaan siten, että hakkuri tuottaa kelluvaa korkeajännitettä, joka sidotaan maapotentiaaliin lineaariregulaattorin tuottamalla jännitteellä. Lineaariregulaattori toimii täysin analogisesti suhteellisen pienellä jännitealueella, mutta pyrkii tavoitearvoon koko jännitelähteen jännitealueella. Mikrokontrolleri säättää hakkuriregulaattorin pulssisuhdetta siten, että lineaariregulaattori toimisi säätöalueensa keskivaiheilla. Tavoiteltu jännitearvo luodaan suoraan DA-muuntimelta, jota mikro-ohjain ohjaa.



Kuva 2. Lohkokaavio insinööriyössä kehitetyn korkeajännitelähteen rakenteesta.

4.1 Jännitteen vaimennus jännitteenjaolla

Korkeajännitteen mittauksessa täytyy mitattavaa jännitesignaalia vaimentaa. Koska AD-muunnin mittaa jännitettä 0 - 5 V, täytyy 10 kV:n jännitettä vaimentaa vähintään kertoimella 2 000. Ensimmäisen testikappaleen kokemusten perusteella todettiin, että

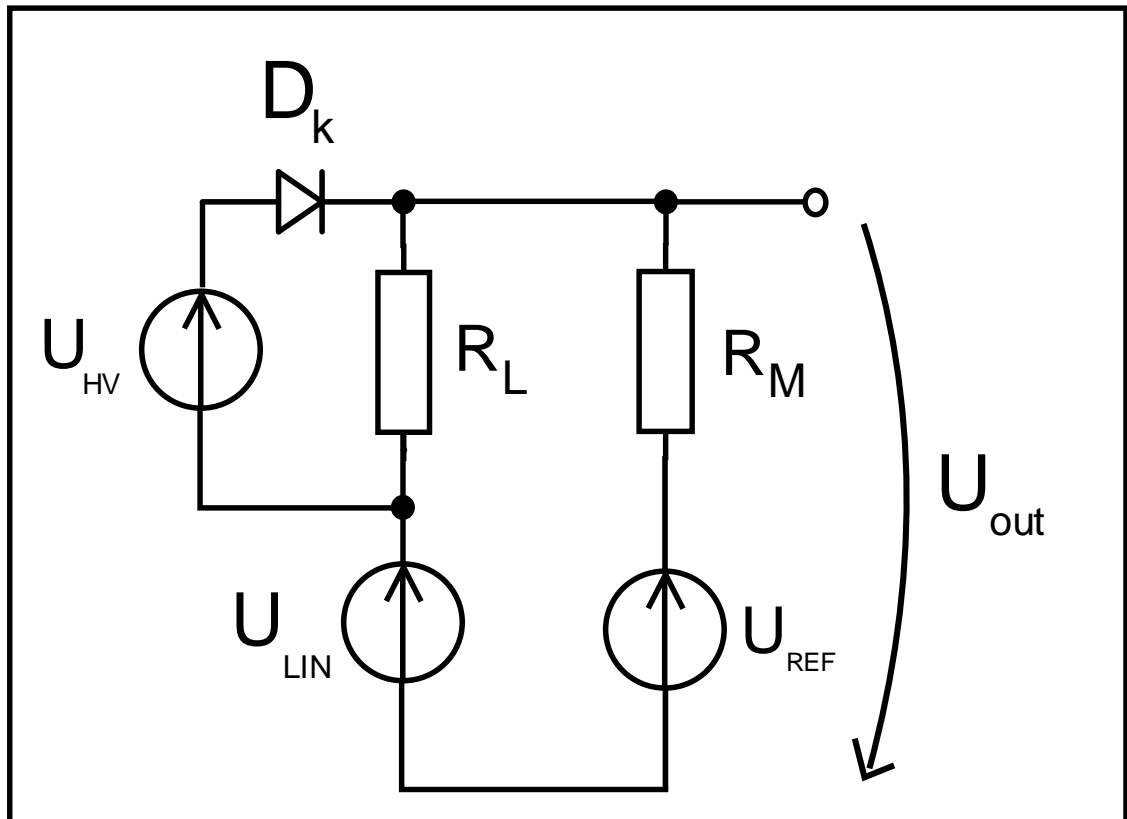
vaimennuskertoimen tulisi olla hieman suurempi, jotta jännite ei nousisi aivan mittausalueen reunoille.

Jännitemittauksen virran tulisi olla mahdollisimman suuri, jotta vuotovirrat ja puskuri vahvistimen sisäänmenovirta aiheuttaisivat mahdollisimman pienen virheen mittaukseen. Lisäksi markkinoilla olevien vastusten tarkkuus huononee, ja hinta kasvaa vastusarvon kasvaessa. Toisaalta virran tulisi olla mahdollisimman pieni, jotta jännitelähteen hakkuri olisi mahdollisimman kevyt, pieni ja turvallinen. Lisäksi mittausvastuksen läpi kulkeva virta lämmittää vastusta ja aiheuttaa mittausvirheen vastuksen lämpötilaepästabiiliuden kautta.

Mittauskytkentää päätettiin muuttaa siten, että se soveltuisi suoraan sekä positiivisten että negatiivisten jännitteiden mittaamiseen ilman, että kytkentään tarvitsee tehdä muutoksia. Kytkennässä käytettiin aikaisempaan verrattuna kaksinkertaista vaimennuskerrointa. Jännitteenjaon alapää kytkettiin mittausalueen puoleenväliin, 2,5 V:n potentiaaliin. Bipolaariseen mittaukseen soveltuvan vaimentimen kertoimeksi saatiin 4 400. Mittausalueen reunoille jätettiin 10 %:n vara käyttöjännitteistä, joka tarkoittaa 250 mV:n etäisyyttä maksimimittausarvosta.

Jännitteenjaon alapään (kuva 3: R_M ks. seur. s.) kytkemisestä 2,5 V:n potentiaaliin (kuva 3: U_{ref}) seurasi ongelmia positiiviselle jännitelähteelle. Jännitelähde ei kyennyt tuottamaan alle 2,5 V:n jännitteitä. Alle 2,5 V:n asetusjännitteillä referenssijännite latautui lähtöön jännitteenjaon kautta estäen tätä pienempien jännitteiden tuottamisen. Ongelma ratkaistiin lisäämällä kuormavastus jännitteenkertojan yli (kuva 3: R_L). Vastus purkaa lähdön varauksen myös jännitteenjaon alapään potentiaalın alapuolelle. Kuormavastus mitoitettiin mahdollisimman suureksi mutta mittausvastusta huomattavasti pienemmäksi.

Kuormavastus muodostaa jännitteenjaon mittausvastuksen kanssa pienillä jännitteillä. Linearisäädön säätöjännite vaimenee pienillä jännitteillä kuormavastuksen ja mittausvastuksen määräämällä suhteella (kuva 3: R_L, R_M). Jotta lineaarisäätö ei vaimenisi liikaa, kuormavastuksen tulee olla huomattavasti pienempi kuin mittausvastuksen. Mittausvastuksen resistanssi nostettiin arvoon 1 G Ω . Mittausvastuksen resistanssin noustua pystytään kuormavastukseksi valitsemaan suurempi vastus.

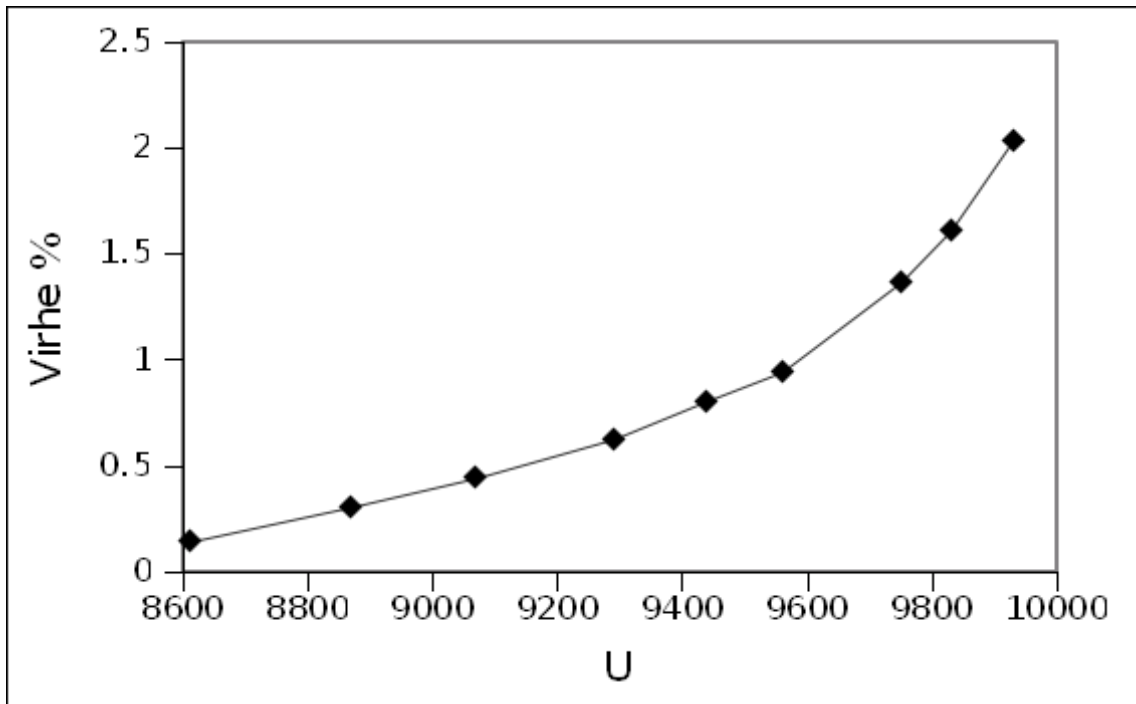


Kuva 3. Korkeajännitelähteen lineaarisäädön ja kelluvan korkeajännitteen yhdistämisen kytkentä. Kuormavastus (R_L) muodostaa jännitteenjaon mittaavastuksen (R_M) kanssa pienillä jännitteillä.

Kuormavastukseksi valittiin 330 M Ω :n vastus, joka on noin kolmasosa jännitteenjaon resistanssista. Näin lineaarisäädön vaikutus näkyy pienillä jännitteillä lähdössä noin neljänneksen pienempänä. Esimerkiksi 40 V:n jännite lineaariregulaattorilta tuottaa 30 V:n jännitteen lähtöön.

Kun jännitelähteen lähtöjännite halutaan asettaa nopeasti tai jännitelähteen aaltoilu (*ripple*-jännite) mitata, tulisi jännitteenjaon taajuusvasteen olla tarpeeksi hyvä. Jännitteenjaon taajuusvaste voidaan tehdä paremmaksi käyttämällä resistiivisen jännitteenjaon rinnalla kapasitiivista jännitteenjakoa.

Käytännön kokeissa ilmeni, että käytettyjen kondensaattorien vuotovirta riippuu suuresti jännitteestä ja tämä vaikuttaa mittaustulokseen. Käytetyillä 3 kV:n kestoisilla kondensaattoreilla tapahtui merkityksellistä vuotoa, kun yksittäisen kondensaattorin yli muodostui 1 700 V:n jännite (kuva 4 ks. seur. s.). Testikytkennässä käytettiin viittä kondensaattoria sarjassa. Mittauksissa todettiin, että jännitteenjaon taajuusvaste oli riittävän hyvä ilman kompensointikondensaattoreita, joten kapasitiivisesta jännitteenjaosta luovuttiin.



Kuva 4. Työssä testattujen kondensaattorien vuotovirrasta aiheutuva mittausrvirhe. Kytkennässä on käytetty viittä 3 kV kestävää pintaliitoskondensaattoria sarjakytkennässä. Vaaka-akselilla kondensaattorien yli kytketty jännite voltteina ja pystyakselilla mitatun arvon ero todellisesta prosentteina.

Jännitelähdettä käytetään pääasiassa laboratorio-olosuhteissa. Laitteen toimintalämpötila vaihtelee jonkin verran. Normaalin lämpötilavaihtelun aiheuttama muutos laitteen toiminnassa ei saisi aiheuttaa yli promillen muutosta lähtöjännitteessä. Jännitteenjaon vastusten lämpötilaepästabiilius on suurin yksittäinen tekijä, joka aiheuttaa toimintalämpötilasta aiheutuvan mittausrvirheen.

Vastusten arvot muuttuvat lämpötilan suhteen. Valmistajat kertovat vastusten lämpötilariippuvuuden yksikkönä ppm/°C eli miljoonasosaa yhtä celsiusastetta kohden. Koska laitetta käytetään pääosin sisätiloissa, sen käyttölämpötila vaihtelee 15 - 40 °C. Komponenttien lämpötilariippuvuuden tulee olla siis enintään 40 ppm/°C. Kyseinen lämpötilastabiilius riittää ainoastaan siinä tilanteessa, että vastus ei itsessään lämpene virran vaikutuksesta.

Jännitteenjakoon valittujen vastusten lämpötilakerroin on 25 ppm/°C, jolloin 40 °C:een lämpötilamuutoksella vastuksen resistanssi muuttuu 1 ‰:n. Tämä on riittävä laitteen toiminnalle. Mittausvastus voi lisäksi lämmetä 15 °C:ta ennen kuin yksin lämpötilasta aiheutuva virhe kasvaa yli 1 ‰:n käyttölämpötila-alueella. Mittausvastuksen lämpenemistä voidaan vähentää jännitteenjaon vastusten resistanssia kasvattamalla.

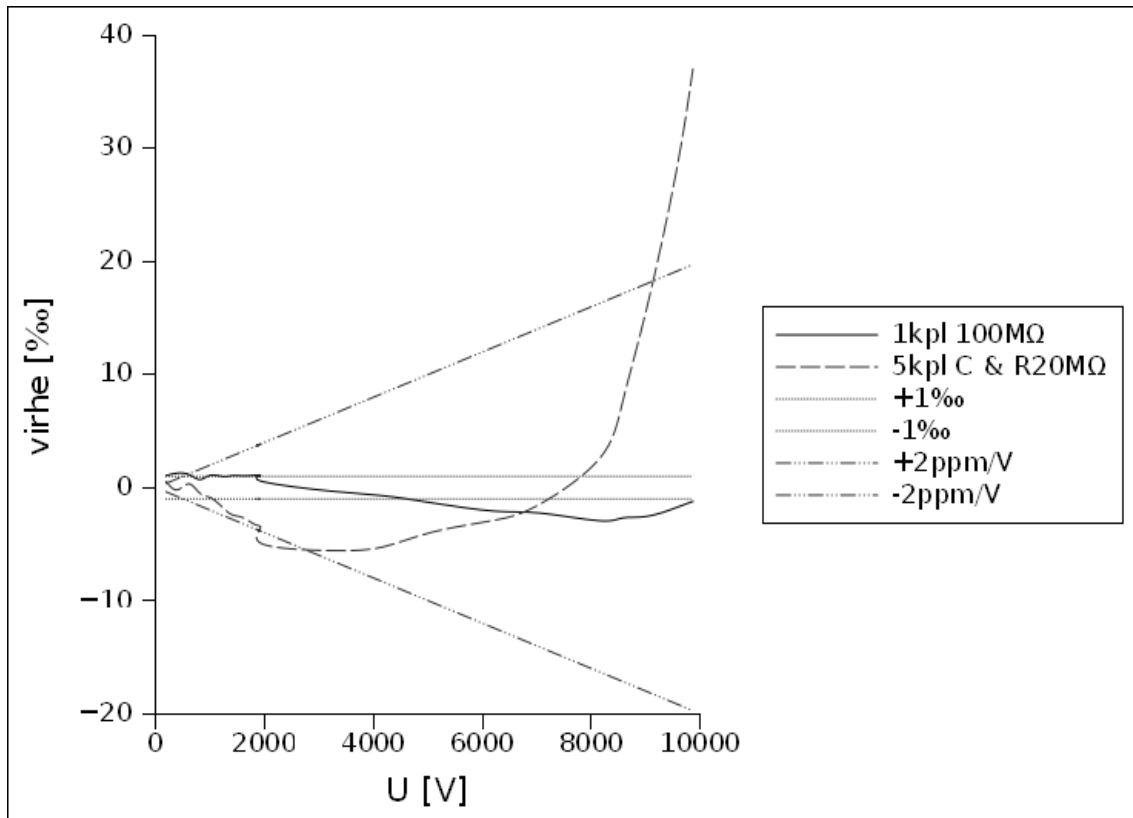
Määritellyn mittaustarkkuuden saavuttamiseksi koko toiminta-alueella täytyy vastusten olla riittävän lineaarisia koko jännitealueella. Valmistajien datalehdet tarjoavat vain suuntaa-antavaa tietoa siitä, kuinka vastusten arvot muuttuvat jännitteen kasvaessa. Laitteen mittaustarkkuuden selvittämiseksi mitattiin vastusten käyttäytymistä eri jännitteillä.

Vastusten resistanssi muuttuu jännitteen suhteen. Tätä muutosta valmistajat kuvaavat yksiköllä ppm/V eli miljoonasosaa yhtä voltia kohden. Pienillä vastuksilla ja jännitteillä lämpötilasta aiheutuva muutos on paljon suurempi kuin jännitteen. Vastusta lämmittävän tehon vaikutus resistanssiin kasvaa pienissä vastuksissa huomattavasti nopeammin kuin vastukseen kytkettävä jännite.

Jänniteriippuvuus vaikuttaa tasavirralla, kun käytetään usean sadan M Ω :n vastuksia, jolloin jännite kasvaa merkittävästi ennen lämmittävän tehon syntymistä. Jännitteen vaikutus voi ilmetä pienemmillä vastuksilla, mikäli käytetään nopeita pulsseja, jolloin keskimääräinen teho jää pieneksi, vaikka hetkellinen jännite on suuri. (8 ; 9.)

Jännitteenjaon tulee olla riittävän lineaarinen koko 10 kV:n jännitealueella, jotta määriteltä 1 promillen absoluuttinen mittaustarkkuus saavutetaan. Jännitteenjaossa olevien vastusten jännitekertoimen tulee olla 0,1 ppm/V. Valmistaja lupaa vastuksille vähintään 2 ppm/V jännitteen epästabiiliuskertoimen.

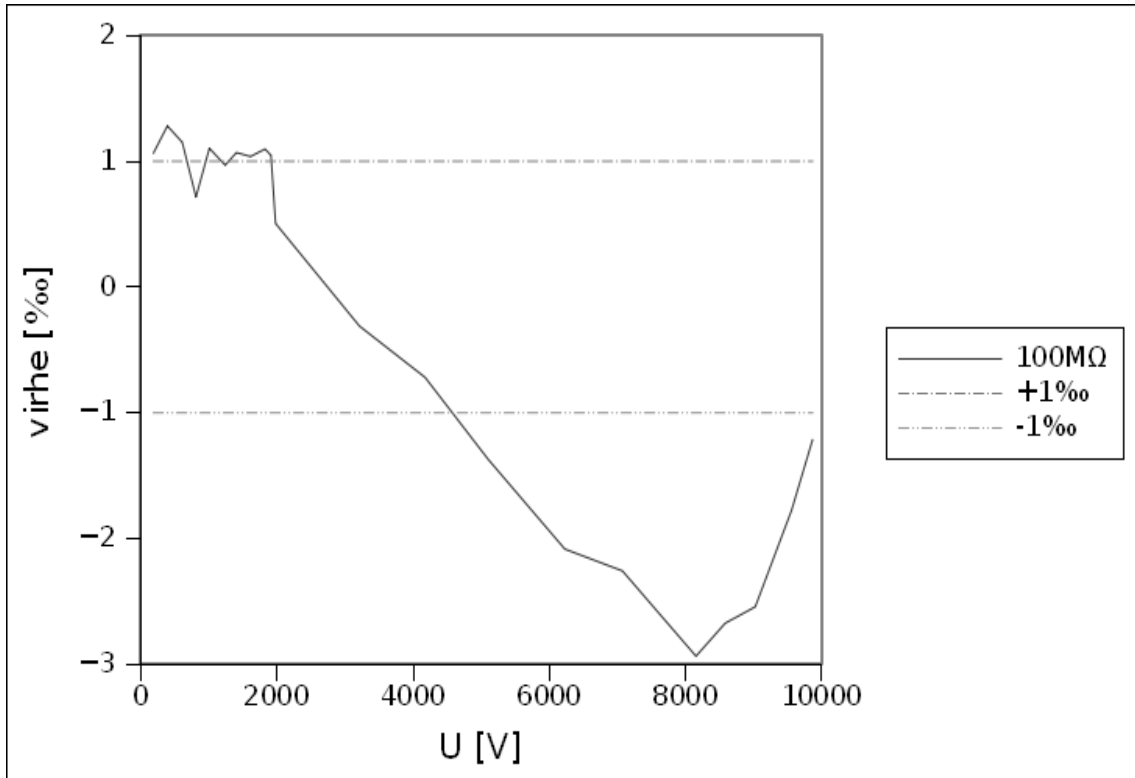
Vastusten jännitekerrointa testattiin laittamalla useampi pienempi vastus sarjaan, jolloin koko vastuspaketin jännitekerroin paranee, kun yksittäisen vastuksen yli muodostuva jännite pienenee. Sarjakytkennän jännitekerrointa pienentävä vaikutus on käytännössä huomattavasti suurempi, joten testikytkennän tarkkuus on parempi kuin lineaarisesta yksinkertaistuksesta saatu tarkkuusarvio. Jänniteriippuvuutta tutkittiin mittaamalla jännite rinnakkain kahdella eri jännitteenjaolla. Toinen jännitejaoista toimi mittauksen referenssinä paremman jännitekertoimen takia. Referenssi toteutettiin viiden 20 M Ω :n vastuksen sarjakytkennällä. Kuvassa 5 (ks. seur. s.) näkyy kahden mitatun jännitteenjaon jännitestabiilius. (10.)



Kuva 5. Kahden eri jännitevaimentimen jännitestabiiliudet. Vaaka-akselilla jännite voltteina. Pystyakselilla suhteellinen muutos todellisesta jännitteestä promilleina. Lisäksi kuvasta löytyy referenssiiviat promillen vaihtelulle ja 2 ppm/V jännitemuutokselle.

Vastusten sarjakytkennän käyttöä korkeajännitelähteessä pyritään välttämään, koska korkeajännitevastukset ovat fyysisesti isoja. Lisäksi vastusten liitoskohtiin voi muodostua ylimääräistä vuotovirtaa, esimerkiksi piirilevyn pinnan kautta. Vastusarvon nostaminen ei vaikuta vastuksen hintaan käytetyssä kokoluokassa, jolloin useamman vastuksen sarjakytkentä on kokonaisuutena myös kalliimpi ratkaisu.

Sarjakytkennän jännitekerroin on vähintään 5 kertaa parempi kuin yksittäisen 100 M Ω :n vastuksen jännitekerroin. Mittauksessa heitto mittaustulosten välillä oli neljän promillen sisällä (kuva 6 ks. seur. s.). Toiminta on kaksi kertaa epälinearisempaa kuin korkeajännitelähteelle tavoiteltu tarkkuus vaatisi. Arvo on kuitenkin 10 kertaa parempi, kuin mitä valmistajan datalehdessä luvataan. Valmistaja lupaa vastusten jännitteestä aiheutuvan vaihtelun olevan vähemmän kuin 2 ppm/V (11). Mittaustulosten perusteella voi päätellä, että kyseisen vastuksen jännitestabiilius on noin 0,4 ppm/V luokkaa.



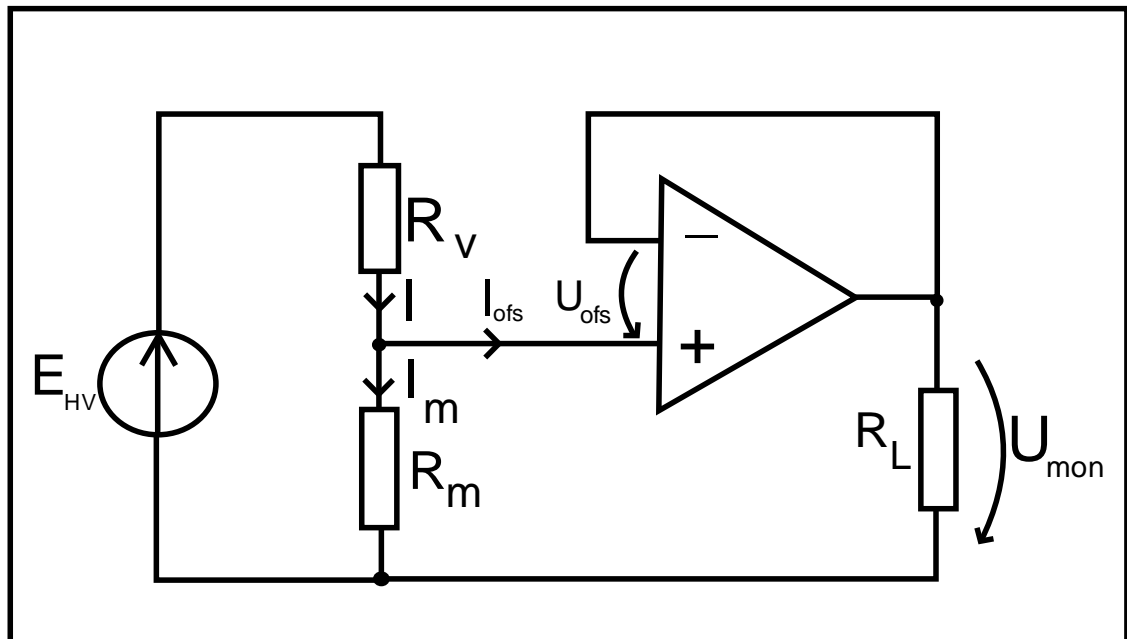
Kuva 6. 100 M Ω :n mittaustavastuksen jännitestabiilius, sekä 1 promillen vaihtelun rajat. Vaaka-akselilla jännite voltteina. Pystyakselilla suhteellinen muutos todelliseen nähden promilleina.

4.2 Vaimennetun jännitteen mittaaminen

Jännite mitataan AD-muuntimella, joka kykenee mittaamaan jännitteitä 0 - 5 V. Mitattava signaali saadaan aikaan vaimentimella joka vaimentaa jännitettä 4 400 osaan. Pie-nimmäksi erotettavaksi jännitteeksi tulee noin 20 μ V. Jotta 20 μ V voidaan havaita 0 - 5 V:n jännitealueella, tulee AD-muuntimen tarkkuuden olla vähintään 18 bittiä. Tässä työssä AD-muuntimena käytettiin Microchip:n mcp3551 piiriä (15). Muuntimen tarkkuus on 22 bittiä, ja se toimii 0 - 5 V:n mitta-alueella. Näin muuntimen pienin teoreettinen erotuskyky on 1 μ V, joka on reilusti parempi kuin laitteelle määritelty tarkkuus vaatisi. Jotta jännitteen mittaaminen toimisi 1 ‰:n absoluuttisella tarkkuudella, täytyy jännitereferenssien tuottaa tarvittu referenssijännite vähintään 1 ‰:n tarkkuudella. Työssä käytetty AD-muunnin tarvitsee 5 V:n referenssijännitteen. Referenssijännite tuotettiin Linear technologyn LT6656B jännitereferenssipiirillä. Valmistaja lupaa piirin tarkkuudeksi 1 ‰ (12). (14.)

Käytännön testissä ilmeni, että AD-muuntimen sisäänmeno-resistanssi (kuva 7: R_L) on noin muutama M Ω riippuen muuntimen toimintatilasta. Suhteellisen pieni resistanssi

vaikutti jännitteenjaon jännitteeseen olennaisesti. Jännite muuttui prosentoin verran, kun AD-muunnin kytkettiin jännitteenjakoon. Ongelma korjattiin kytkemällä operaatiovahvistin jänniteseuraajaksi (kuva 7) puskuroimaan jännitesignaalin lähtöresistanssi riittävästi pienemmäksi kuin AD-muuntimen sisäänmeno-resistanssi. Operaatiovahvistimen valinnassa olennainen parametri oli vahvistimissa ilmenevä siirrosjännite (*offset*) ja sisäänmenovirta (*bias*) (13 s. 613). Siirrosjännite on useissa operaatiovahvistimissa satoja mikrovoltteja ja riippuu suuresti käyttölämpötilasta.



Kuva 7. Jännitettä vaimentava jännitteenjako sekä operaatiovahvistin jänniteseuraajana.

Usean sadan μV :n siirtymä jännitteessä on liikaa, koska laitteen tulisi pystyä mittaamaan kymmenien mikrovolttien jännitteitä. Operaatiovahvistimena käytettiin Erkki Siivolan (15) suosittamaa operaatiovahvistinta, joka huolehtii siirrosjännitteen poistamisesta automaattisesti sisäisellä toiminnallaan. Näin kyseisen operaatiovahvistimen siirrosjännite on muutaman mikrovoltin luokkaa, näin se soveltuu puskuriksi suoraan ilman erillisiä nollauskytkentöjä. (16.)

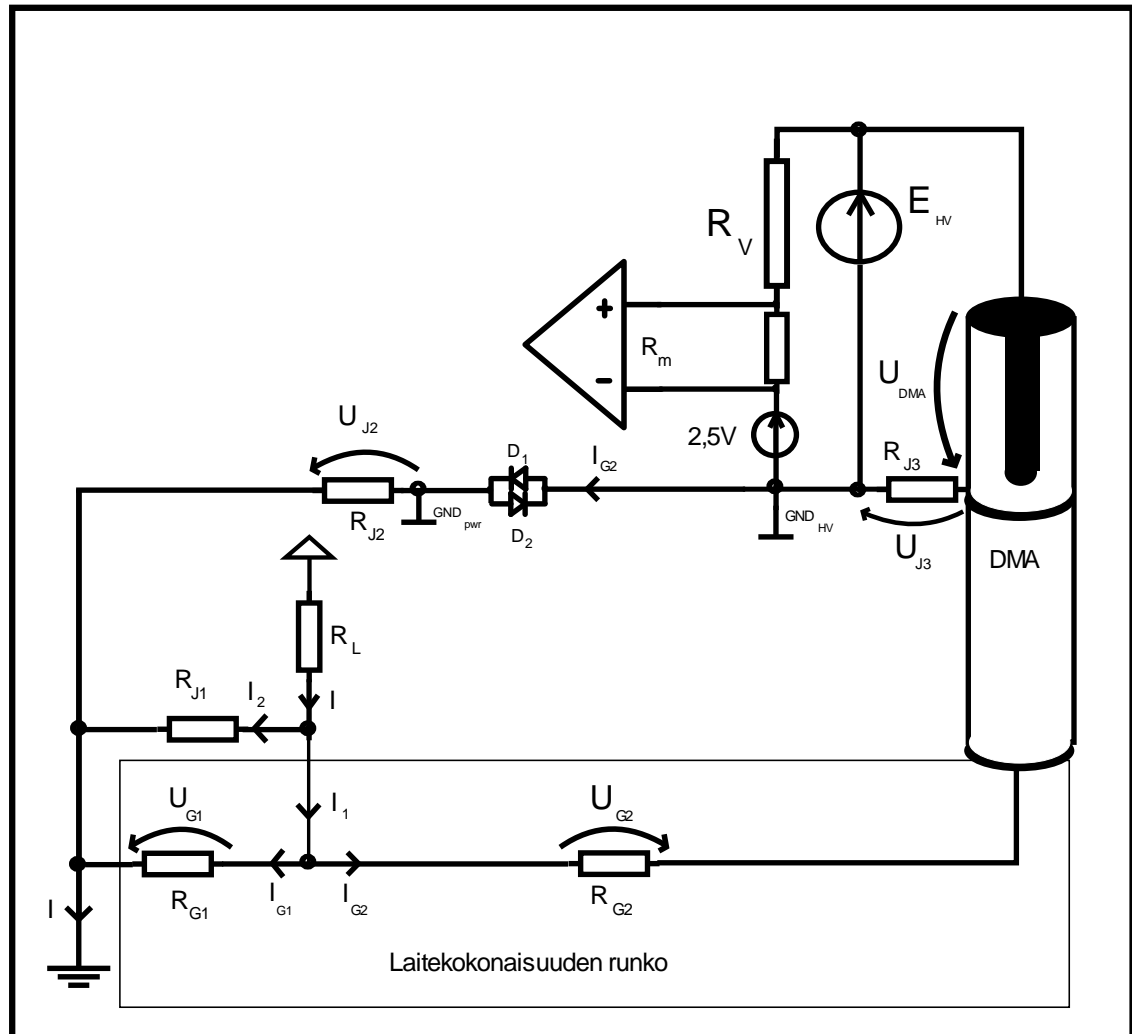
Laitteen käyttökohteessa laitekokonaisuuden rungon kautta voi kulkea merkittävää virtaa, joka puolestaan aiheuttaa potentiaalieroja korkeajännitteen maapisteen ja käyttöjännitteen maapisteen välille (kuva 8: GND_{pwr} , GND_{HV}). Maavirrat ovat ongelmallisia tarkkuusmittauksille, koska pienilläkin johdinresistansseilla johtimeen muodostuu virrasta riippuva jännitehäviö. Tarkkuuskomponenttien välisten johtimien kautta kulkeva virta aiheuttaa siirrosjännitteen, joka estää pienten jännitteiden luotettavan

mittaamisen. Jännitelähde rakennettiin siten, että maatasojen vaihteluista aiheutuvat potentiaalierot eivät vaikuta laitteen toimintaan olennaisesti sen tarkkuutta heikentävästi. Laitteen piirilevy suunniteltiin siten, että sen kautta kulkeva virta ei etene tarkkuusmittauskomponenttien välisten maajohtimien kautta.

Alussa suunniteltiin, että analogiaelektronikka kelluisi digitaalelektronikan suhteen. Näin korkeajännitteen maa voisi erota käyttöjännitteen maasta. Tämä vaatisi optisolointia tai jotain muuta ratkaisua esimerkiksi tasopuskuria. Tämä olisi vienyt ylimääräistä tilaa piirilevyltä ja tehnyt laitteesta huomattavasti monimutkaisemman.

Laitteesta haluttiin toimintavarma ja pienikokoinen, joten monimutkaisia kytkentöjä pyrittiin välttämään. Näin analogisen ja digitaalisen elektronikan galvaanisesta erottamisesta luovuttiin. Sen sijaan maa-tasojen pienet vaihtelut tehtiin mahdollisiksi digitaalikommunikaation sallimissa rajoissa.

Piirien datalehtien perusteella digitaalisen signaalin alhainen taso tulkitaan vielä 0,7 V:n jännitteestä, jolloin laitteiden maa voi erota hyvin ainakin 0,5 V ilman, että piirien välille muodostuu kommunikaatio-ongelmia. Näin laitteen käyttöjännitteen ja korkeajännitteen maiden välille voidaan sallia ainakin 0,5 V:n ero. Maapisteiden välille laitettiin kahdensuuntaiset diodit (kuva 8: D_1 , D_2 ks. seur.sivu) estämään suuren jännitteen muodostuminen. Diodien kynnysjännitettä pienemmillä maatasojen välisillä jännitteillä laitteen läpi ei käytännössä muodostu virtaa.



Kuva 8. Korkeajännitelähteen ja DMA:n maakytkentä laitteen rungon kautta. Vastus R_L mallintaa laitekokonaisuuteen kytkettyä suurivirtaista osaa. Sen käyttövirran paluulenkki on kytkettynä laitteen runkoon useasta pisteestä ja aiheuttaa rungon kautta kulkevaa virtaa.

4.3 Jännitelähteen hakkuriosien toimintaperiaate

Hakkurilähteen toiminta perustuu kelan ominaisuuteen vastustaa virran muutosta (kaava 1); (17, s. 124).

$$\delta I = U \frac{\delta t}{L} \quad (1)$$

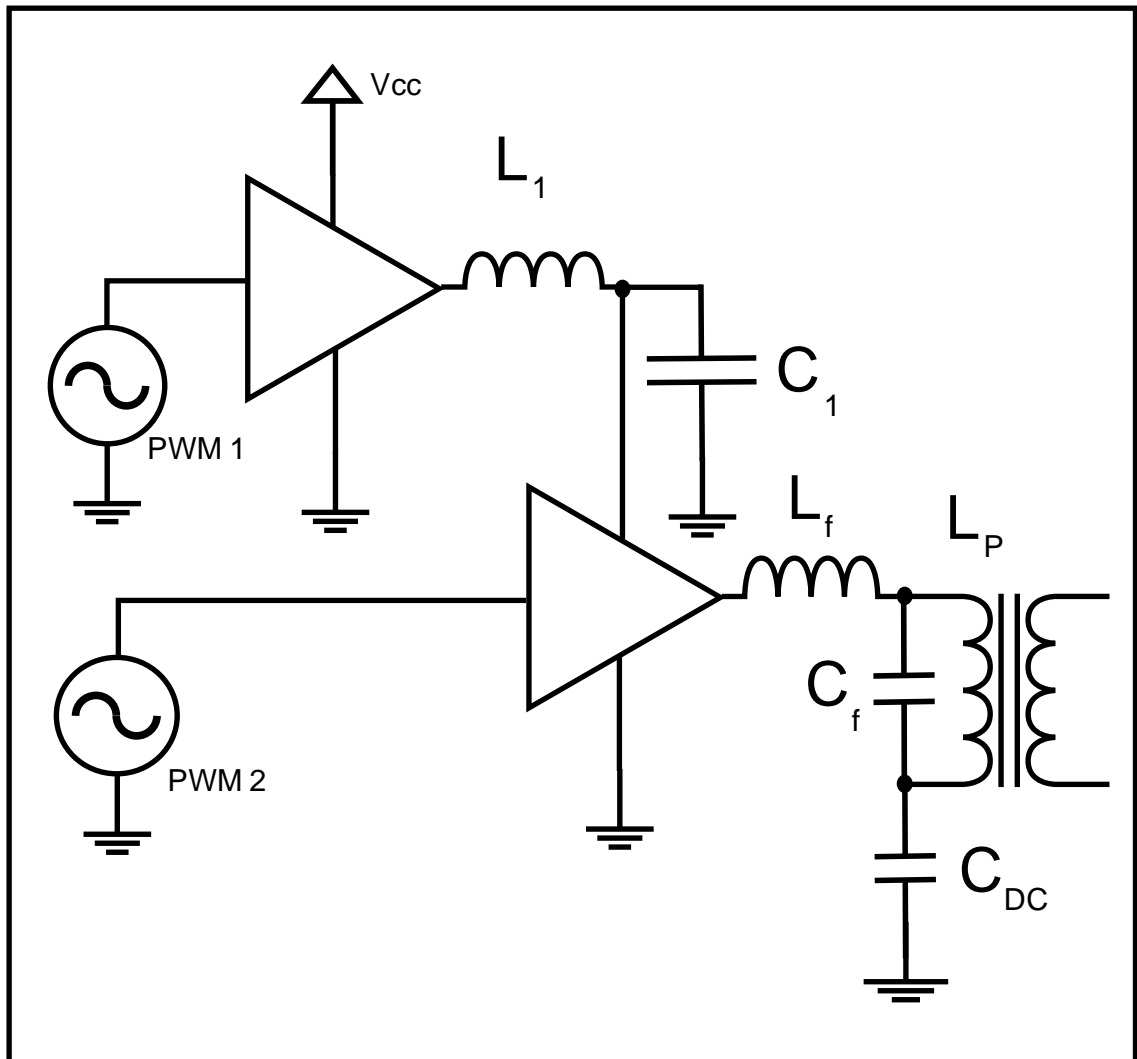
L on kelan induktanssi

δI on virran muutos

δt on kulunut aika

U on kelan yli kytketty jännite

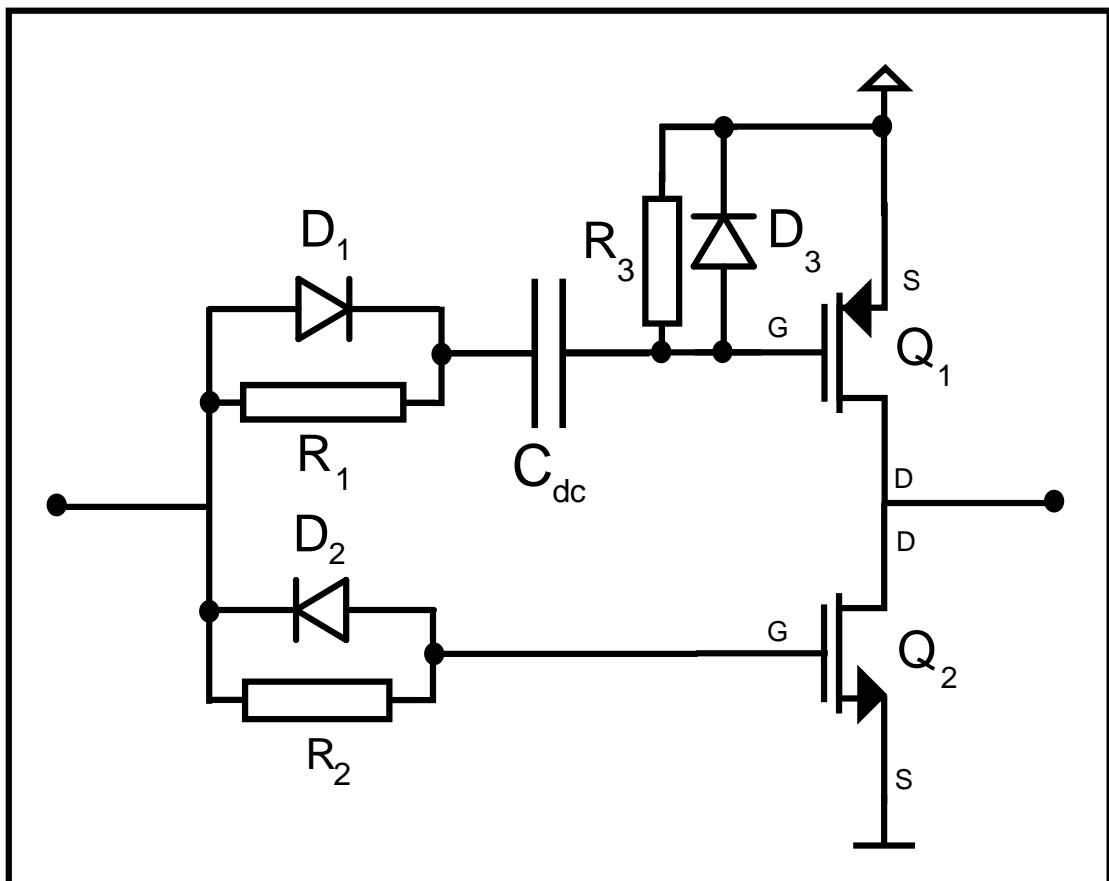
Kela vastustaa virtaa varastoimalla ja purkamalla energiaa magneettikentästä. Kelan magneettikenttä muodostetaan johonkin magnetoituvaan materiaaliin. Yleisimmin ke-loissa käytetyt materiaalit voivat magnetoitua vain rajallisen määrän. Kun kelan mag-neettikentän energia on lähellä materiaalin magnetoitumisen ylärajaa, kelan induktans-si romahtaa, ja kela lakkaa vastustamasta virran muutosta. Tätä ilmiötä kutsutaan ke-lan kyllästymiseksi. Hakkurilähteen toiminnan kannalta on tärkeää, että kelaa ei pääs-tetä kyllästymään.



Kuva 9. Korkeajännitelähteessä käytetty kaksiasteinen hakkurikytkentä. Ensimmäinen aste alentaa jännitteen toiselle asteelle, joka ajaa korkeajännitemuuntajaa.

Riittävän laajan hakkurilähteen toiminta-alueen saavuttamiseksi laitteessa on kaksi hakkuriastetta (kuva 9). Ensimmäinen hakkuriaste alentaa käyttöjännitettä toista astetta varten ja on toimintaperiaatteeltaan *step-down*-hakkuri. Toinen aste ajaa korkeajännitemuuntajaa tuottaen korkeajännitteistä vaihtojännitettä.

Kytkinajureina molemmissa hakkuriasteissa käytettiin P ja N -kanavaiseen MOSFET kanavatransistoriin (kuva 10: Q_1, Q_2) perustuvaa kytkentää. Transistorien kanavien sulkemisesta tehdään nopeampaa kuin niiden avaamisesta laittamalla sisäänmenoon diodit ja vastukset rinnan (kuva 10: D_1, D_2, R_1, R_2). Nopeammalla kanavan sulkemisella saavutetaan tilanne, jossa transistorit eivät johda samanaikaisesti tilanvaihdossa. Transistorien samanaikaisesta johtamisesta seuraa oikosulku jonka virtaa rajoittaa transistorien kytkentäresistanssi. Tästä seuraa häiriöitä, hukkatehoa sekä transistorin nopea kuumeneminen, mikä aiheuttaa transistorin hajoamiseen suuremmilla syöttöjännitteillä. Käyttöjännitteen puolella olevan P-kanavaisen transistorin hilaa ohjataan kondensaattorin C_{dc} läpi, jolloin P-kanavaisen transistorin hilan DC-taso voidaan lukita vastuksen sekä diodin (kuva 10: R_3, D_3) avulla.



Kuva 10. Laajakäyttöjännitteinen *push-pull* ajurikytkentä, joka toimii myös pienillä käyttöjännitteillä.

Hakkureita ohjataan kahdella mikro-ohjaimen tuottamalla pulssinleveyssignaaleilla (kuva 9: PWM1 ja PWM2). Pulssinleveyssignaalin mallintamiseksi voidaan käyttää Fourier'n sarjaa (kaava 2). (17, s. 77.)

$$f(t) = U(1 - D) - \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n \pi D}{n} \cos(2 \pi n f_0 t) \quad (2)$$

U on jännite

D on pulssisuhde

n on harmonisen taajuuden kertaluku

f_0 on perustaajuus

t on aika

Signaali esitetään siniaaltojen summana. Signaalin jokaisen yksittäinen taajuuskomponentin vaikutus voidaan laskea erikseen. Erillään laskettujen taajuuskomponenttien vaikutukset voidaan summata kerrostusmenetelmän avulla (18, s. 3). Ensimmäinen jännitettä alentava hakkuriaste perustuu vaihtomuotoisten signaalikomponenttien suodatukseen, jolloin ideaalitalanteessa kaavasta 2 jää tasavirtakomponentti (kaava 3).

$$f(t) = U(1 - D) \quad (3)$$

U on jännite

D on pulssisuhde

Ensimmäisen hakkuriasteen tuottama jännite riippuu siis suoraan pulssisuhteesta.

Toinen hakkuriaste ohjaa korkeajännitemuuntajaa. Tasajännitekomponentti ei näy muuntajan toisiossa. Piiriin lisättiin sarjakondensaattori estämään tasavirran muodostuminen (kuva 9: C_{DC}). Toisesta hakkuriasteesta pyritään hyödyntämään pulssinleveyssignaalista ainoastaan perustaajuutta (kaava 4). Perustaajuus voidaan poimia kaavasta 2.

$$f(t) = \frac{2U}{\pi} \sin \pi D \cos(2 \pi f t) \quad (4)$$

U on jännite

D on pulssisuhde

f on taajuus

t on aika

Tästä voidaan todeta, että toisen hakkurin tuottama jännite säätyy pulssisuhteen sini-funktion mukaan. Korkeimmillaan lähtöjännite on 50 %:n pulssisuhteella. Lisäksi jännitteen säätö toimii sitä tarkemmin, mitä lähempänä 50 %:n pulssisuhdetta toimitaan.

Molemmissa hakkuriasteissa toiminta perustuu ei-toivottujen taajuuksien suodatukseen. Vaihtomuotoisten signaalikomponenttien suodatus toteutetaan molemmissa hakkuriasteissa kelan ja kondensaattorin sarjakytkenällä. LC-piirin analysoimiseksi tarvitaan muutamaa sähkötekniikan peruskaavaa.

Ohmin laki

$$U = Z I \quad (5)$$

U on kytkennän yli jäävä jännite

Z on kytkennän impedanssi

I on komponentin läpi kulkeva virta

Vastuksen impedanssi on

$$Z_R = R, \quad (6)$$

Muiden lineaaristen komponenttien impedanssit voidaan esittää kompleksiluvuilla. Kondensaattorin impedanssi on

$$Z_C = \frac{1}{j \omega C}, \quad (7)$$

jossa j on imaginääriyksikkö ($\sqrt{-1}$), C on kapasitanssi, ω on kulmataajuus ($2 \pi f$) ja f on taajuus. Kelan impedanssi on

$$Z_L = j \omega L, \quad (8)$$

jossa j on imaginääriyksikkö ($\sqrt{-1}$), L on induktanssi, ω on kulmataajuus ($2 \pi f$) ja f on taajuus.

Ohmin lain (kaava 5) avulla voidaan määrittää jännite, virta tai impedanssi, kun kaksi muuta suuretta tunnetaan. Kaavojen 6, 7 ja 8 perusteella voidaan puolestaan määrittää lineaaristen komponenttien impedanssit. Ohmin lain avulla (kaava 5) voidaan määrittää LC-piirin läpi kulkeva virta (kaava 9), kun molempien komponenttien yhteenlaskettu impedanssi tiedetään.

$$I = \frac{U}{(Z_C + Z_L)} \quad (9)$$

U on komponentin yli jäävä jännite
 Z_C on kondensaattorin impedanssi
 Z_L on kelan impedanssi

Kondensaattorin yli näkyvä jännite voidaan määrittää sijoittamalla piirin virran lause (kaava 9), ohmin lakiin (kaava 5), josta saadaan kaava 10.

$$U_c = U \frac{Z_C}{Z_C + Z_L} \quad (10)$$

U on piiriin syötetty jännite
 Z_C on kondensaattorin impedanssi
 Z_L on kelan impedanssi

Kun jännitteen lauseeseen 10 sijoitetaan impedanssien kaavat 7 ja 8 sekä sievennetään, saadaan kondensaattorin yli näkyväksi jännitteeksi kaava 11.

$$U_c = \frac{U}{1 - \omega^2 L C} \quad (11)$$

U_c on kondensaattorin yli näkyvä jännite
 U on piiriin syötetty jännite
 L on kelan induktanssi
 C on kondensaattorin kapasitanssi
 ω on syötetyn jännitteen kulmataajuus $2 \pi f$
 f on taajuus

LC-piiri on resonanssissa, kun kaavan 11 nimittäjä saavuttaa arvon 0. Tästä seuraa teoriassa se, että kondensaattorin yli näkyvä jännite lähestyy ääretöntä, kun piiriin syötetyn jännitteen taajuus lähestyy resonanssitaajuutta.

$$\omega^2 L C = 1 \quad (12)$$

ω on kulmataajuus $2 \pi f$
 f on taajuus
 L on kelan induktanssi
 C on kondensaattorin kapasitanssi

Käytännön LC-piirissä komponenteissa on aina sarjaresistanssia. Käytännössä kaavan 12 tilanteessa kondensaattorin yli näkyvä jännite on maksimiarvossaan, joka riippuu

sarjaresistanssin suuruudesta. Sarjaresistanssi on jätetty pois laskuista, koska sillä ei ole vaikutusta itse resonanssitaajuuteen. Kaavan 12 perusteella resonanssitaajuuden kaava on

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (13)$$

f_0 on resonanssitaajuus

L on kelan induktanssi

C on kondensaattorin kapasitanssi

Resonanssitaajuuden yläpuolella (kun $f \gg f_0$) lähtöjännite vaimenee neljäsosaan aina taajuuden kaksinkertaistuttua.

Hakkurin ensimmäisessä asteessa resonanssitaajuus valitaan mahdollisimman paljon pienemmäksi kuin hakkuritaajuus, jolloin kaikki vaihtomuotoiset komponentit vaimenevat olemattomiin, ja jäljelle jää pelkkä tasavirtakomponentti. Resonanssitaajuus on sitä pienempi, mitä suurempi kondensaattori tai kela kytketään piiriin.

Toisen hakkuriasteen hakkuritaajuus valitaan suuremmaksi kuin muuntajan kytkennän resonanssitaajuus. Hakkuritaajuuden olisi hyvä valita mahdollisimman lähellä resonanssitaajuutta maksimaalisen lähtöjännitteen saavuttamiseksi.

Markkinoilta on saatavilla korkeajännitediodeja, jotka kestävät 15 kV:n estosuuntaisen jännitteen. Tämä mahdollistaisi hakkurin rakentamisen jopa ilman jännitteenkertojaa. Ilman jännitteenkertojaa muuntajan eristysten pitäisi kestää suurempia jännitteitä ja muuntajasta tulisi todennäköisesti kallis mittatilaustyö. Toisena vaihtoehtona on tehdä muutaman kV:n korkeajännitelähde ja kytkeä siihen jännitteenkertoja.

Työssä käytettiin 1,3 kV:n kestoista ostokorkeajännitemuuntajaa ja siihen kytkettiin 5-kertainen jännitteenkertoja. Kyseisen kokoiset korkeajännitemuuntajat ovat yleisiä kylmäkatodiloisteputkien tehölähteissä ja ovat näin edullisia sekä helposti saatavilla. Kylmäkatodiloisteputkien yleisin käyttökohde on tietokoneen LCD-näytön taustavalona. (19.)

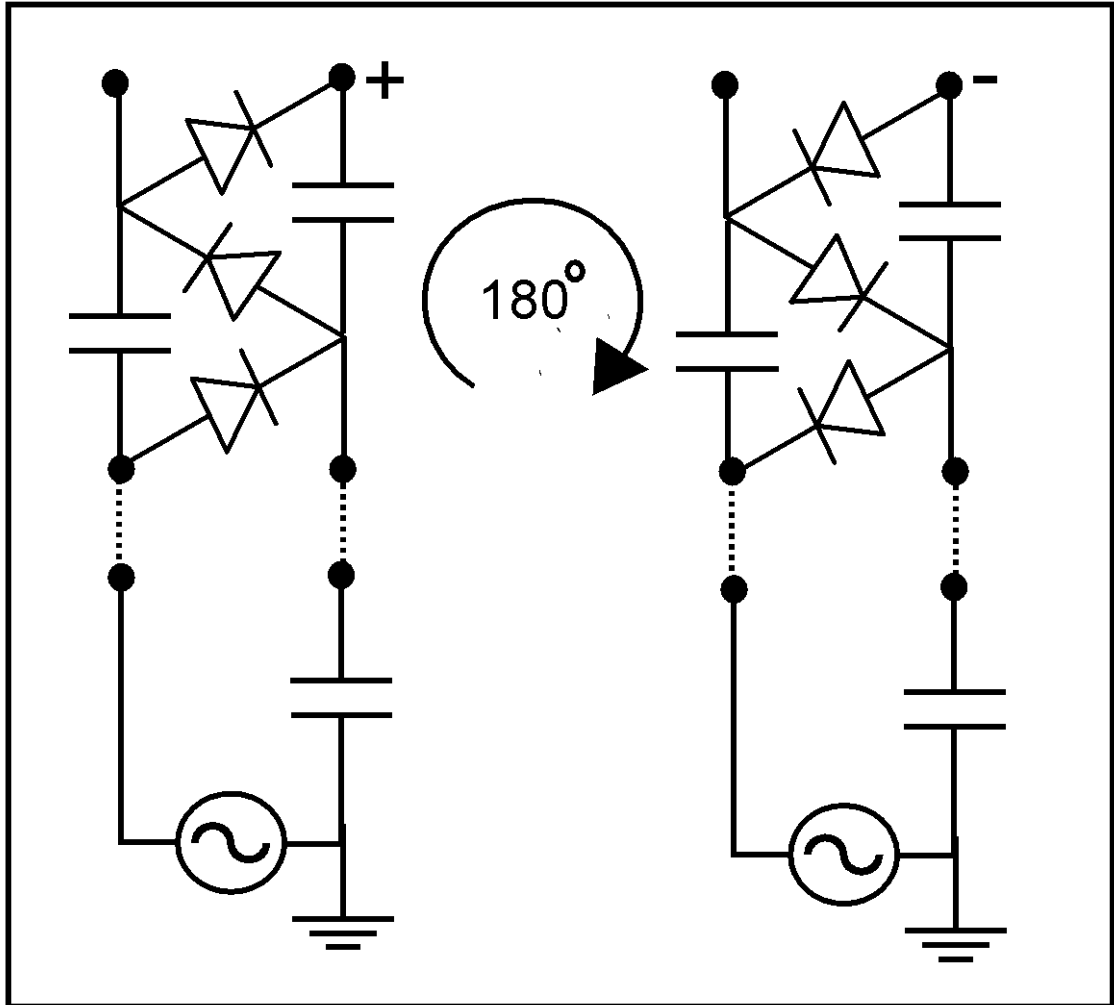
Kylmäkatodiloisteputkien muuntajat on suunniteltu halvoiksi valmistaa. Niiden ensiön induktanssi on mahdollisimman pieni, jotta muuntajan käämeihin tarvitaan vähemmän

kierroksia. Tästä seuraa, että muuntajan käyttötaajuudella huippuvirta kasvaa suureksi. Hetkellinen virta voi olla jopa yli 10 A. Kytkentähäviöiden välttämiseksi muuntaja kytketään resonanssiin kondensaattorin kanssa. Resonanssikytkennällä vältetään transistorien tarpeeton kuumeneminen, kun transistoreiden kautta kulkee huomattavasti pienempi virta.

4.4 Korkean tasajännitteen luominen jännitteenkertojalla

Laitteen korkea tasajännite luodaan jännitteenkertojalla. Jännitteenkertoja toteutettiin diodeilla ja kondensaattoreilla. Jännitteenkertoja luo tasajännitettä tasasuuntaamalla syötetyn vaihtojännitteen (20, s. 52). Jännitteenkertoja toteutettiin siten, että se voidaan asettaa piirilevyllä kahdella eri tavalla (kuva 11). Asennolla voidaan valita tasasuunnatun jännitteen polariteetti.

Moniasteisissa jännitteenkertojissa tarvittavien kondensaattorien koon mallintaminen on haasteellista, sillä jokaisen kertoja-asteen jännitteen aaltoilu (*ripple*) kertaantuu seuraavalle tasolle, ja lähimpänä kuormaa olevien kertoja-asteiden jännitettä kertova vaikutus mitätöityy, mikäli kondensaattorit ovat liian pieniä. Ylisuuresta kapasitanssista ei kuitenkaan ole haittaa jännitteen tuottamisen näkökulmasta. Kapasitanssin kasvu tosin hidastaa jännitelähteen hakkurisäädön nopeutta. Käytännössä kondensaattorien koko määritettiin kokeilemalla parilla eri kondensaattoriarvolla. Tulokseksi saatiin, että jännitteenkertojan kondensaattorien kapasitanssin tulisi olla ainakin 10 nF.



Kuva 11. Jännitteenkertoja. Vasemmalla kertoja on positiivinen. Oikealla kertoja on negatiivinen. Kertojan polariteetti voidaan vaihtaa pyöräyttämällä sitä 180 astetta.

Jännitteenkertojan kondensaattorit tulisi mitoittaa siten, että ne kykenevät siirtämään riittävästi virtaa käytettävällä hakkuritaajuudella.

Jännitelähteen aaltoilua (*ripple*) mitattiin patterikäyttöisellä oskilloskoopilla, jonka sisäänmeno suojattiin varistorilla ja maataso stabiloitiin kondensaattorilla. Alhaisilla jännitteillä lähdön aaltoilu pystytään mittaamaan suoraan tavallisella oskilloskoopilla. Jännitteen aaltoilua voidaan myös arvioida käyttämällä kaavaa 14 (20. s. 52).

$$\delta U = \frac{i_L}{f C} \frac{n(n+1)}{2} \quad (14)$$

i_L on kuormaan menevä virta
 f on taajuus
 C on yhden kondensaattorin kapasitanssi
 n on kertojan asteiden lukumäärä

Jännitelähteessä käytettiin 5-asteista jännitteenkertojaa 15 nF:n kondensaattoreilla. Käytetty hakkuritaajuus on noin 50 kHz, ja lähtövirta ilman ulkoista kuormaa on noin 50 μ A 10 kV:n jännitteessä. Kaavan 14 avulla arvioituna jännitteenkertoja aaltoilee maksimijännitteessä noin 1 V:n. Tämä on 0,1 %o asetusarvosta. Jännitteenkertojan jälkeen kytkennässä on alipäästösuodatin, joka pienentää aaltoilua entisestään. Alipäästösuodatin toteutettiin 1,2 M Ω :n sarjavastuksen sekä 1 nF:n rinnankondensaattorin kytkennällä. Alipäästösuodattimen 3 dB:n rajataajuus voidaan laskea kaavalla 15.

$$f_0 = \frac{1}{2 \pi R C} \quad (15)$$

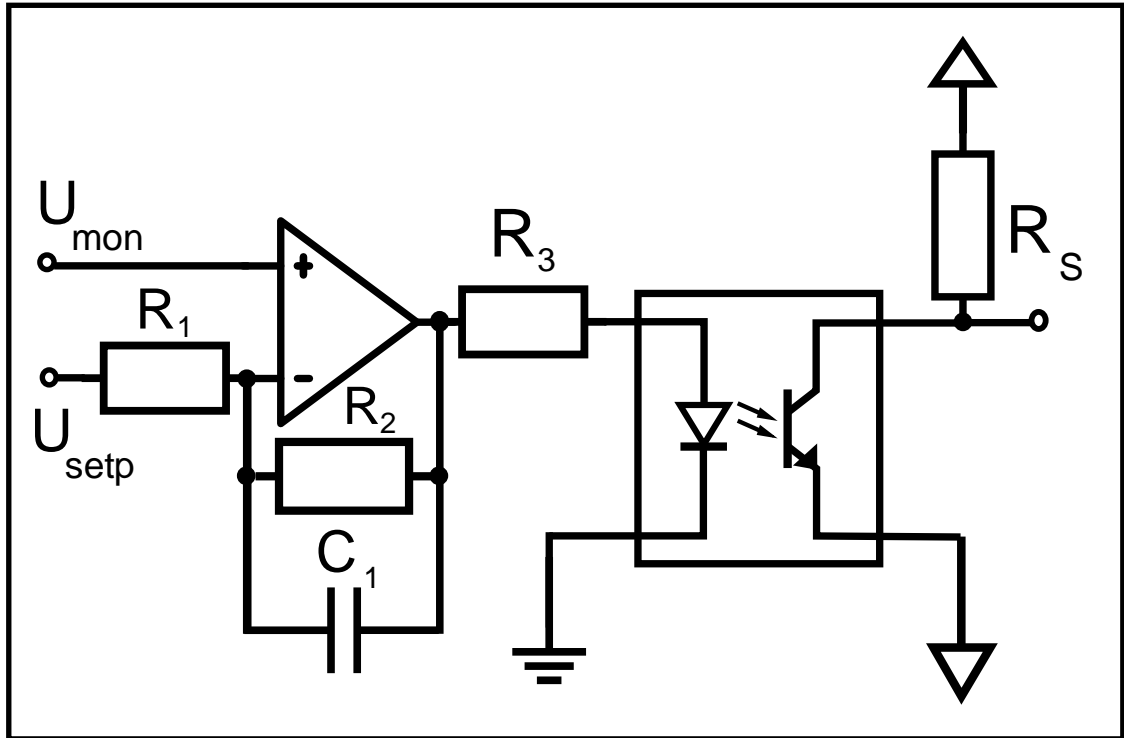
f_0 on 3 dB:n rajataajuus
 R on sarjavastuksen resistanssi
 C on rinnankondensaattorin kapasitanssi

Boden-mallin perusteella RC-alipäästösuodattimen vaimennus kasvaa rajataajuudesta ylöspäin 20 dB jokaista taajuuden dekadia kohden. Jännitelähteen lähdon RC-suodattimen tapauksessa rajataajuus on 132 Hz, joten 50 kHz hakkuritaajuudella vaimennus on noin 50 dB. Korkeajännitelähteen jännitteenkertojasta aiheutuva aaltoilu on siis teoriassa 3 mV:n kokoluokkaa.

4.5 Jännitelähteen lineaarisen jännitesäädön toiminta

Laitteen lineaarinen jännitesäätö toteutettiin +40...-40 V:n alueella toimivalla lineaariregulaattorilla, joka tekee tarkan hienosäädön. Hakkuri luo suurpiirteisen jännitteen. Mikro-ohjain ohjaa hakkuria pulssinleveyssignaalilla. Tavoitteena on se, että lineaariregulaattori olisi mahdollisimman lähellä säätöalueensa puoliväliä. Tällöin se pystyy vastaamaan pieniin hakkurijännitteen heilahteluihin ilman, että sen säätö menee välittömästi äärilaitaansa.

Lineaariregulaattoriosa toteutettiin shunttiregulaattoriperiaatteella (kuva 12). Operaatiovahvistin vertaa tavoitejännitettä sekä mitattua jännitettä. Operaatiovahvistin ohjaa optoerotinta, joka säätelee shunttivastuksen (R_S) läpi kulkevaa virtaa.



Kuva 12. Lineaarishunttiregulaattorin rakenne. KytKentä säätelee shunttivastuksen läpi kulkevaa virtaa siten, että U_{mon} on yhtä suuri kuin U_{setp} . Vastukset R_1, R_2 rajoittavat operaatiovahvistimen vahvistusta. Kondensaattori C_1 hidastaa regulaattorin säätönopeutta.

Suunnitelmana oli toteuttaa regulaattorin virran säätö kanavatransistorilla. Jännitelähteessä tarvittiin kuitenkin säädettävää lineaariregulaattoria, jonka lähtö meni sekä positiiviselle että negatiiviselle jännitteelle. Regulaattorin virran säätämiseksi käytettiin suhteellisen suurella jännitealueella toimivaa optoerotinta, jonka virransiirtosuhte (*current transfer ratio*) lähdön ja tulon välillä on lähes lineaarinen.

Lineaariregulaattorin tarkkuusvaatimus lähdössä on 100 mV, joka vastaa vaimentimesta mitattuna jännitteenä noin 23 μV . Tarvittu tarkkuus voidaan saavuttaa riittävän tarkalla operaatiovahvistimella. Lineaariregulaattorin tavoitejännitteen tulee myös olla tarkka.

Lineaariregulaattorin säätönopeuden täytyy olla huomattavasti nopeampi kuin hakkurin, jotta kytKentä ei ala tarpeettomasti värähtelemään. Mikro-ohjaimen analogituloihin laitettiin alipäästösuodattimet vaimentamaan nopeita häiriöitä. Hakkurin säätönopeutta voidaan myös muuttaa ohjelmallisesti. Oikosulkuvirta kyetään havaitsemaan

lineaariregulaattorin lähtöjännitteen ajautumisena säätöalueen yläpään. Tuotettu jännite jää tavoitearvosta enemmän, kuin mitä lineaariregulaattori pystyy kompensoimaan.

Mittaussignaalien kohina

Vaihtomuotoinen kohina ei suoraan aiheuta mittaustarkkuuden heikkenemistä, koska sen vaikutusta voidaan pienentää keskiarvoistuksella ja suodatuksella. Suodatus ja keskiarvoistus puolestaan pienentävät suurinta mahdollista säätönopeutta halutulla mittaustarkkuudella. Todelliseksi ongelmaksi kohina voi muodostua, jos se tasasuuntautuu ja muodostaa epämääräistä *offset*-jännitettä.

Piirilevysuunnittelussa tulisi ottaa huomioon, että eri metallien liitoskohtiin muodostuu lämpötilasta riippuva jännite. Jotta tämä jännite ei häiritse, differentiaalisesti mitattavien tarkkuus-signaalien johdatukset tulee tehdä samalla tavalla liitoksien lukumäärien suhteen. (15; 14 s. 22.)

Lineaariregulaattorin lähtöjännitteessä havaittiin pienitaajuisia kohinaa. Kohinan amplitudi oli lähdössä useita voltteja. Sen pienien taajuuksien jakso on noin sekunti, joten sen suodattaminen aiheuttaisi säätönopeuden liiallisen hidastumisen. Tasajännitemittauksessa jännite näyttää riittävän tarkalta. Heilahtelu havaittiin merkityksellisessä määrin ainoastaan oskilloskoopilla.

Kohinan lähteelle pääteltiin kaksi vaihtoehtoa. Todennäköisin lähde on komparaattorina toimiva operaatiovahvistin, jonka jännitevahvistus on suuri. Myös optoisolaattoria epäiltiin mahdolliseksi lähteeksi. Kohina saatiin pienennettyä muutama sata millivolttiin lineaarisäätöä hidastamalla ja optoisolaattorin toimintapistettä muuttamalla. (16.)

4.6 Laitteen digitaalelektronikka

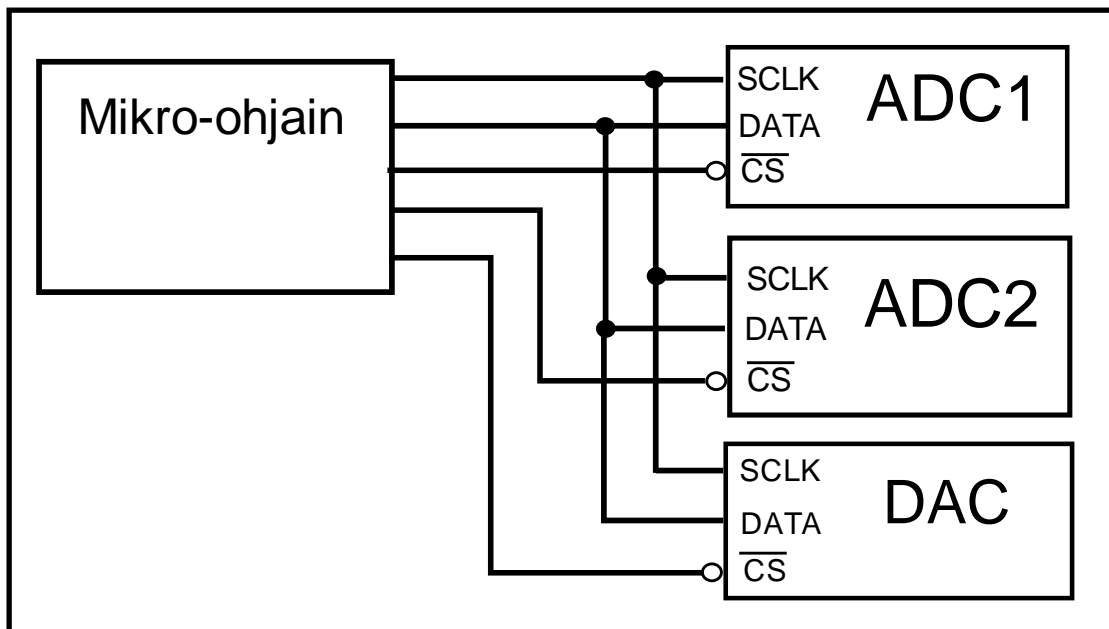
Laitteen mikro-ohjaimena käytettiin Microchipin PIC-16f886 mikro-ohjainta (21). Mikro-ohjaimen päätehtävänä on toteuttaa käyttörajapinta käyttäjän ja laitteen välille. Lisäksi mikrokontrolleri ohjaa lähteen hakkuriosuutta kahdella pulssinleveyyssignaalilla sekä operoi AD- ja DA -muuntimia.

Käytännön testeissä kävi ilmi, että C-kielessä käytettävän *float*-liukuluvun tarkkuus ei riittänyt 22-bittisten AD-muuntimen arvojen skaalaukseen ilman mitatun arvon tarkkuuden huononemista, jolloin täytyi käyttää *double*-liukulukua laskuoperointeja varten.

Liukulukuoperoinneista puolestaan nousi muita ongelmia. Mikro-ohjain ei sisällä liukulukuyksikköä, ja mikro-ohjaimen suoritin on vain 8-bittinen. Näin liukulukujen käyttö vie suorittimelta huomattavan paljon laskenta-aikaa sekä yli puolet mikro-ohjaimen ohjelmamuistista. AD- ja DA -muuntimien arvojen skaalaukset toteutettiin pelkästään kokonaislukuihin perustuvalla laskennalla (esimerkkikoodi 1), koska muuten laite toimisi hitaasti ja mikro-ohjaimen muisti olisi käytännössä täynnä.

```
int32_t D_to_uV(int32_t D, int32_t dvolt)
{
    // D = raaka digitaaliarvo,
    // dVOLT= muuntimen arvo, joka vastaa 1V jännitettä
    int32_t i;
    int32_t uV=0 ;
    D*=10 ;
    for(i=1000000L; i>10; i/=10)
    {
        uV+= D/(dvolt/(1000000L/i))*i ;
        D=D%(dvolt/(1000000/i)) ;
    }
    uV/=10;
    return uV ;
}
```

Esimerkkikoodi 1. Funktio, joka muuttaa 22-bittisen AD-muuntimen raaka-arvon mikrovolteiksi käyttämällä 32-bittisiä kokonaislukuja ilman lukualueen ylivuotamista.



Kuva 13. Ulkoisten muunninpiirien tiedonsiirtokytKentä. CS-kanavalla voidaan aktivoida piirin vastaanotto/lähetys siten, että mikropiiri kommunikoi yhden piirin kanssa kerrallaan.

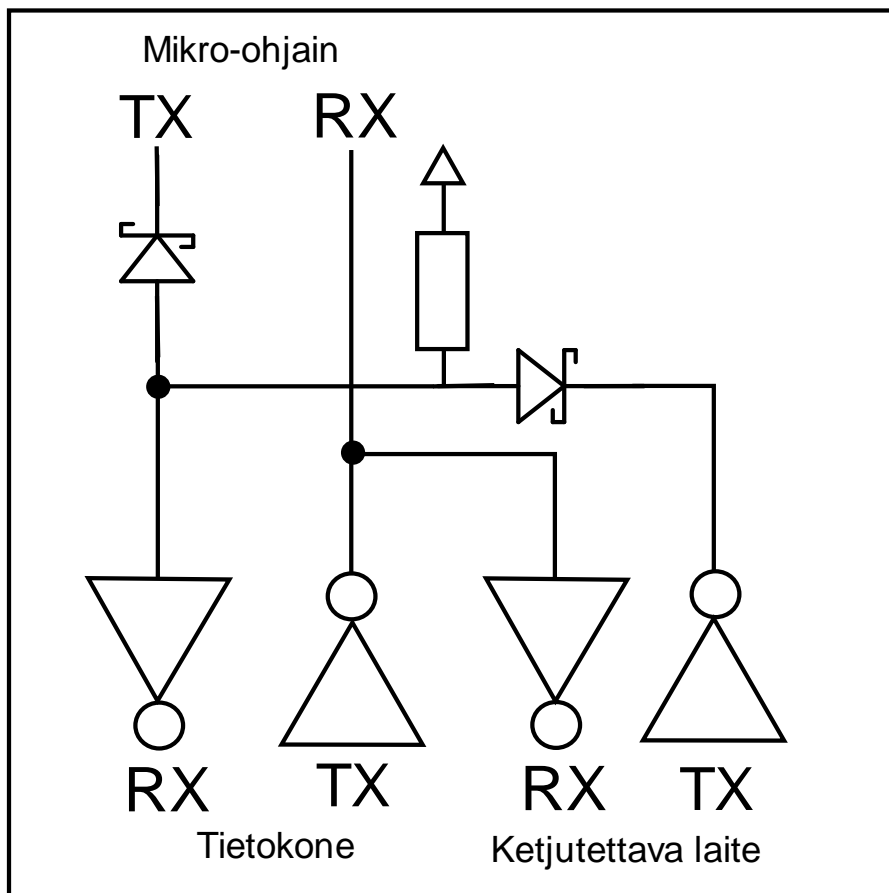
AD- ja DA -muuntimet kytkettiin samaan data- ja kellolinjaan siten, että molemmilla piireillä oli omat CS (*chip select*) -linjansa kommunikoitavan piirin valitsemiseksi (kuva 13). Mikro-ohjaimen kirjoitettiin ajurit AD- ja DA -muuntimille, LCD-näytölle sekä sarjaportin toiminnalle. AD-muuntimena käytettiin differentiaalista Microchipin mcp3551-piiriä (14). Se on 22-bittinen *delta-sigma*-toiminen muunnin, jonka tekemä muunnos luetaan piiriltä synkronisella sarjaväylällä.

DA-muuntimena käytettiin Texas Instrumentsin DAC1220E-piiriä (22). Käytännön koeksissa kävi ilmi, että muunnin kykenee tuottamaan pienimmillään ainoastaan 1 mV:n jännitteen maan suhteen. Sama ilmeni myös valmistajan datalehdessä, jossa luvataan oikeanmukaista toimintaa vasta 20 mV:n päässä käyttöjännitteestä ja maatasosta. Koska jännitelähteen pienimmän asetusarvon tulisi olla noin 50 μ V nollatason yläpuolella 1 mV:n rajoitus mittausalueen alareunalla on aivan liian suuri, joten tuotettu nollapiste ei voi sijaita asetusalueen reunalla. DA-muunnin tarvitsee 2,5 V:n referenssijännitteen. Referenssijännitteen tarkkuuden on oltava 1 % vastaavan absoluuttisen tarkkuuden saavuttamiseksi. Työssä 2,5 V:n referenssinä käytettiin Analog Devicesin REF192GSZ-referenssipiiriä (23).

Digitaalielektronikalle on ominaista nopea pulssittainen virran kulutuksen vaihtelu, joka häiritsee helposti analogiaelektronikkaa. Tämän takia analogisten komponenttien käyttöjännitteet tuotetaan eri regulaattoreilla kuin digitaalielektronikan, sekä virtojen paluulenkit toteutetaan eri johtimilla.

Usean laitteen käyttö samasta sarjaportista

Usean jännitelähteen kytkemiseksi samaan sarjaporttiin yhdistettiin kahden laitteen lähetyiskanavat *schottky*-diodeilla (kuva 14). Tämän lisäksi kommunikaatioprotokollan vaatimuksena on, että kaksi ketjutettua laitetta eivät päädy lähettämään samanaikaisesti. Tämä on toteutettavissa esimerkiksi *Master-Slave*-hierarkialla siten, että kaikki orjalaitteet ovat hiljaa, kunnes isäntä lähettää osoitetun pyynnön tai komennon kyseiselle laitteelle.



Kuva 14. Diodikytkentä sarjalaitteiden ketjutukseen (15). Tietokoneesta tuleva lähetys välitetään sellaisenaan ketjutettavalle laitteelle. Mikro-ohjaimen ja ketjutettavan laitteen paluuliikenne yhdistetään ylösvetovastuksella ja diodeilla.

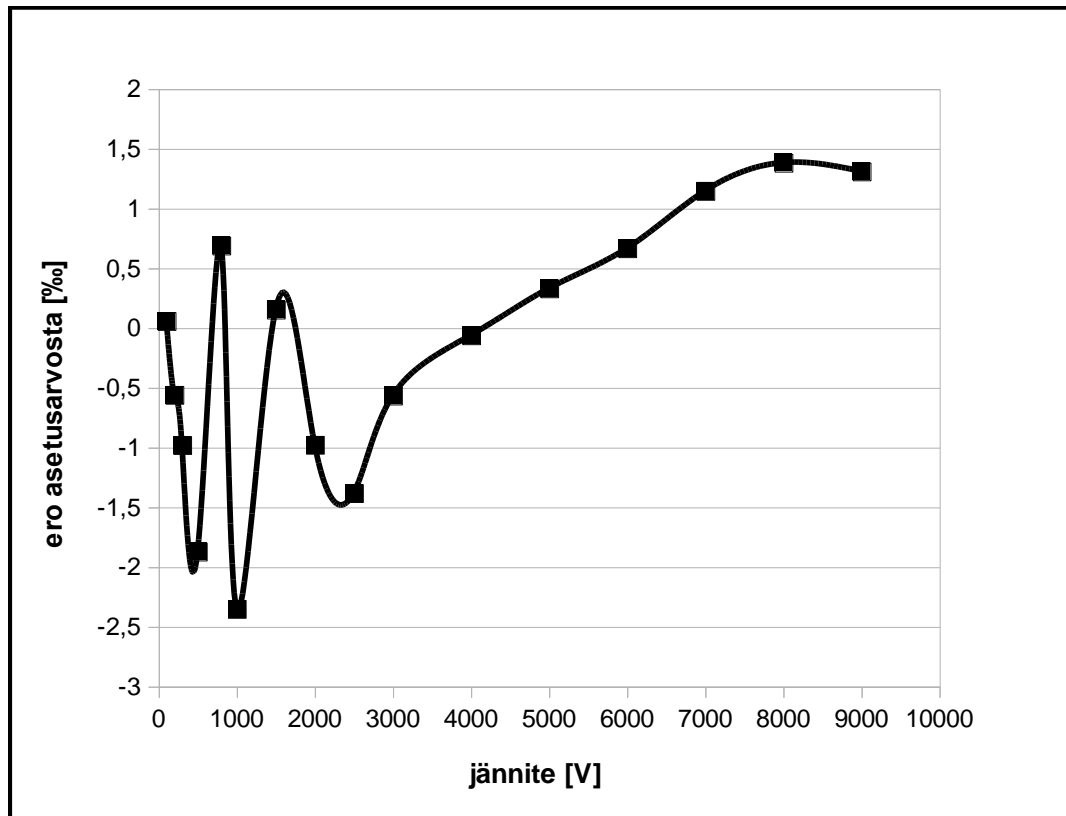
Tietokoneen maataso sisältää paljon erilaisia häiriökomponentteja. Jotta nämä potentiaaliset häiriösignaalit eivät häiritsisi jännitelähteen toimintaa, laitteen maataso kytkettiin tietokoneen maatasoon vastuksen kautta. Tämä mahdollistaa maatasojen jännitteiden pienen vaihtelun ilman, että laitteiden välille syntyy merkittäviä häiriövirtoja.

AD-muunnin tarvitsee ulkoisen kellosignaalin tai kiteen. Alkuperäisenä suunnitelmana oli ottaa AD-muuntimen tarvitsema kellosignaali mikro-ohjaimesta. Koska analogikomponenttien maa ei ole vahvasti sidottuna digitaalikomponenttien maahan päädyttiin laittamaan AD-muuntimelle oma tahdistuskide ulkoisen kellon sijaan. Näin erilaiset jännitepiikit maatasojen välillä eivät aiheuta vahinkoa kellosignaalinjan kautta.

4.7 Korkeajännitelähteen fyysinen toteutus.

Laitteesta haluttiin pienikokoinen, ja sitä varten suunniteltiin piirilevy. Piirilevystä rakennettiin 2 koekappaletta, joiden avulla suuri osa käytännön ongelmista ja suunnitteluvirheistä on korjattu. Koekappaleiden piirilevyt jyrssiin Metropolian piirilevyjyrssimellä.

Laitteen kytkentäkaavion suunnittelussa käytettiin avoimeen lähdekoodiin perustuvaa Gschem kytkentäkaavionpiirto-ohjelmaa. Ohjelma kuuluu gEDA (GPL Electronic Design Automation) ohjelmistopakettiin, joka sisältää avoimeen lähdekoodiin perustuvat työkalut piirilevyjen suunnitteluun. Piirilevy-suunnittelu tehtiin samaan ohjelmistopakettiin kuuluvalla PCB piirilevy-suunnitteluohjelmalla. PCB kykenee tuottamaan piirilevy-tiedoston RS-274X (Gerber) muodossa, jonka avulla suunnitellun piirilevyn voi jyrssiä itse tai valmistuttaa piirilevyvalmistajalla. (24; 25.)

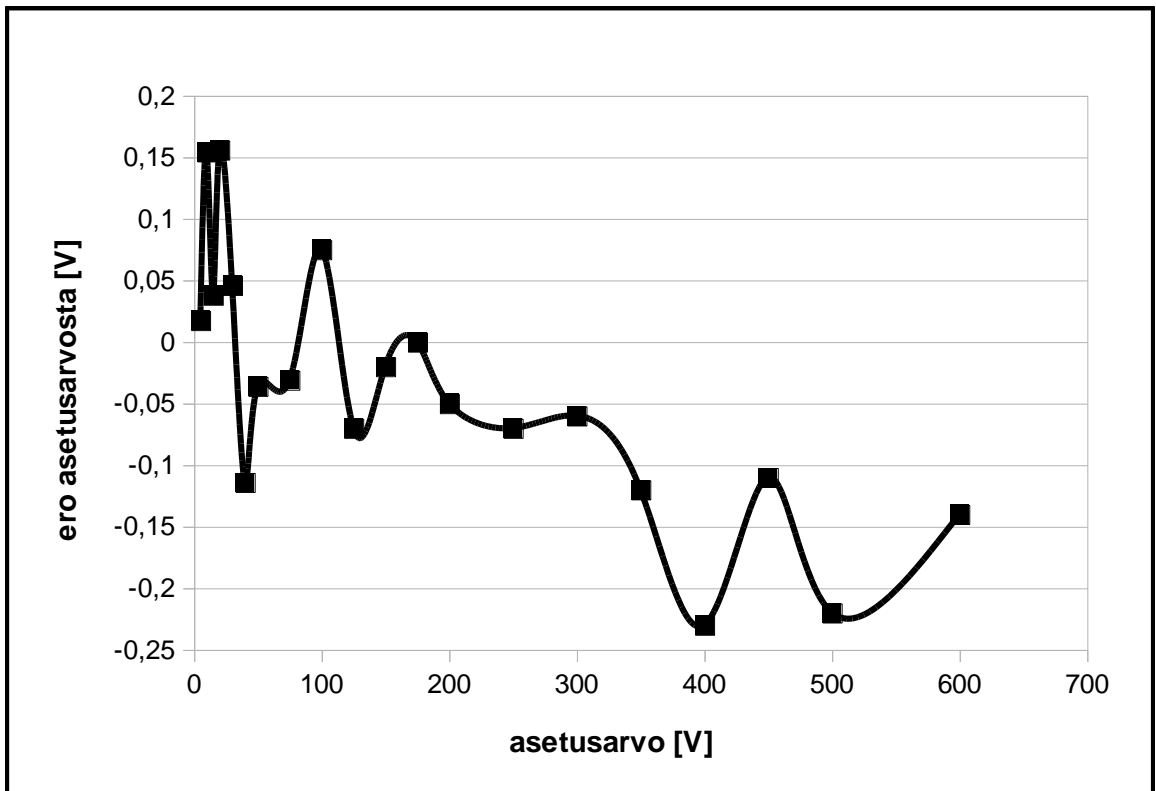


Kuva 15. Korkeajännitelähteen lähtöjännitteen lineaarisuus. Pystyakselilla ero asetustarvosta promilleina. Vaaka-akselilla jännite voltteina.

Käytetyt korkeajännitevastukset toimivat mittauksissa huomattavasti lineaarisemmin kuin datalehdessä luvataan. Kuvasta 15 näkyy, kuinka rakennetussa laitteessa käytetyn vastuksen vastusarvo muuttuu lähes lineaarisesti lähtöjännitteen suhteen. Alle 2 kV:n jännitteillä mitattu jännite heittelee mittauksessa tapahtuvan suhteellisen kohinan kasvaessa.

Laitteen tarkkuus on hyvin lähellä tavoiteltua. Rakennettu jännitelähde kykenee tuottamaan yli 100 V:n jännitteet paremmalla kuin 2 ‰:n absoluuttisella virheellä. Alle 100 V:n jännitteet tuotetaan pienemmällä kuin 200 mV:n virheellä. Jännitelähteen suhteellinen säätökyky on huomattavasti absoluuttista mittaustarkkuutta parempi.

Jännitelähteessä käytetyn vastuksen epälineaarisuus on noin 0,3 ppm/V luokkaa. Kuvasta 16 näkyy jännitelähteen jännitteen vaihtelu pienillä jännitteillä. Alle 300 V:n jännitteillä laitteen lähdön jännite vaihtelee vähemmän kuin 200 mV.



Kuva 16. Jännitelähteen tuottaman jännitteen ero asetusravosta pienillä jänniteillä. Pystyakselilla ero asetusravosta voltteina. Vaaka-akselilla asetettu jännite voltteina.

5 Korkeajännitelähde tulevaisuudessa

Korkeajännitelähdettä voidaan käyttää DMA:n sähkökenttien luomiseen ja erilaisiin muihin käyttötarkoituksiin, joissa tarvitaan helposti tietokoneesta ohjattavissa olevaa pientehoista korkeajännitelähdettä.

Laitetta voisi yleisesti parantaa yksinkertaistamalla. Shunttiregulaattorin +40...-40V käyttöjännitteiden luomiseksi voidaan käyttää valmista jännitepumppupiiriä, *step-up*-hakkuria tai muuntajaa. Tässä työssä jännitteenkertojaan pohjautuva ratkaisu sisältää turhan paljon komponentteja eikä edes tuota täyttä suunniteltua jännitettä. Ratkaisu tarvitsee lisäksi kellosignaalin mikro-ohjaimelta. Kellosignaalin tuottaminen mikro-ohjaimesta monimutkaistaa turhan paljon ohjelmakoodia.

Pulssinleveyssignaalin resoluutiota parantamalla voisi hakkuriosan ohjauksen tarkkuutta parantaa. Mikro-ohjaimen pulssinleveyssignaalit perustuvat mikro-ohjaimen kellosignaalilla toimivaan laskuriin. Mikro-ohjaimen kellotaajuutta kasvattamalla myös pulssinleveyssignaalin resoluutio paranisi. Käytetyn mikro-ohjaimen kellotaajuutta voitaisiin kasvattaa käyttämällä ulkoista tahdistuskidettä, piirin sisäisen 8 MHz:n oskillaattorin sijaan.

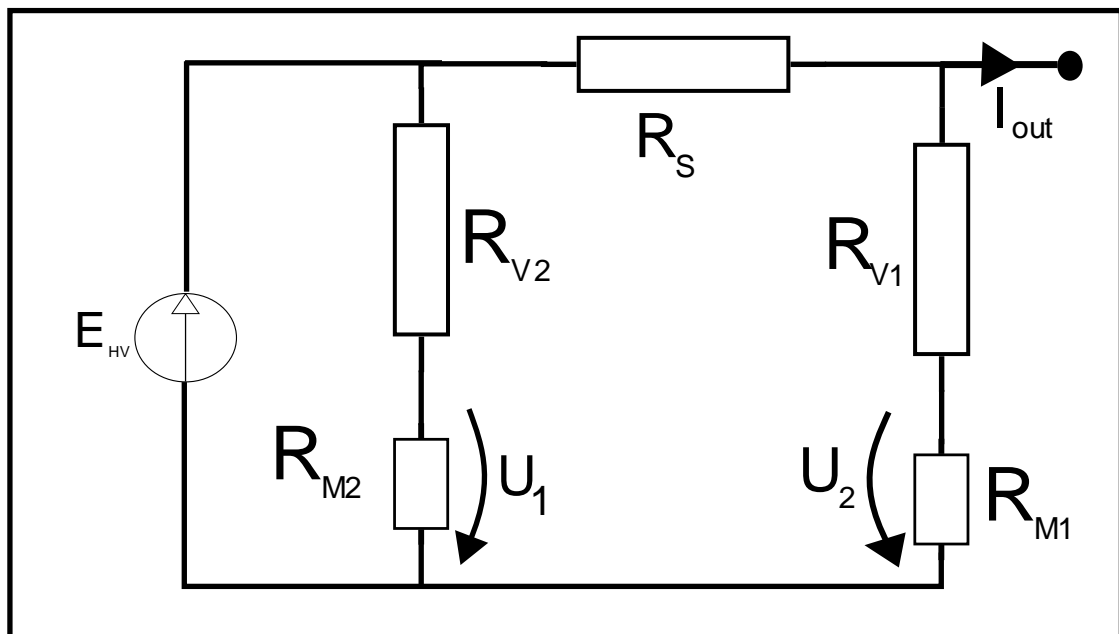
Mikro-ohjaimen pulssileveyssignaalit perustuvat yhteen piiriltä löytyvistä laskureista. Jaetun laskurin takia molempien pulssisignaalien pulssitaajuus on aina sama. Laitteeseen voitaisiin vaihtaa mikro-ohjain, jonka pulssinleveyssignaalit luodaan eri laskureilla. Itsenäiset pulssitaajuudet voitaisiin asettaa siten, että *step-down*-hakkuri toimisi pienemmällä taajuudella, mahdollistaen suuremman resoluution samalla prosessorin kellotaajuudella.

Tässä työssä käytettiin korkeajännitelähteenä kylmäkatodiloisteputkien teholähteisiin suunniteltua korkeajännitemuuntajaa. Se on suunniteltu toimimaan resonanssissa ja sen ensiön induktanssi on suhteellisen pieni. Tästä seuraa, että ensiön läpi kulkeva hetkellinen virta on suuri, ja se puolestaan synnyttää potentiaalisen magneettisen häiriön lähellä toimiville tarkkuusmittauksille. Pienemmällä taajuudella, suuremmalla induktanssilla ja pienemmällä virralla toimivan korkeajännitemuuntajan käyttö vähentäisi potentiaalisten häiriöiden määrää laitteessa.

Kirchoffin virtalain mukaan kaikki virta, joka syötetään jännitteenkertojaan, tulee sieltä pois muita reittejä (26 s. 5). Virran mittaus voitaisiin siis toteuttaa mittaamalla jännitteenkertojaan syötettävää pulssittaista virtaa esimerkiksi yksittäisen kertojan kondensaattorin jännitettä mittaamalla ja laskemalla siitä keskiarvoa.

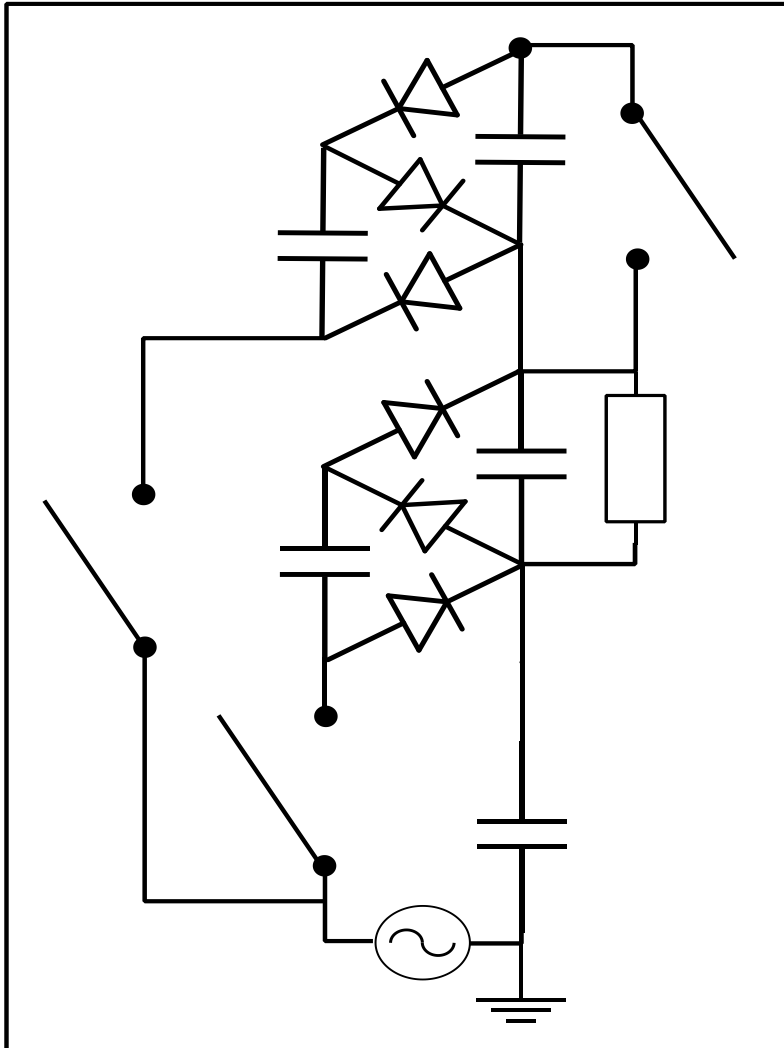
Korkeajännitesovelluksissa yksi selkeä vaaratekijä on kytkemättömät maalenkit. Mikäli kohdelaitteen maa jää kokonaan kytkemättä, voi liitetyn laitteen kuori varautua ja aiheuttaa sähköiskuja, vaaraa ihmisille ja rikkoa laitteita. Korkeajännitelähteeseen voidaan tehdä kytkentä, joka syöttää pientä virtaa korkeajännitejohdon nollajohtoon. Syötetyn virran avulla jännitelähde kykenee tunnistamaan, mikäli nollajohdin ei ole ulkoisesti kytkettynä maahan. Korkeajännitelähde tuottaisi jännitettä ainoastaan siinä tilanteessa, että sen korkeajännitejohdon maa olisi ulkoisesti kytkettynä maahan.

Virran mittausta varten jännitelähteeseen voitaisiin lisätä toinen jännitteenjako (kuva 17: R_{V2} R_{M2}), jolla mitattaisiin jännitettä virranrajoitusvastuksen (R_S) toiselta puolelta. Näiden kahden jännitteen erotuksesta voitaisiin laskea lähtöön kulkeva virta.



Kuva 17. Virran mittaus kahdella jännitteenjakoilla. Lähtövirta voidaan laskea kun vastuksen R_S sekä R_{V1} yli jäävät jännitteet tunnetaan.

Jännitelähteestä on mahdollista muokata bipolaarinen. Jännitelähde kykenisi tuottamaan sekä negatiivista että positiivista jännitettä. Tämä voitaisiin toteuttaa käyttämällä korkeajännitereleitä ja kahta vastakkaismerkkistä jännitteenkertojaa (kuva 18) päällekkäin. Näin releillä voitaisiin mitätöidä toisen jännitteenkertojan vaikutus, ja luoda molempien polariteettien jännitteet samalla laitteella.



Kuva 18. Kytkimillä tai releillä valittava polariteetti. Kytkentä tarvitsisi kaksi relettä, jotka kestävät jännitelähteen tuottaman täyden jännitteen, sekä yhden releen, joka kestänee syötetyn vaihtojännitteen amplitudin.

6 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä suunniteltiin ja rakennettiin 10 kV:n säädettävä tarkkuusjännitelähde aerosolimittauksiin. Lisäksi insinööriyössä tutkittiin jännitteen mittauksen luotettavuuteen liittyviä tekijöitä korkeilla jännitteillä. Laitteelle suunniteltiin piirilevy useiden kappaleiden rakentamiseksi laboratorionkäyttöön. Laitteelle ei ole tehty sähkömagneettisen yhteensopivuuden testausta.

Rakennetun korkeajännitelähteen lähtöjännitteen epätarkkuudeksi mitattiin 200 mV asetusarvosta alle 100 V:n jännitteillä ja 2 ‰ asetusarvosta yli 100 V:n jännitteillä. Jännitelähde sisältää mikro-ohjaimen, hakkurijännitelähteen ja lineaariregulaattorin. Jännitelähdettä voidaan ohjata tietokoneesta sarjaportin (RS232) kautta. Useaa jännitelähdettä voidaan ohjata samasta sarjaportista. Laite mittaa ja tuottaa pieniä jännitteitä jotka ovat pienimmillään kymmeniä mikrovoltteja.

Aerosolihiukkasten pitkäaikaiset mittaukset ovat tärkeitä ilmasto- ja terveysvaikutusten selvittämiseksi. Tässä työssä suunniteltu korkeajännitelähde liittyy pitkäaikaisten aerosolimittausten toteuttamiseen sekä aerosolihiukkasten kokojakauman tarkkaan ja luotettavaan mittaamiseen.

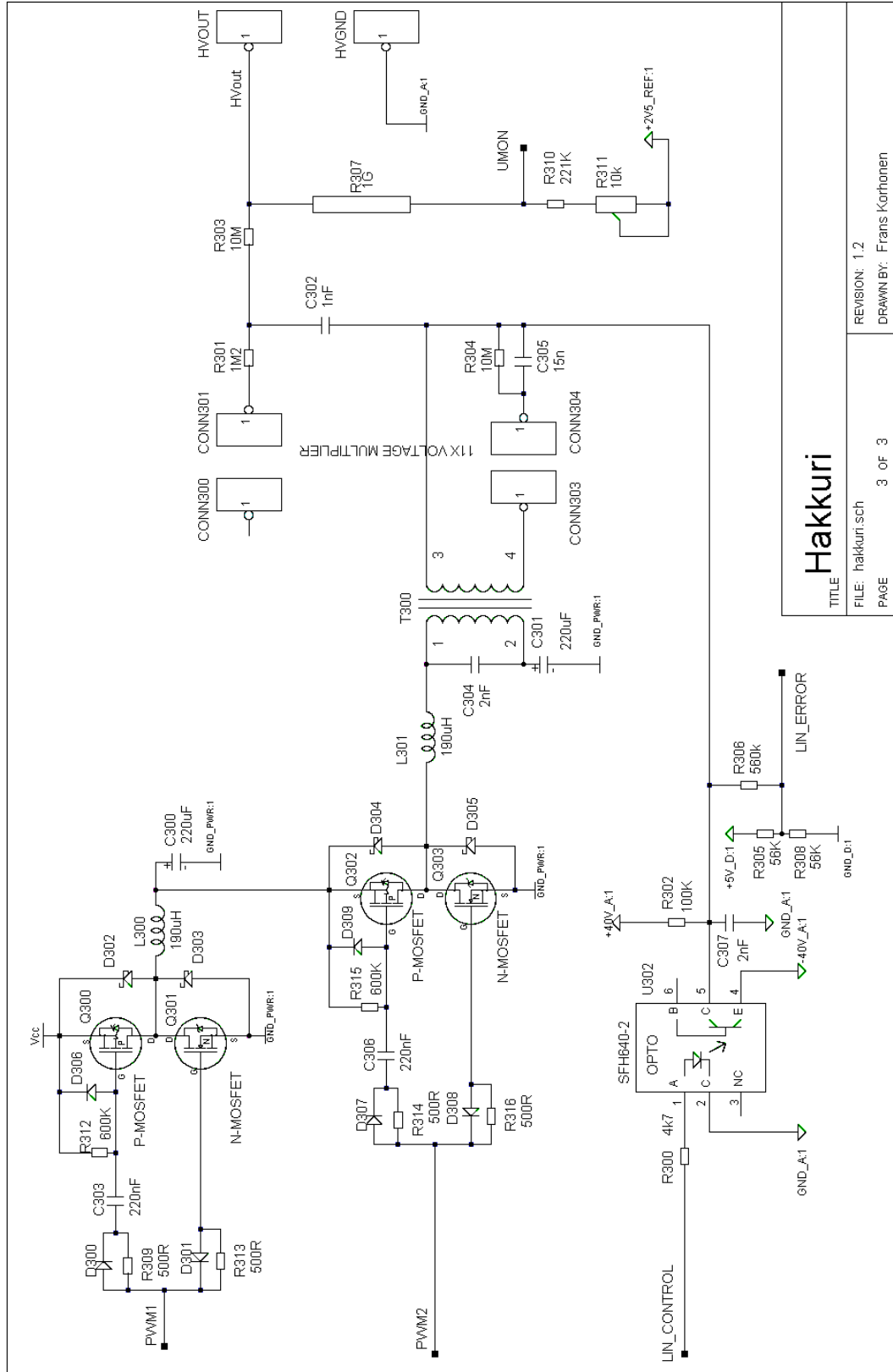
Suunniteltu jännitelähde soveltuu käytettäväksi aerosolihiukkasten kokojakaumamittauksiin laajan lähtöjännitealueen ja tarkan ohjattavuuden avulla. Erityisesti digitaalinen ohjaus ja toiminta pienillä jännitteillä ovat toivottuja korkeajännitelähteen ominaisuuksia. Jatkossa rakennetun korkeajännitelähteen toimintaa, kestävyyttä ja soveltuvuutta on tärkeää testata käytännön mittauksissa.

Lähteet

- 1 Jokinen, Vilho. 1995. Aerosolihiukkasten ja ilman ionien mittaaminen differentiaalisella liikkuvuusanalysointilaitteella. Helsinki: Aerosolitutkimusseura ry.
- 2 Winklmayr et al. 1991. A New Electromobility Spectrometer for the Measurement of Aerosol Size Distributions in the Size Range from 1 to 1000 nm. J. Aerosol Sci. Vol. 22. s.289-296
- 3 Kulmala et al. 2012. Measurement of the nucleation of atmospheric aerosol particles. Nature protocols. Vol. 7. No. 9. s.1651-1667.
- 4 Kulmala et al. 2013. Direct Observations of Atmospheric Aerosol Nucleation. Science 339. s. 943.
- 5 Kulmala et al. 2004. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations. J. Aerosol Sci., 35, s. 143-176.
- 6 Sähköturvallisuus fysiikan demonstraatioissa. Fysikaalisten tieteiden laitos. <<http://www.courses.physics.helsinki.fi/opelab/turva/sahkoturva.htm>> Luettu 12.8.2012.
- 7 Heikkilä, Jani. 2009. Tutkintotyö. Sähköturvallisuus ja sähköturvallisuuden oma-arviointi. Tampere: TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU <<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201003064540>>
- 8 VOLTAGE COEFFICIENT OF RESISTANCE APPLICATION NOTE verkkodokumentti <http://www.barthelectronics.com/pdf_files/Application%20note%201%20Voltage%20Coefficient%20Products_Pulse%20Page.pdf> Luettu 14.11.2012
- 9 Birkett, M. 2007. VCR Characteristics of High Voltage Thick Film Resistors Verkkodokumentti. TT electronics <<http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/tt-electronics-welwyn-985/pdf/tt-electronics-vcr-characteristics-high-voltage.pdf>> Luettu 14.11.2012
- 10 Mayerhoff, Evan 2007. Voltage Coefficient Issues in High Voltage Applications. Verkoartikkeli. High Voltage Connection Inc. <<http://www.highvoltageconnection.com/articles/voltage-coefficient-high-voltage.html>> Luettu 14.5.2012.
- 11 Slim-Mox Data Sheet. Datalehti. Ohmite. <<http://www.farnell.com/datasheets/1571285.pdf>> Luettu 14.11.2012

- 12 LT6656 1uA Precision Series Voltage Reference Datasheet. Datalehti. LinearTechnology Corporation <<http://www.farnell.com/datasheets/1383699.pdf>> Luettu 14.11
- 13 Floyd, Thomas L. 2008. EIGHT EDITION Electronic Devices Convectional Current Version. New Jersey: Pearson Prentice Hall
- 14 MCP3550/1/3 Low-Power, Single-Channel 22-Bit Delta-Sigma ADCs Data Sheet. 2009. Datalehti. Microchip. <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21950e.pdf>> Luettu 14.11.2012
- 15 Siivola, Erkki. 2012. Laboratorioinsinööri, Ilmakehätieteiden osasto, Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto. keskustelut 24.4.2012-23.1.2013.
- 16 TLC2652AC-8D Advancen linCMOS PRECISION CHOPPER-STABILIZED OPERATIONAL AMPLIFIERS Data Sheet. 2005. Datalehti. Texas Instruments.< <http://www.farnell.com/datasheets/1447260.pdf>> Luettu 14.11.2012
- 17 TEKNIIKAN KAAVASTO 2008.Tampere: Tammertekniikka/Amk Kustannus Oy
- 18 Sedra. Smith. 1998. Microelectronic Circuits FOURTH EDITION New York: Oxford University Press.
- 19 CCFL Transformer Application Note. 2008. Verkkodokumentti. Coiltronics. <http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Coiltronics_513/PDF/Coiltronics_4035.pdf> Luettu 8.1.2013
- 20 McClusky, Scott Logan. 2010. HIGH VOLTAGE RESONANT SELF-TRACKING CURRENT-FED CONVERTER. San Luis Obispo. Faculty of California Polytechnic State University <<http://digitalcommons.calpoly.edu/theses/254/>>. luettu 10.1.2013
- 21 PIC16F882/883/884/886/887 Data Sheet. 2009. Datalehti. Microchip. <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41291F.pdf>> Luettu 07.08.2012
- 22 DAC1220 20-Bit, Low-Power Digital-to-Analog Converter Data Sheet. 2009. Datalehti. Texas Instruments. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac1220.pdf>> Luettu 14.1.1.2012
- 23 Precision Micropower, Low Dropout Voltage References Data Sheet REF19x Series. 2011. Datalehti. Analog Devices Datalehti. <<http://www.farnell.com/datasheets/1506113.pdf>> Luettu 14.11.2012
- 24 gEDA Project's Homepage. Kotisivu. <<http://www.geda-project.org/>> Luettu 24.10.2012

- 25 PCB: Printed Circuit Board Editor. Kotisivu. <<http://pcb.geda-project.org/>> Luettu 24.10.2012
- 26 MANUAL OF ENGINEERING INFORMATION.1965. Verkkokopio. Ohmite Mfg.Co <<http://www.ohmite.com/techdata/engineering-info.pdf>> Luettu 5.7.2012.



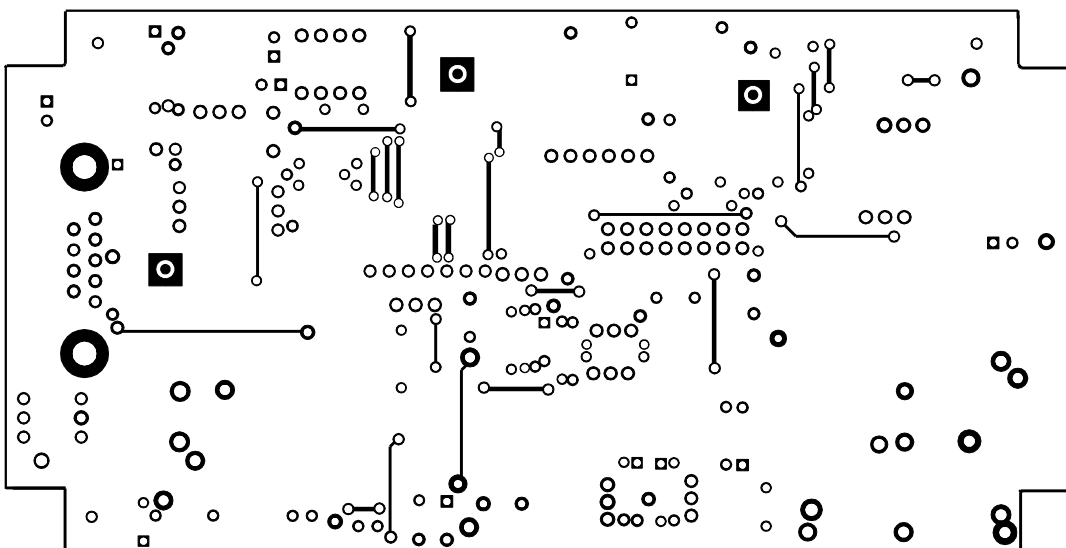
Hakkuri

TITLE: hakkuri.sch
 FILE: hakkuri.sch
 PAGE: 3 of 3
 REVISION: 1.2
 DRAWN BY: Frans Korhonen

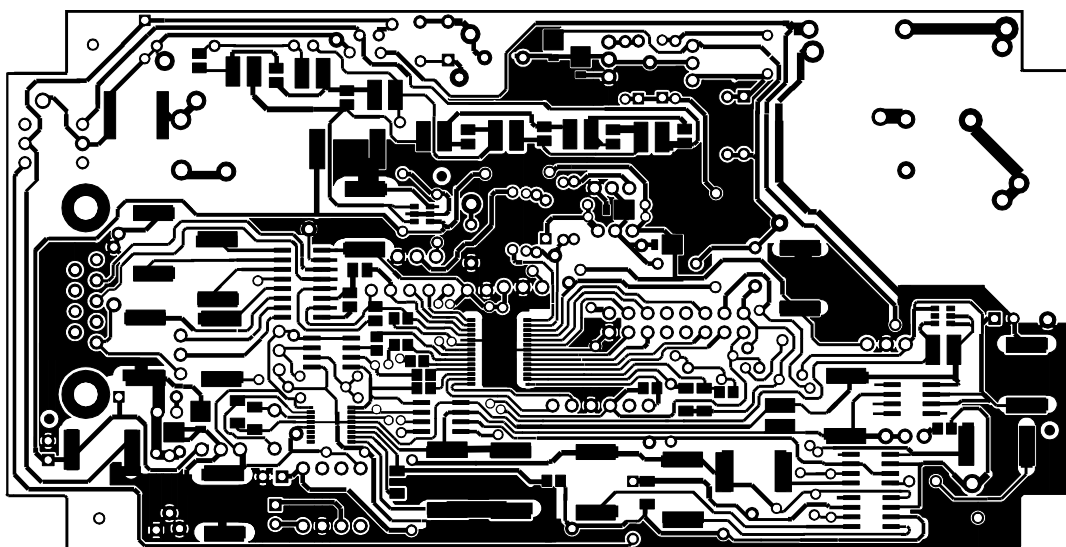
Piirilevykuvat

Suunnitellun korkeajännitelähteen piirilevykuvat. Ensimmäisellä sivulla ovat molempien puolien kuparivedot. Toisella sivulla komponenttien paikat.

Piirilevyn yläpuoli



Piirilevyn alapuoli



Osaluettelo

Suunnitellun korkeajännitelähteen osaluettelo. Sisältää myös useimpien komponenttien tilauskoodit Farnellilta.

merkintä	arvo	jalanjälki	malli	farnell koodi	kpl
U103		dip8	ICL7660CPAZ	1018170	1
U102		TO92	TL750L08CLPE3	1236542	1
U104		SOT236	ZXGD3003E6TA	1549140	1
U105		SOIC8		9605207	1
R100	30R	RTH8mm		1357856	1
D106,D107		DTH10mm	1N4007-T	1843698	2
CONN100		HEADER_2_1			1
U100,U101		TO92	LM78L05ACZX	1467367	2
U106		TSOT23	LT6656BCS6-5#TRMPBF	1839091	1
D100,D101,D102, D103,D104,D105, D109		SOD323	1N4148WS-V-GS18	1612348	7
R101	fuse	RTH8mm		1357856	1
Q100		TO92	BC547B	1574381	1
R102	56K	RTH8mm		1357856	1
C107,C108,C111, C112,C114,C115, C116,C117,C120	1uF	TANTAL_CASE_B	T491B105K050AT	1793904	9
C106,C109,C110, C113,C119,C121	10uF	CPTH2_5mm			6
U202		SSOP28	PIC16F886-I/SS	1439540	1
U200,U203		SOIC8	TLC2652AC-8D	8454124	2
C101,C103,C105, C118,C200,C201, C202,C203	100nF	2824	SMDTC03100TA00KQ00	1005965	8
C204,C205	10n	2824	SMDTD02100TA00KQ00	1005961	2
U204		SSOP16	DAC1220E	1097447	1
X200	2.5Mhz	xtalTH	HC49U-2.4576-20-50-60-30-ATF	1666946	1
C207,C208	12p	1206	C1206C120J5GACTU	1650892	2
C211	68nF	2824	SMDTD02680TA00KQ00	1005963	1
C100,C102,C104, C209,C210,C212	300n	2824	MMC7.3334K63K35TR12	1753079	6
R211	220R	RTH8mm		1357856	1
U201,U205		SOIC8	MCP3551-E/SN	1084625	2
CONN201,CONN202		HEADER_3_1			2
CONN203		D9F	8LCM009S-304B-XX	1099294	1

R203	opt	RTH8mm		1357863	1
Q200		HEADER_16_2_MIRROR	PC1602ARU-HWB-G-Q	1671498	1
U206		SOIC16	ST3232BDR	1467752	1
R209,R210	50K	RTH8mm			2
R200	3k3	RTH8mm		1357863	1
R201	220R	RTH12mm			1
R213	1M	RTH8mm			1
CONN200		HEADER_7_1			1
D200,D201,D202		SOD323	1PS76SB10	1081179	3
ICSP200		HEADER_6_1			1
R202	10k	0805	MCPWR05FTEW1002	1887308	1
R103,R214	10k	RTH8mm			2
C206,C213,C214, C215	3n3	1206	ECHU1H332GX5	9695303	4
R204,R205,R206, R207,R208,R212, R217,R215	5k	0805	ERJP06F5601V	1750764	8
R310	221K	0805	MCTC0525B2213T5E	1576053	1
R311	10k	67W	67WR10KLF	1703794	1
R307	1G	RTH48mm	SM108031007FE	1550788	1
C302	1nF	CTH13mm	DHR4E4C102K2FB	1823314	1
R305,R308	56K	RTH8mm		1565319	2
U302		DIP6	SFH640-2	1045396	1
R301	1M2	rth18mm	MGRF1WJ0125A10	1357949	1
R306,R312,R315, R309,R313,R314, R316	560k	RTH8mm			7
R302	100K	RTH8mm			1
R300	4k7	RTH8mm			1
C300,C301	220uF	CPTH5mm	MCGPR50V227M10X1 6	9451420	2
CONN300,CONN301, CONN303,CONN304, HVGND,HVOUT		HEADER_1_1			6
T300		hv_muuntaja_custom	CTX210603-R	2075579	1
D108,D110,D302, D303,D304,D305		SMP	SS3P5-M3/84A	1812493	6
C305	15n	2225	2225HC153KAT1A	1789489	1
L300,L301	190uH	LTH5mm	ELC10D181E	1749071	2
Q300,Q301,Q302, Q303		VPAK			4
C216,C217,C303, C306	220nF	CTH5mm			4
D300,D301,D306, D307, D308,D309		DTH7_6mm			6
R303,R304	10M	rth18mm	MGRF1WJ0125A10	1357961	2
C304,C307	2nF	CTH5mm			2