

Joonas Laitinen

Sähkömagneettiset häiriöt ja tehonsyötön tasaisuus äänentoistolaitteiden käytössä

Opinnäytetyö
Sähkö- ja automaatiotekniikka

2020



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Joonas Laitinen	Insinööri (AMK)	Joulukuu 2020
Opinnäytetyön nimi Sähkömagneettiset häiriöt ja tehonsyötön tasaisuus äänentoistolaitteiden käytössä		60 sivua 1 liitesivu
Toimeksiantaja HTL-Records		
Ohjaaja Harri Kosonen		
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia ja selventää ääntentoistolaitteiden sähkömagneettisiin häiriöihin ja tehonsyötön tasaisuuteen liittyviä ilmiöitä toimeksiantajalle, ratkaista studion äänentoisto- ja tallennuslaitteiden häiriöt, kehittää, ja mikäli mahdollista, rakentaa erillinen liikuteltavissa oleva apulaite, jolla voidaan taata häiriötön ja laadukas äänentoisto ympäristöstä riippumatta. Tutkimuksen oli tarkoitus olla kokonaisuus, jonka avulla toimeksiantaja ymmärtää yleisimmät häiriöiden aiheuttajat ja niiden estämiseen tarvittavat toimenpiteet.</p> <p>Työssä tutustuttiin jo olemassa olevaan lähdeaineistoon ja käytettävissä olevaan laitteistoon sekä tarjolla oleviin tuotteisiin. Perehtymällä sähkömagneettisten häiriöiden aiheuttajiin ja teoriaan sekä tekemällä testauksia saatiin hahmotettua ratkaisu toimeksiantajan studion häiriöille.</p> <p>Studion häiriöt johtuivat efektipedaalin virransyötön viallisesta muuntajasta, joka aiheutti koko äänentoistolaitteistossa selkeästi kuultavissa olevaa hurinaa. Kun paikallistetun muuntajan tilalle vaihdettiin uusi, ongelma poistui. Apulaitteen prototyyppi saatiin kehitettyä teoriapohjaisesti, mutta rakentamisen ei todettu olevan kannattavaa tämän opinnäytetyön yhteydessä, koska markkinoilla jo olevat laitteistot todettiin riittäviksi halutun häiriöttömyystason saavuttamisessa.</p>		
Asiasanat sähkömagneettiset häiriöt, radiotaajuushäiriöt, äänitekniikka		

Author (authors)	Degree	Time
Joonas Laitinen	Bachelor of Engineering	December 2020
Thesis title		60 pages 1 page of appendices
Electromagnetic interference and uniformity of power supply in the use of audio equipment		
Commissioned by		
HTL-Records		
Supervisor		
Harri Kosonen		
Abstract		
<p>The objective of the thesis was to study and explain the phenomena related to electromagnetic interference and uniformity of power supply in audio equipment to the commissioner, solve interference of the audio system in the studio, develop and if possible, build a separate, movable accessory device with which to guarantee an interference-free and good quality sound regardless of the environment. The purpose of the study was to be an ensemble with which the commissioner can understand the most common causes of electromagnetic interference and the measures needed to prevent it.</p> <p>In the thesis an already existing source material, disposable equipment and retail products were delved into. By studying the causes of electromagnetic interference and theory and running tests, the solution regarding the interference in the commissioner's studio was perceived.</p> <p>The interference in the studio was caused by the faulty transformer of the power supply of the effects pedal, which caused a clearly hearable hum in the entire audio equipment. When the located transformer was replaced with a new one the problem was gone. The accessory device was developed theory-wise, but building it was not deemed worthwhile in touch of this thesis because the equipment already in the market was found good enough in achieving the desired level of interference removal.</p>		
Keywords		
electromagnetic interference, radio-frequency interference, audio technology		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	SÄHKÖTEKNIikka	6
2.1	Impedanssi	6
2.2	Kapasitanssi	8
3	SÄHKÖMAGNEETTiset HÄIRIÖT	8
3.1	Hurina	8
3.1.1	Resistiivinen kytkeytyminen	9
3.1.2	Induktiivinen kytkeytyminen	12
3.1.3	Kapasiivinen kytkeytyminen	14
3.2	Radiotaajuushäiriöt	15
3.3	Kohina	15
4	AUDIOTEKNIikka	16
4.1	Balansoitu signaali	16
4.2	Balansoimaton signaali	17
4.3	Balansoimattoman ja balansoidun signaalin yhteensovitus	18
5	SIGNAALITASOT	20
5.1	Mikrofonitason signaali	21
5.2	Linjatason signaali	21
5.3	Instrumenttitason signaali	21
5.4	Kaiutintason signaali	21
6	LIITTIMET	22
6.1	Plugit	22
6.2	XLR	23
6.3	Speakon	23
6.4	RCA	24
6.5	Banaaniliitin ja naparuuvi	24
6.6	BNC-liitin	25

6.7	Moninapaliitin.....	25
7	KAAPELIT	26
7.1	Mikrofonikaapeli.....	26
7.2	Instrumenttikaapeli.....	27
7.3	Kaiutinkaapeli	28
7.4	Optinen valokuitukaapeli.....	29
8	DI-BOXI	30
8.1	Passiivinen DI-boxi	31
8.2	Aktiivinen DI-boxi	32
9	JÄNNITTEENTASAAJA	33
10	TESTAUKSET	35
10.1	Ympäristöhäiriöt DI-boxissa	35
10.2	Potentiaalieron aiheuttama jännite.....	43
11	STUDION HÄIRIÖT	50
12	APULAITEPROJEKTI.....	55
13	YHTEENVETO JA OHJELISTA.....	56
14	POHDINTA	57
	LÄHTEET.....	59
	LIITTEET	61

1 JOHDANTO

Sain tämän opinnäytetyön aiheen HTL-Recordsin omistajalta Hannu Laitiselta keskustellessamme opintojeni edistymisestä ja hänen äänitysstudionsa huri-naongelmista sekä soittokeikoilla esiintyvistä äänenlaatuun liittyvistä häiriöistä. Päätin tarttua tilaisuuteen, koska en tiennyt äänitekniikasta juuri mitään ja aihe oli täten mielenkiintoinen.

Päätavoitteena on tutustua äänitekniikan oppeihin ja sähkömagneettisten häiriöiden teoriaan, jotta selvittäisin ja ratkaisisin äänitysstudion ongelmat. Tutkimuksen on tarkoitus olla tietopaketti sähkömagneettisten häiriöiden teoriaan ja niiden torjumiseen toimeksiantajan avuksi. Lisäksi oli tarkoitus kehittää ja rakentaa jonkinlainen apulaite, jonka avulla saataisiin keikoilla esiintyvät ongelmat eliminoitua, mutta hahmottelin kuitenkin kyseisen apulaitteen ideologiaa ja mahdollista kokonaisuutta teoriapohjaisesti.

Aiheesta löytyy runsaasti materiaalia netin foorumeista, verkkoblogeista ja luennoista, mutta asiaan aiemmin perehtymättömänä minun täytyi olla tarkka lähteiden luotettavuuden suhteen ja esimerkiksi jännitteentasaajista ei juurikaan suomeksi tietoa ollut. Pääsin tekemään testauksia toimeksiantajan laitteistoa ja koulun tiloja sekä opinnäytetyöni ohjaajan osaamista hyödyntäen, ja ne tukivat teorian oppimistani.

2 SÄHKÖTEKNIikka

Äänisignaali on vaihtovirtaa, ja siihen vaikuttavat resistanssin, kapasitanssin, induktanssin ja impedanssin kaltaiset sähköiset ilmiöt muun muassa jännitetasosta ja virran määrästä riippuen [1, s. 66].

2.1 Impedanssi

Impedanssi on vaihtovirtapiirille aiheutuva vastus, joka vastustaa sähköän kulkua ja vaikuttaa myös äänisignaaliin. Vaihtovirtapiirissä jännitetaso vaihtelee positiivisen ja negatiivisen jakson välillä, jolloin sillä on vaihteleva amplitudi sekä suunta. [2.]

Siirrettäessä tehoa pisteestä toiseen, esimerkiksi äänisignaali päätevahvistimelta kaiuttimelle, on sisääntulon ja ulostulon sekä kaapelin impedanssien suositeltavaa olla mahdollisimman lähellä toisiaan [2].

Äänitysstudiossa puolestaan haluttaessa siirtää jännitettä tehokkaasti impedanssien sovittaminen ei ole suotavaa. Impedanssien ollessa tulo- ja lähtöpäässä samat signaalin jakaminen useaan pisteeseen aiheuttaa jännitehäviöitä. Esimerkiksi, jos 600 ohmin lähtöimpedanssilla tuotetaan 0 dBm tason signaalia, joka haarautuu kahteen 600 ohmin sisääntuloon, näkyy laitteiden mittareilla -3 dBm. Mikäli halutaan neljän 8 ohm kaiuttimen kytkentä siten, että kokonaisimpedanssiksi tulee 8 ohm, täytyy niistä kaksi kytkeä sarjaan ja näin saadut kaksi paria rinnakkain. [2.]

Desibelimilliwatti yksikkö on siis suhteellinen 1 milliwatin tehoon ja saadaan kaavasta $10 \cdot \log (1/2) \text{ dBmW}$, mutta laatu kirjoitetaan tyypillisesti ilman watteja eli dBm:nä. Mikäli lasketaan signaalinvoimakkuutta tehon sijaan jännitteen kautta, käytetään kerrointa 20 ja kaavaksi saadaan $20 \cdot \log (\text{jännite/vertailutaso})$. Logaritminen suhteellinen jänniteyksikkö dBu perustuu 1 mW tehon 600 ohmin kuormalla tuottamaan jännitetasoon. $20 \cdot \log (775 \text{ mV} / 775 \text{ mV}) = 20 \cdot \log (1) = 20 \cdot 0 = 0 \text{ dBu}$, joten $0 \text{ dBu} = 775 \text{ mV}$. Sivulla 21 kuvassa 10 mikrofonisignaalitasoissa on siis virhe; jännitetasomaksimi on kuvan mukaan 20 mV eli oikealla kaavalla laskettuna se on $20 \cdot \log (20 \text{ mV} / 775 \text{ mV}) = -32 \text{ dBu}$, ja 0 mV minimiarvo vastaa desibeliyksikköinä miinus ääretöntä.

Laitteita toisiinsa kytkiessä tulisi sisääntuloimpedanssin olla kymmenkertainen ulostuloimpedanssiin verrattuna. Esimerkiksi ulostuloimpedanssin ollessa 150 ohmia, joka kytketään kahteen laitteeseen, joiden sisääntuloimpedanssi on 30 kOhmia, tulee kokonaisimpedanssiksi 15 kOhmia. Tällöin jännite tippuu 0,04 dB, jolla ei juurikaan ole vaikutusta. Kyseistä menetelmää kutsutaan jännitesovituksiksi. [2.]

Mikrofonien etuasteiden tuloimpedanssi on noin kymmenen kertaa suurempi kuin mikronin lähtöimpedanssi. Tuloimpedanssi kannattaa pitää alhaisena, 1,5–3 kOhmia, koska vastukset pitävät ääntä virran kulkiessa läpi. [2.]

Kitaroiden mikrofonit ovat enemmän kapasitiivisia kuin induktiivisia ja johtuen kuparilangan määrästä omaavat suuren resistanssin, noin 10 kOhm, minkä takia myös kitaraetuasteiden ja DI-boxien (**DI-box**, **DI-unit**, **direct input box** tai **direct inject box**) sisääntuloimpedanssit ovat luokkaa 470 kOhm–1 MOhm. [2.]

2.2 Kapasitanssi

Kapasitanssin mittayksikö on faradi, ja se kuvaa systeemin kahden osan (tyypillisesti kondensaattorin kahden metallilevyn) potentiaalieron välille varautuneen sähkövarauksen määrää. Vahvistimeen kytkettävällä instrumenttipuhalakin on kapasitanssia, ja se voidaan nähdä kondensaattorina; se sisältää kaksi johdinta, jotka on eristetty toisistaan sähköä johtamattomalla aineella. Johtojen kapasitanssi mitataan tyypillisesti asteikolla pikofaradi per metri, instrumenttikaapelilla se on noin 40 pF/m. [1, s. 70.]

Induktanssin ja kapasitanssin muodostamasta alipäästösuotimesta käytetään yhteisnimitystä reaktanssi. Pienitehoisissa laitteissa, kuten instrumenteissa tai mikrofoneissa, kapasitanssi vaikuttaa enemmän, kun taas suuritehoisissa kaiutinlinjoissa induktanssilla on suurempi merkitys. [1, s. 70.]

3 SÄHKÖMAGNEETTISET HÄIRIÖT

Audiotekniikassa sähkömagneettisilla häiriöillä tarkoitetaan siirrettävään äänisignaaliin ylimääräisenä kytkeytyvää ei-toivottua signaalia. Yleisimmät häiriöt ovat hurina ja kohina. Hurina johtuu sähköisistä aiheuttajista ja kytkeytyy usein ulkopuolelta, kun taas kohina on signaalin siirtoon käytetyistä komponenteista aiheutuvaa. [3, s. 9; 4, s. 7–8.]

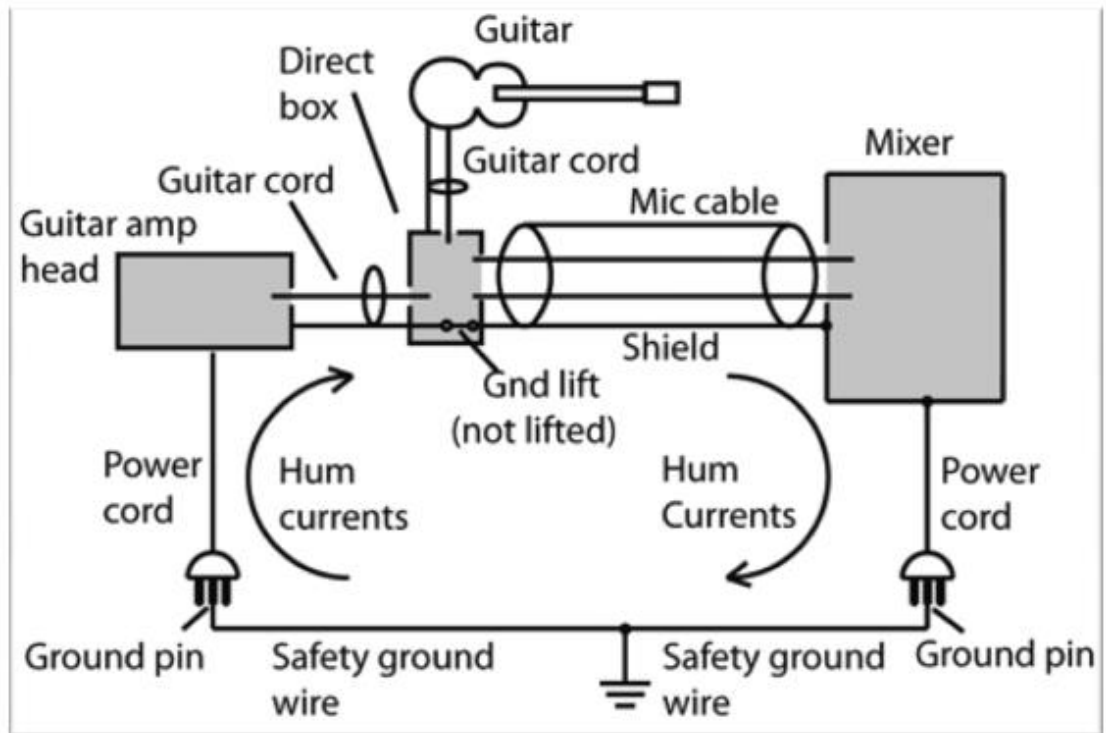
3.1 Hurina

Hurina on selkeästi erotettavissa oleva verkkotaajuudella esiintyvä häiriöääni. Signaalipiiriin voi päästää 50 Hz verkkovirtaa resistiivisellä, induktiivisella tai kapasitiivisella kytkeytymisellä. [3, s. 9; 4, s. 8.]

3.1.1 Resistiivinen kytkeytyminen

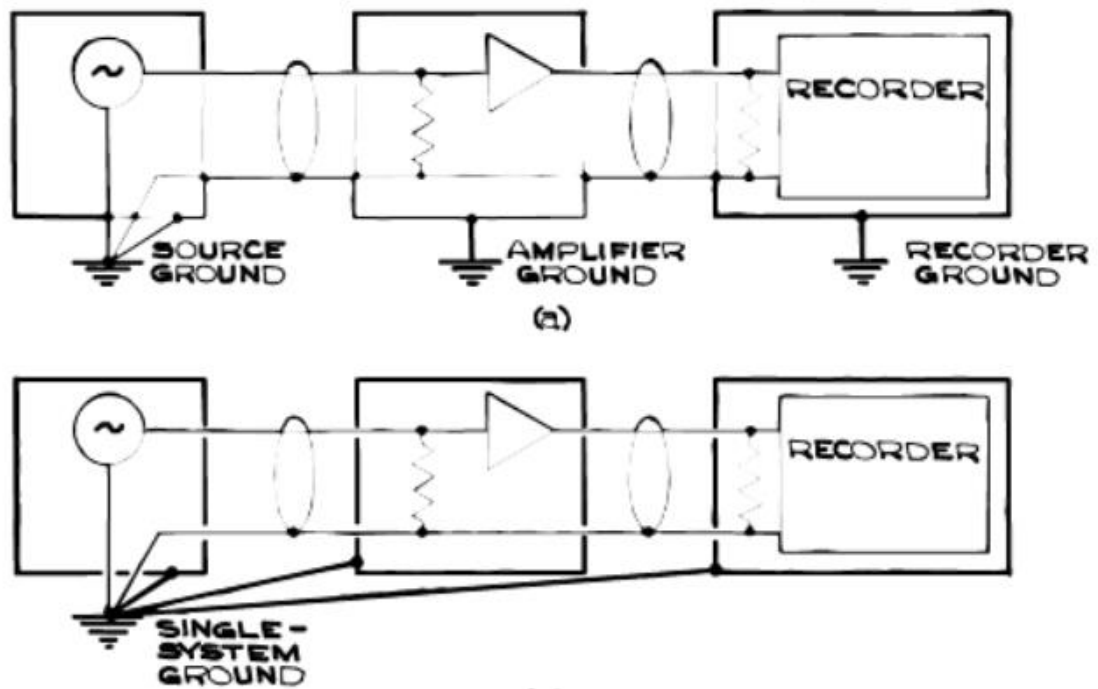
Resistiivinen eli galvaaninen kytkeytyminen aiheutuu fyysisesti, yleisimmin huonojen maadoitusten tai maalenkin kautta. Häiriöitä voivat myös aiheuttaa verkkojännitteeseen kytketyt laitteet, kuten hakkurivirtalähteet tai kytkentäpiikit. Kotistudion käytössä esimerkiksi keittiön jääkaapin kylmälaitteiston päälle ja pois kytkeytyminen voi aiheuttaa audiolaitteistossa kuultavissa olevan naksauksen. Äänityslaitteistolle oma syöttö on paras suojaus verkkohäiriöitä vastaan. [3, s. 10–13.]

Maalenkki eli ground loop syntyy, kun laitteisiin syötetään sähköt eri pistorasioista, joilla on eriävä suojamaadoituksen potentiaali ja ne liitetään toisiinsa silmukkamaisesti esimerkiksi mikserin kautta. Kytkentä aiheuttaa jännite-eron suojajohtimiin, jolloin signaalipiirissä pääsee kulkemaan tasausvirtaa. Kuvassa 1 kitara kytketään DI-boxin kautta äänityspöytään käyttäen balansoimatonta kaapelia kitaran ja DI-boxin välillä ja balansoitua kaapelia DI-boxin ja äänityspöydän välillä, jolloin maadoituskaapelit muodostavat silmukan, ja tasausvirrat pääsevät kytkeytymään signaalipiiriin kitaran ja DI-boxin välille. Balansoimattomassa kaapelissa on vain kaksi johdinta, joista toinen kuljettaa paluusignaalin lisäksi maadoitusjohtimen paluuvirtaa. Balansoidussa kaapelissa on kolmas erillinen johdin, jolloin maadoitusvirta ei pääse signaalipiiriin. Tällaisen maalenkin voi katkaista DI-boxin Ground lift -ominaisuudella, joka irrottaa suojamaan yhteyden kitaran ja äänityspöydän väliltä, jolloin tasausvirrat eivät enää kulje. [3, s. 12–13.]



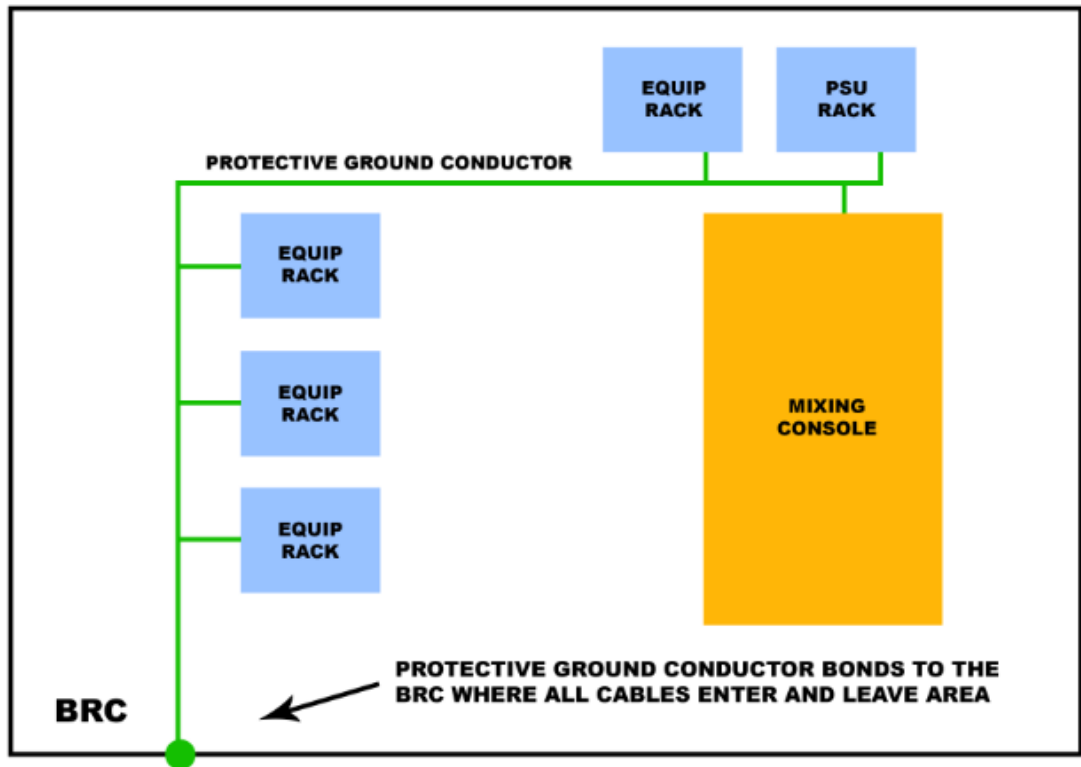
Kuva 1. Maalenkin havainnollistaminen [3, s. 14]

Lisäksi maalenkit voidaan estää kuvassa 2 esitetyllä tähtipistemaadoituksella, jossa maadoitus ei muodosta missään vaiheessa suljettua piiriä, mutta tähtipistemaadoituksen ongelmana on huono häiriökestoisuus, koska se ei poista potentiaalieroja ja pitkien maadoitusjohtimien suuri impedanssi mahdollistaa myös suuret häiriövirrat. Ideaalinen tapa välttää resistiivinen kytkeytyminen on pienentää laitteiden potentiaalieroja potentiaalintasauskaapeleilla tai kytke- mällä niiden suojakuoret toisiinsa. [3, s. 14–16.]



Kuva 2. Yllä perinteinen maadoitus, alla tähtipistemaadoitus [3, s. 15]

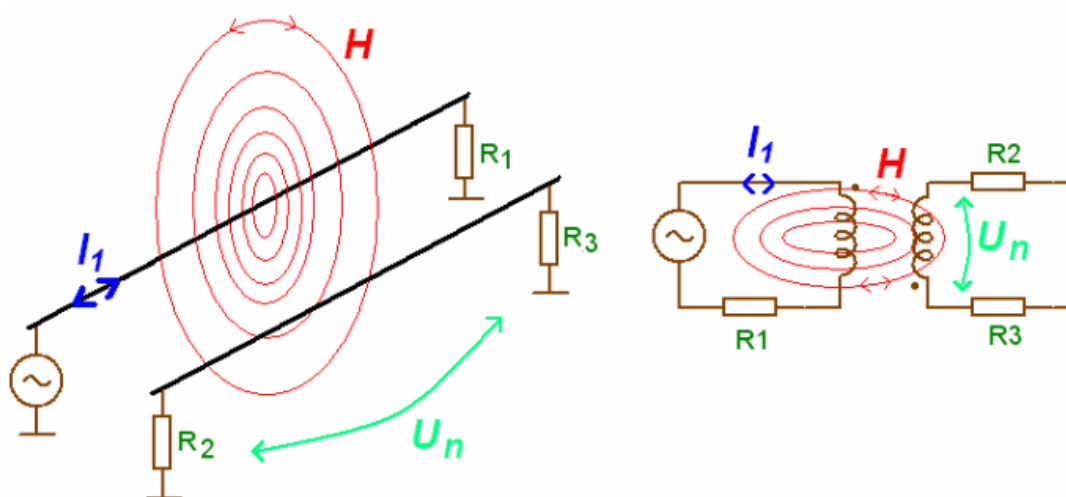
Silmukoidun potentiaalintasausverkon periaatteena on yhdistää kaikki sähköjärjestelmän osat maadoitusjärjestelmään potentiaalintasausjohtimilla. Näin luodaan yksittäisistä suljetuista silmukoista koostuva maadoitusverkko, jossa kaikki osat ovat samassa nollapotentiaalissa. Esimerkkikuvassa 3 on tilanne, jossa mustalla merkattu "Bonding Ring Conductor" eli potentiaalintasausjohdin ympäröi konsertin miksauspisteen. Kun kaikkien laitteiden suojakuoret on liitetty vihreällä piirretyillä lisäpotentiaalintasauskaapeleilla potentiaalintasausjohtimeen, potentiaalierot ja näin myös häiriövirrat pienenevät. Vastaava tulos saavutetaan myös kytkemällä laitteiden suojakuoret yhteiseen suojakoteloon, joka liitetään ympäröivään potentiaalintasausjohtimeen. [3, s. 38–39.]



Kuva 3. Silmukoidun potentiaalintasausverkon havainnollistaminen [3, s. 40]

3.1.2 Induktiivinen kytkeytyminen

Induktiivisen eli sähködynaamisen kytkeytymisen aiheuttaa magneettikenttä, ja se tapahtuu audiokaapelin kulkiessa liian läheltä jonkin laitteen syöttökaapelia. Kuvassa 4 on esitetty induktiivisen kytkeytymisen periaate ja sen sijaiskytkentä. Verkkovirtakaapelin teho on suuri verrattuna äänisignaalin siirrossa käytettäviin tehoihin ja verkkovirran jatkuva muutostila synnyttää magneettikentän, joka luo alueelleen osuvaan johtimeen jännitteen. Tämä aiheuttaa induktiivisen häiriövirran kytkeytymisen signaalipiiriin. [3, s. 18–19.]



Kuva 4. Induktiivinen kytkeytyminen ja sen sijaiskytkentä [4, s. 9]

Johtimien välinen keskinäisinduktanssi voidaan määrittää yhtälöstä 1 [4, s. 9–10].

$$L = l \frac{\mu}{\pi} \ln \left(\frac{d-r}{r} \right) \quad (1)$$

jossa	L	keskinäisinduktanssi	[H]
	l	johtimien pituus	[m]
	μ	väliaineen permeabiliteetti	[H/m]
	r	johtimen säde	[m]
	d	johtimien välinen etäisyys	[m]

Indusoituva jännite voidaan määrittää yhtälöstä 2 [4, s. 10].

$$U_n = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2)$$

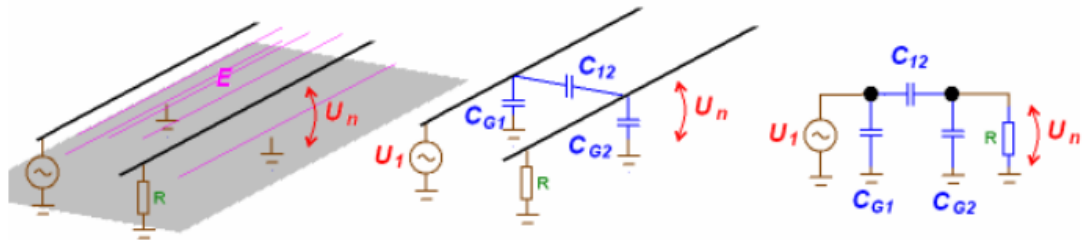
jossa	U_n	indusoituva jännite	[V]
	L	johtimien välinen keskinäisinduktanssi	[H]
	$\frac{\Delta I}{\Delta t}$	virran muutos ajanjaksolla Δt	[A/s]

Koska mikrofonisignaali on heikkotehoinen, sitä vahvistetaan, jolloin myös häiriöt vahvistuvat. Magneettikentän vaikutusta voidaan vähentää kasvattamalla

kaapelien välimatkaa tai käyttämällä signaalin siirrossa parikierrettyä kaapelia, jolloin vastakkaissuuntaisten, identtisten signaalien magneettikentät kumoavat toisensa (toimii vain siirrettäessä balansoitua signaalia). Lisäksi kaapeliylitykset tulisi tehdä suorassa kulmassa induktiivisten häiriökytkentöjen välttämiseksi. [3, s. 19–20.]

3.1.3 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Kapasitiivisen eli sähköstaattisen kytkeytymisen aiheuttaa sähkökenttä, ja se myös tapahtuu audiokaapelin kulkiessa liian läheltä jonkin laitteen syöttökaapelia. Kuva 5 havainnollistaa kapasitiivista kytkeytymistä ja sen sijaiskytkentää. Kahden lyhyehkön välimatkan päässä toisistaan olevan sähköisen johtimen välillä on kapasitanssia. Yhden johtimista varautuessa sähköisesti varautuu myös toinen vastakkaismerkkisesti. Näin syntyy kapasitiivinen häiriö, jonka sähkövirran suuruus riippuu jännitteestä ja taajuudesta. [3, s. 16.]



Kuva 5. Kapasitiivinen kytkeytyminen ja sen sijaiskytkentä [4, s. 10]

Johtimien välinen kapasitanssi voidaan määrittää yhtälöstä 3 [4, s. 10].

$$C = \frac{l\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\left(\frac{d}{2r} + \sqrt{\frac{d^2}{4r^2} - 1}\right)} \quad (3)$$

jossa	C	kapasitanssi	[F]
	l	johtimien yhteinen pituus	[m]
	d	johtimien välinen etäisyys	[m]
	r	johtimen säde	[m]
	ϵ_r	suhteellinen permittiivisyys	[F/m]

ε_0 tyhjiön permittiivisyys
[F/m]

Indusoituneen jännitteen likiarvo voidaan määrittää yhtälöstä 4 [4, s. 10–11].

$$U_n \approx RC_{12} \frac{U_1}{\Delta t} \quad (4)$$

jossa	U_n	indusoituva jännite	[V]
	R	häirityn piirin resistanssi	[Ω]
	C_{12}	piirien keskinäiskapasitanssi	[F]
	$\frac{U_1}{\Delta t}$	jännitteen muutos ajanjaksolla Δt	[V/s]

Sähkökentän vaikutusta voidaan vähentää asentamalla verkkovirtakaapelit erilleen mikrofoniakaapeleista ja kulkemaan niin kauas toisistaan kuin mahdollista tai suojaamalla ne johtavasta materiaalista valmistetulla, maadoitetulla putkella, jolloin häiriöt kytkeytyvät suojavaipan kautta maahan eivätkä vaikuta äänisignaaliin. Kaapelien mennessä ristiin on ne vedettävä suorassa kulmassa. [3, s. 18.]

3.2 Radiotaajuushäiriöt

Radiotaajuushäiriöillä tarkoitetaan sähkömagneettisen säteilyn aiheuttamia sähkömagneettisia häiriöitä, jotka esiintyvät radiotaajuuksilla (3 kHz–300 GHz) ja niitä aiheuttavat nopeasti muuttuvat sähkövirrat, joiden aiheuttajia ovat esimerkiksi loisteputket ja matkapuhelimet. Radiotaajuushäiriöiltä voidaan suojautua kunnollisella maadoituksella ja balansoitua järjestelmää käyttämällä. [1, s. 78–79.]

3.3 Kohina

Kohinaa esiintyy, kun signaalia vahvistetaan, ja sitä kuvataan signaali-kohinasuhteella, joka mitataan desibeleissä. Jos vahvistinta säädetään suuremmalle sisääntulosignaalin ollessa heikompi kuin ulostulo, ilmenee korviin kuultavaa kohinaa. Sisääntulosignaalin ollessa ulostuloa suurempi menee ääni

puolestaan särölle. Paras tulos saavutetaan signaalien ollessa mahdollisimman lähellä nollatasoa. [4, s. 7–8.]

4 AUDIOTEKNIikka

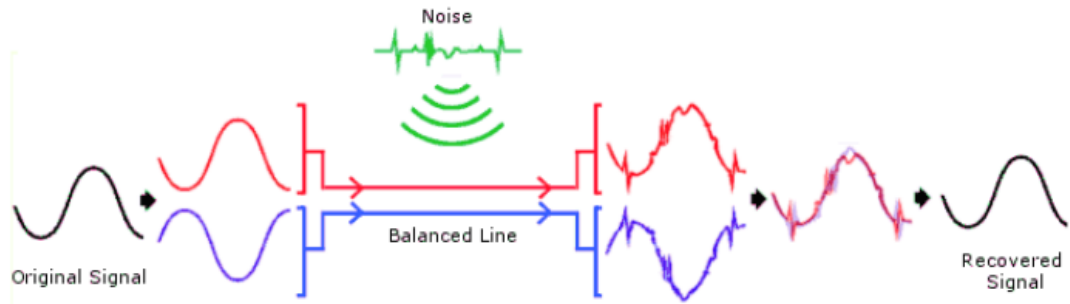
Sähkömagneettisten häiriöiden ymmärtämisen kannalta on tärkeää myös audiotekninen tietämys, kuten signaalityypit sekä -tasot.

4.1 Balansoitu signaali

Balansoidussa audiokaapelissa on kolme johdinta; positiivinen signaalijohdin, negatiivinen signaalijohdin ja suojavaipan suojajohdin. Tämän ansioista balansoidussa järjestelmässä on hyvä häiriönsietokyky. Ensimmäinen johdin kuljettaa siirrettävää informaatiota, toinen johdin kuljettaa samaa tietoa kuin ensimmäinen, mutta vastakkaisvaiheisena ja kolmas johdin toimii suojavaippana. Balansoimattomaan audiosignaalin siirtoon eroten balansoidun audiosignaalin siirrossa on paluusignaali oma johtimensa erillään suojavaipasta. [3, s. 22.]

Häiriö, joka tuottaa samankaltaisen häiriösignaalin molempiin signaalijohtimiin järjestelmän ulkopuolelta, kulkee nimellä **common mode interference** eli yhteismuotoinen häiriö. [3, s. 22.]

Balansoidun järjestelmän hyvä häiriökestoisuus perustuu vastaanottavan systeemin signaalin käsittelyyn, jota esitellään kuvassa 6. Kun vastaanottava vahvistin kääntää toisen johtimen negatiivisen signaalin polariteetin, myös kytkeytyneiden häiriösignaalien vaihe kääntyy. Kääntyneen negatiivisen signaalin summautuessa ensimmäisen johtimen positiivisen signaalin kanssa lähetetyn signaalin voimakkuus kasvaa ja yhteismuotoiset häiriöt suodattuvat pois niiden yhdistyessä polariteetin käännön jälkeiseen positiiviseen signaaliin, jolloin häiriösignaalit ovat vastakkaisvaiheisia keskenään ja negatoivat toisensa. [3, s. 22.]



Kuva 6. Balansoidun audiosignaalin häiriön suodatus [3, s. 23]

Myös negatiivisen ja positiivisen signaalijohtimen parikierretty kaapelirakenne edistää häiriökestoisuutta; kun vastakkaispolaariset, samanlaiset signaalit kierretään yhteen, ne kumoavat toistensa synnyttämät magneettikentät ja induktiivisen kytkeytymisen aiheuttamat häiriöt vähenevät [3, s. 23].

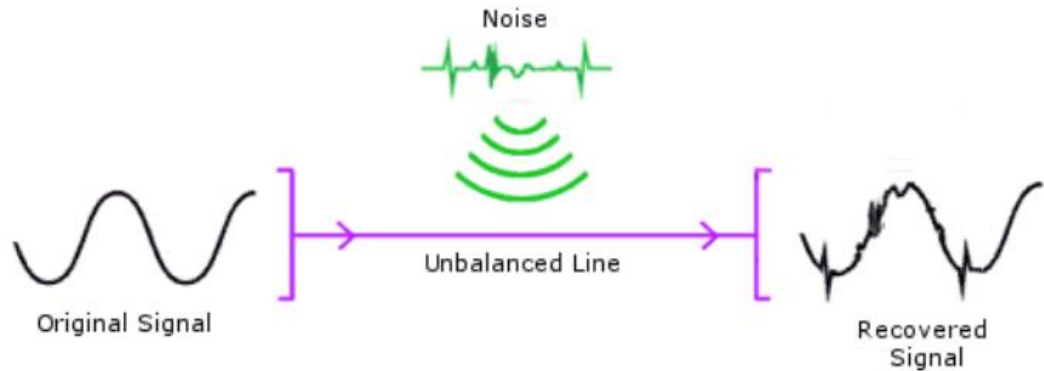
Balansoitua järjestelmää käytetään yleisesti ammattijärjestelmissä, esimerkiksi suurissa konserttijärjestelmissä, joissa käytetään pitkiä kaapeleita analogiseen audiosignaalin siirtoon. Isoin hyöty saavutetaan tilanteissa, kun vastaanotettu häiriö voi olla siirtosignaaliin verrattuna suuri ja paras hyöty saada, kun koko laitteisto suunnitellaan mikrofoni-kaapeli-ohella täysin balansoiduksi tai audiosignaalia siirrettäessä pitkiä matkoja analogisesti. [3, s. 23.]

Kuitenkin isossa osassa audiolaitteista signaali muutetaan balansoidun kytkennän jälkeen balansoimattomaksi laitteen sisällä ja ulos laitteesta tullessa signaali muutetaan takaisin balansoiduksi. Vain ammattikäyttöön tarkoitetuissa audiolaitteista pienessä osassa balansoitu signaaliketju säilyy koko matkan laitteen läpi, jolloin muuntajia ja elektronisia vahvistimia ei tarvita. [3, s. 23–24.]

4.2 Balansoimaton signaali

Balansoimaton järjestelmä on kuluttajalle suunnattu ja perinteisiä käyttökoh- teita ovat kotistereojärjestelmät ja niihin verrattavat laitteet. Balansoimaton au- diokaapeli koostuu kahdesta johtimesta; positiivisesta signaali-johtimesta ja maadoitusjohtimesta tai 0V:n johtimesta, johon signaalia verrataan. Kuvassa 7

nähdään, kuinka signaalihohtimen vastaan ottamat yhteismuotoiset häiriöt voimistuvat vastaanottimessa, eivätkä suodatu niin kuin balansoidussa systeemissä. [3, s. 24.]



Kuva 7. Balansoimaton audiosignaali ei suodata yhteismuotoisia häiriöitä [3, s. 24]

Pitkät kaapelivedot ja pienet lähetystehot aiheuttavat suuren häiriöiden vahvistuksen. Äänentoiston puhtaudesta ja korkeatasoisesta laadusta kiinnostuneet harrastajat kuitenkin käyttävät pääosin balansoimattomia kaapeleita, koska vastaanottavan laitteen ja äänilähteen välillä esiintyy harvoin pitkiä etäisyyksiä kotistereokäytössä, jolloin kaapelien pituus ja laitteiden etäisyys on yleisesti enintään muutama metri sekä signaalin siirrossa käytetty teho on voimakas verrattuna mikrofonsignaaliin. Tällöin balansoitu järjestelmä ei ole kustannustehokas verrattuna sen hyötyihin. [3, s. 24–25.]

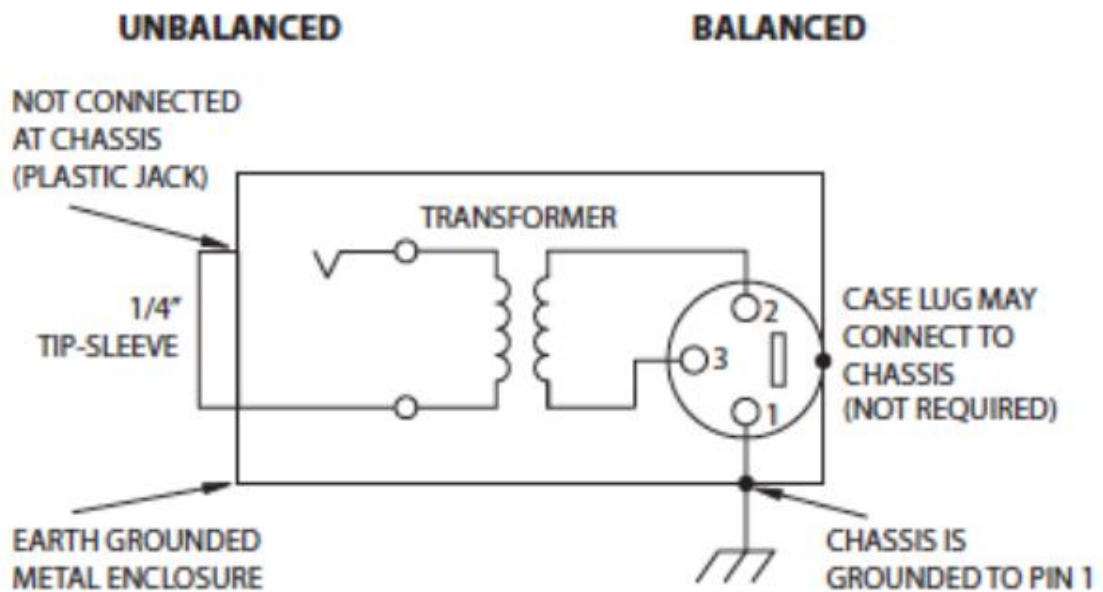
Suurin hyöty balansoidusta signaalin siirrosta balansoimattomassa laitekokoaisuudessa saavutetaan, kun käytetään kaiuttimia, jotka sisältävät sisäisen vahvistimen eli aktiivikaiuttimia tai kun yksittäisten monovahvistimien kautta ajetaan passiivisia kaiuttimia. Kun halutaan välttää pitkien kaiutinkaapelien aiheuttamilta tehohäviöiltä tai audiosignaali siirtyy pitkän matkan linjatasoisena tehovahvistimelle, on balansoitu audiosignaalin siirto kannattavaa lisääntyneiden häiriöiden vaikutusten takia. [3, s. 25.]

4.3 Balansoimattoman ja balansoidun signaalin yhteensovitus

Balansoimaton ja balansoitu systeemi eivät ole normaalioloissa yhteensopivia. On otettava huomioon, että laitevalmistajien kesken tavat kytkeä signaalimaa

suojamaadoitukseen eroavat usein, jolloin vaarana on, että signaalipiiriin pääsee kytkeytymään maadoitusjohtimista häiriövirtoja, vaikka järjestelmäkokoisuus olisikin suunniteltu balansoiduksi. Balansoimattomaan laitteeseen balansoitua äänilähdettä kytkettäessä balansoidun järjestelmän maadoitusjohtimien häiriövirtojen kulkeutuminen signaalipiiriin voidaan estää kuvan 8 tapaan suojaerotusmuuntajalla tai kuvan 9 mukaan muokatuilla kaapeleilla. [3, s. 25–26.]

Laitteiden välinen galvaaninen yhteys poistuu suojaerotusmuuntajan avulla, kun balansoimaton äänilähde yhdistetään tip-sleeve- eli instrumenttiliittimellä muuntajan ensiöpuolelle, joka siirtää signaalin XLR-liittimellä toisiopuolelle kytkeytyyn balansoituun järjestelmään. Kun balansoimatonta puolta ei kytketä muuntajan suojakuoreen, eivät maadoitusjärjestelmät ole yhteydessä eivätkä häiriöt kytkeydy eteenpäin, mutta signaali siirtyy. [3, s. 26.]



Kuva 8. Balansoimattoman järjestelmän yhdistäminen balansoituun järjestelmään suojaerotusmuuntajalla [3, s. 26]

Suojaerotusmuuntajan käytön ollessa mahdotonta järjestelmät voidaan sovittaa yhteen käyttämällä tehdasvalmisteisista kaapeleista muokattuja kaapeleita. Maasilmun syntyminen estetään, kun katkaistaan suojamaadoitusyhteys toisesta päästä, mutta tällöin menetetään suojavaipan häiriöpoistovaikutukset. Resistiiviset häiriöt siis vältetään, mutta tämä luo radiotaajuushäiriöitä vastaanottavan antennin järjestelmään. [3, s. 26–27.]



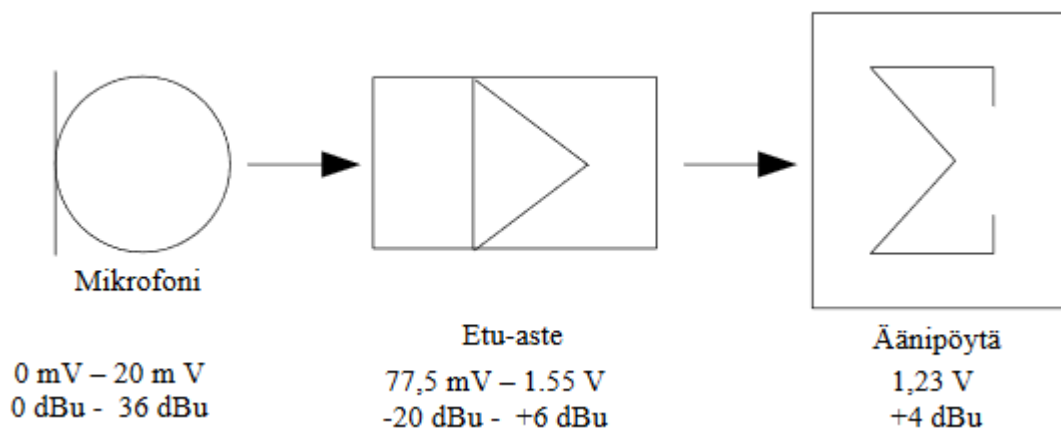
Kuva 9. Balansoimattoman järjestelmän kytkentä suoraan balansoituun järjestelmään muokattulla kaapelilla (Vasemmalla puolella oleva TS-plugi ei normaalisti sisällä vihreällä merkattua maadoitusjohtinta.) [3, s. 27]

Kuvan 9 ratkaisua voidaan käyttää, kun esimerkiksi sähkökitara kytketään suoraan äänityspöytään [3, s. 27].

Impedanssibalansoinnissa asentamalla negatiivisen signaalijohtimen ja maan väliin vastus ja kondensaattori vastaanottava laite näkee positiivisen ja negatiivisen johtimen impedanssit yhtä suuruisina verrattuna maahan. Tällöin balansoitu sisääntulo suodattaa balansoimattoman ulostulon yhteismuotoiset häiriöt. [3, s. 28.]

5 SIGNAALITASOT

Sähköisesti siirrettävät äänisignaalit ovat jaettavissa kuvan 10 mukaisesti kolmeen päätasoon: mikrofonitasoiseen, linjatasoiseen ja kaiutintasoiseen signaaliin. Jokainen laite toimii omalla nimellistasollaan, joten on tärkeää tietää operoitava taso, jottei pohjakohina hukuta hyötysignaalia tai yliajeta sitä särölle. [1, s. 25.]



Kuva 10. Esimerkki signaalin kulusta ja tasoista [1, s. 25]

5.1 Mikrofonitason signaali

Mikrofonien jännitetaso on matala; dynaamisten mikrofonien muutamista millivolteista kondensaattorimikrofonien kymmeniin millivolteihin. Matalatasoinen jännite nostetaan esimerkiksi äänipöydän etuasteessa linjatasoiseksi, jotta sitä voidaan käsitellä. Signaalin säröytyessä etuasteessa ennen vahvistusta voidaan mikrofonista tai äänipöydästä vaimentaa signaalia. ”pad”-vaimennuskyt-kin laskee signaalin tasoa esimerkiksi 20 dB, ja tällöin signaali saadaan säröytymättömänä laitteeseen, jossa se voidaan nostaa sopivalle tasolle. [1, s. 25.]

5.2 Linjatason signaali

Esimerkiksi äänipöydät ja efektilaitteet käyttävät linjatasoista signaalia, ja yleisessä käytössä on kahden tasoista signaaleita: ammattilaislaitteiden taso ja niin sanottu puoliammattilaislaitteiden taso. Ammattilaitteiden signaali on usein väliltä 77,5 mV (-20 dBu) – 1,55 V (+6 dBu). Yleisin nimellistaso on 1,23 V (+4 dBu), mutta useimmilla ammattilaitteilla voidaan käsitellä jopa +20 dBu (7,75 V) tasoja. Puoliammattilaistaso on yleisesti käytössä hifilaitteissa, ja se on tyypillisesti -10 dBu (24,5 mV). Puoliammattilaislaitteissa käytetään yleensä RCA-liittimiä ja ulostulot ovat balansoimattomia, joten mikäli ne halutaan kytkeä ammattilaitteisiin, täytyy käyttää linjamuuntimia vahvistamaan signaali ammattilaistasolle. [1, s. 25–26.]

5.3 Instrumenttitason signaali

Instrumenttitason signaali on mikrofonin- ja linjatasoisen signaalin väliltä, noin -20 dBu, ja sitä tuottavat muun muassa sähköbasso ja sähkökitara. Mikäli sähkökitaran suorasignaali kytketään äänipöytään, täytyy mikrofonin etuasteen väliin kytkeä DI-boxi, jotta korkeajännitteinen suuri-impedanssinen signaali muuttuu sopivaksi matalajännitteiseksi ja pieni-impedanssiseksi signaaliksi. [1, s. 26.]

5.4 Kaiutintason signaali

Tehovahvistimen avulla saadaan linjatasoinen signaali kaiutintasoiseksi, jota kaiuttimet toistavat. Käytössä olevat kokoluokat ovat:

- +28 dBu (20 V), harvinainen Suomessa
- +30 dBu (25 V), harvinainen Suomessa

- +36 dBu (50 V), melko harvinainen Suomessa
- +39 dBu (70 V), yleisin Suomessa
- +42 dBu (100 V), yleinen Suomessa

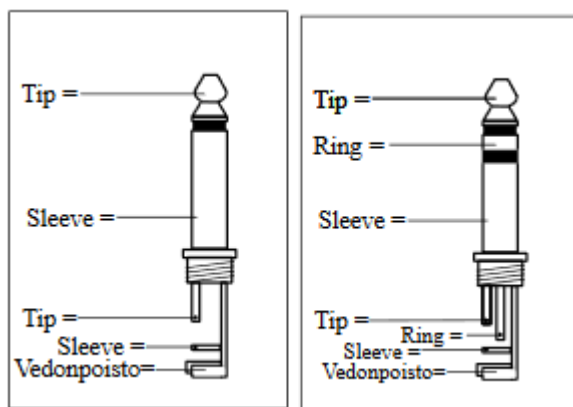
Kaiutintason signaali on voimakas ja ei kovin häiriöaltis, mutta esimerkiksi kytkettäessä saliaänen äänipöytä eri pistorasiaan kuin vahvistimet voi esiintyä maapotentiaalieroja ja täten resistiivisen kytkeytymisen kautta häiriöitä [1, s. 27].

6 LIITTIMET

Signaalin tasoa voidaan arvioida kytkemiseen käytettävien liittimien ja kaapelien perusteella, mutta XLR-kaapeli voi kuljettaa balansoitua linjatasoista signaalia tai balansoimatonta mikrofonsignaalia ja TRS-liittimellä eli stereopluggilla voidaan kuljettaa balansoitua tai balansoimatonta signaalia [1, s. 53].

6.1 Plugit

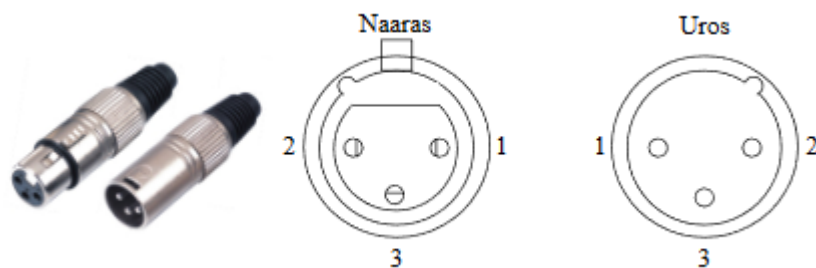
Yleisimmin tavattavat plugit ovat A-Gauge-kytkentäisiä 6,35 tai 3,5 millimetrisiä kuvassa 11 esiteltyjä monoplugeja eli TS-liittimiä tai stereoplugeja eli TRS-liittimiä. Yleensä TRS-liittimellä siirretään symmetristä linjasignaalia tai sitä käytetään esimerkiksi epäsymmetrisenä kuulokeliittimenä. Lisäksi älypuhelimet ja CD-soittimet ynnä muut kannettavat kodinelektroniikkalaitteet käyttävät 3,5-millisiä stereoliittimiä. TS-liittimellä siirretään linja- tai instrumenttitason epäsymmetristä signaalia. B-Gauge-kytkentätyyppin liittimet ovat lähes samankokoisia kuin TRS-plugi, ja ne ovat kokoa 6,35 mm ja 4,4 mm, mutteivat toimi A-Gauge-liittimien kanssa. On tärkeää tietää, kummalla plugityypillä ristikytkeäntäpaneeli on tarkoitettu käytettäväksi. [1, s. 54.]



Kuva 11. TS- ja TRS-plugi [1, s. 54]

6.2 XLR

XLR on yleisin balansoidun eli symmetrisen analogisen signaalin siirrossa käytetty liitintyyppi, ja sen rakenne nähdään kuvassa 12. Liittimessä on kolme napaa, jotka ovat numeroitu yhdestä kolmeen. 1-napaan kytketään maadoitusjohdin, 2-napaan kytkeytyy positiivinen äänisignaali ja 3-napa kuljettaa pa-luusignaalia. On olemassa myös malleja, joissa 2-napa on kylmä ja 3-napa kuuma, jolloin voi tapahtua ei-haluttuja vaiheenkääntöjä signaalitiessä. Urosliitintä käytetään tyypillisesti lähtevässä- eli outputpäässä ja naarasliitintä tulo- eli inputpäässä. Laitteita toisiinsa kytkettäessä on balansointityyppi otettava huomioon, koska ne vaativat erilaiset kytkennät esimerkiksi balansoimattomaan järjestelmään liitettäessä. [1, s. 53.]



Kuva 12. XLR naaras- ja urosliitin [1, s. 53]

6.3 Speakon

Kytettäessä päätevahvistimia kaiuttimiin PA-järjestelmässä käytetään usein Speakon-liittimiä. Speakoneja on NL2 eli kaksi-, NL4 eli neljä- sekä NL8 eli kahdeksannapaisina. Speakon-liitin on kestävä, lukkiutuva eikä tarvitse kolvausta, koska johtimet kiinnittyvät ruuviliittimillä. Speakon-liitin NL4 on yleisin,

ja tavallisesti se kytketään standardikaiuttimeen käyttämällä kahdesta johtimesta koostuvaa kaapelia, joka liitetään NL4:n +1- sekä -1-napoihin ja +2- sekä -2-navat jätetään kytkemättä. Kytkennät vaihtelevat kuitenkin järjestelmästä ja laitteiden valmistajasta riippuen, mutta ulkoisesti ne ovat kuvan 13 mukaisia. [1, s. 55.]



Kuva 13. Speakon-urosliitin [1, s. 55]

6.4 RCA

Koaksiaali- eli RCA-liitin on kuvan 14 näköinen, ja sitä käytetään yleisimmin CD- ja LP-soittimien sekä vastaavan kodinelektroniikan liitännöissä. Se on yleisimpiä epäsymmetrisistä liittimistä, ja sillä kuljetetaan useimmiten niin sanoittua puoliammattilaistason signaalia. [1, s. 55–56.]



Kuva 14. RCA-urosliitin [1, s. 56]

6.5 Banaaniliitin ja naparuuvi

Kodinelektroniikkalaitteissa käytetään banaaniliittimiä ja naparuuveja, ja niitä näkyy harvemmin ammattilaitteissa. Banaaniliittimiä on käytetty esimerkiksi signaaligeneraattoreissa ja mittalaitteissa sekä vahvistimissa ja kaiuttimissa. Naparuuviin voidaan kiinnittää yksi paljas kuorittu johto tai banaaniliitin, ja tarvitaan kokonaisuudessaan kaksi banaaniliittintä yhden kanavan signaalin siirtoon. Kuvassa 15 esitellään banaaniliittimen ulkomuoto. [1, s. 56.]



Kuva 15. Banaaniliitin [1, s. 56]

6.6 BNC-liitin

Monissa elektronisissa kytkennöissä, esimerkiksi radio-, video- ja äänitekniikassa käytettävä kuvan 16 Bayonet-Neill Concelman on koaksiaalinen liitin, jolla voidaan käsitellä korkeita radiotaajuuksia 3 GHz asti ja peräti 500 V:n jännitettä [1, s. 57].



Kuva 16. BNC-urosliitin [1, s. 57]

6.7 Moninapaliitin

Kun on tarve siirtää monta äänilinjaa yhdellä kaapelilla, käytetään moninapakaapelia, joka on kytketty kuvan 17 moninapaliittimiin. Liittimissä on kymmeniä nastoja, joka mahdollistaa useiden linjojen kytkemisen yhdellä liittimellä. [1, s. 57.]



Kuva 17. Moninapauros- ja -naarasliittimet [1, s. 58]

7 KAAPELIT

Eri signaalityyppejä kuljetetaan erilaisilla kaapeleilla, esimerkiksi instrumenttisignaalin ollessa korkeaimpedanssista ja matalajännitteistä ja vahvistinsignaalin ollessa matalaimpedanssista ja korkeajännitteistä niille sopivat erilaiset johdot [1, s. 59].

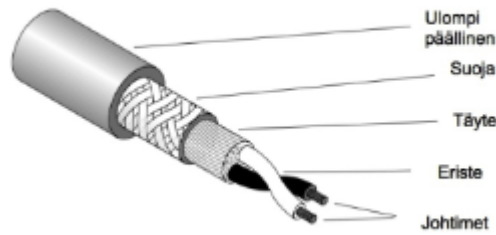
7.1 Mikrofonikaapeli

Mikrofonikaapelin rakenne on tyypillisesti kuvan 18 mukainen: siinä on kaksi johdinta, joista yhdessä kulkee kuumasignaali ja toisessa kylmäsignaali. Maadoittamiseen käytetään kaapelisuojaa. Mikrofonitasoisen signaalin jännite on matala, 0–20 mV, virta alle 10 μ A ja teho alle yhden mikrowatin, joten sen johtimet ovat ohuita (0,52 mm) ja koostuvat pienistä säikeistä. [1, s. 59.]

Jotta kaapelin johtimet olisivat lähempänä toisiaan, ne kieritetään toistensa ympäri, koska kahdesta johtimesta syntyy ”antenni”, joka on altis esimerkiksi loisteputkien aiheuttamille magneettisille häiriöille riippuen johtimien välisestä aukosta. Lisäksi parikierto parantaa häiriösuojausta ja tekee indusoituvista häiriöistä yhtenäisempiä ja suoja johtimiin kytkeytyviltä magneettisilta häiriöiltä; identtisten, mutta vastakkaispolaaristen häiriösignaalien magneettikentät kumoavat toisensa. [1, s. 59.]

Kaapelin suojalla on kolme yleisintä mallia: punottu-, spiraali- ja foliosuoja. Punottusuoja on kallis valmistaa, ja sen peitealue hieman rakoilee taivutettaessa, mutta se on kestävä. Spiraalisuojan venyessä siihen tulee aukkoja, mikä mahdollistaa häiriöiden indusoitumisen, mutta se on edullisempi ratkaisu ja kestää käsittelyä. Foliosuojalla on täysi kattavuuspinta-ala, mutta huono käsittelyn kestävyys. [1, s. 60.]

On olemassa myös nelijohtimisia mikrofonikaapeleita, jotka koostuvat kahdesta parikieritetystä johtimesta, jotka kieritetään toisiinsa. Käytettäessä kahta johdinta, yksi pari kuuma ja yksi pari kylmä, signaalien siirtoon sähkömagneettisten häiriöiden suojaus parantuu ja kaapelin induktanssi puolittuu, jolloin korkeat taajuudet siirtyvät sujuvammin. [1, s. 60.]



Kuva 18. Mikrofonikaapeli punotulla suojalla [1, s. 60]

7.2 Instrumenttikaapeli

Instrumenttitason signaali vaihtelee muutamista millivolteista kymmeneen volttiin, ja myös lähtöpään impedanssi voi olla kymmenistä ohmeista kilo-ohmeihin. Kaapelissa on kuvan 19 tapaan yksi johdin, joka kuljettaa äänilähteeltä tulevan signaalin ja suoja, joka toimii signaalin paluureittinä. Kaapelinsuojan ja johtimen välissä on käsittelyääniä vähentävä elektrostaattinen suoja. [1, s. 60–61.]

Johtimen paksuus ei vaikuta suuresti signaalin laatuun, koska kaapelin kuljetama virta on vain jotain milliampeereja. Yleisesti säikeisten johtimen paksuudet ovat välillä 1,02 mm – 0,51 mm. Kaapelin paksuus täytyy olla kuitenkin noin 6,3 mm, jotta se sopii plugi-liittimeen. [1, s. 61.]

Kaapelin kapasitanssi vaikuttaa huomattavasti signaalin laatuun, koska yhdessä lähtöpään impedanssin kanssa se muodostaa alipäästösuotimen, joka voi tehdä soittimen äänestä tunkkaista ja mutaista. Soitin kuulostaa sitä kirkkaammalta, mitä matalampi kapasitanssi, koska tällöin korkeat taajuudet kulkevat helpommin. Kitarakaapelit kannattaa pitää noin 5–7 metrin pituisina, koska kitaralla on korkeilla taajuuksilla suuri lähtöimpedanssi mikrofonien induktiivisuuden takia, jolloin pitkillä kaapeleilla korkeita taajuuksia häviää signaalista. Samasta syystä true-by-pass-ohituksen sisältävien kitarapedaalien käyttöä kannattaa välttää. Pedaali sisältää aktiivielektroniikkaa, joka muuntaa signaalin impedanssia päällä ollessaan ja, kun se astutaan kiinni, se ohittaa aktiivielektroniikan, mikä vaikuttaa ei-toivotulla tavalla korkeisiin taajuuksiin. Linjatasoisilla laitteilla, kuten mikserillä, on matala lähtöimpedanssi, jonka ansiosta niillä voidaan kuljettaa signaalia ongelmitta kymmeniä metrejä. [1, s. 61.]

Instrumenttikaapelin elektrostaattinen suoja pienentää käsittelyn aiheuttamia häiriöitä varastoimalla käsittelyn aiheuttamat jännitepurkaukset. Kaapelin johdin, eriste ja suoja muodostavat eräänlaisen kondensaattorin, joka vapauttaa jännitettä osuessaan kovaa maahan tai päälle astuessa, mikä kuuluu pamahduksena vahvistimesta elektrostaattisen suojan puuttuessa. [1, s. 61–62.]

Kaapelin suojan rakenne koostuu tyypillisesti samoin tavoin kuin mikrofoni-kaapelissa. Instrumenttikaapeli on epäsymmetrinen, joten hyötysignaalin myötä myös kaikki matkalla kytkeytyvät häiriöt vahvistuvat. Magneettisten häiriöiden vähentämiseksi kaapelin pitää olla mahdollisimman suora ja ylimääräisiä lenkkejä, kuten johdon kasaan pyöritystä tai kuljetuslaatikon kahvaan kieritystä tulisi välttää. [1, s. 62.]



Kuva 19. Instrumenttikaapeli [1, s. 62]

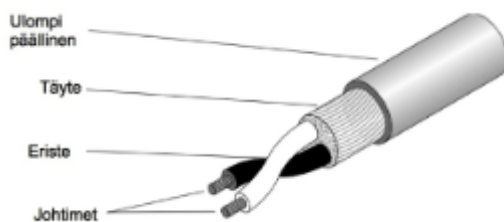
7.3 Kaiutinkaapeli

Kaiutinkaapelilla siirretään virtaa kaiuttimille päätevahvistimelta. Kaiutinkaapeli kuljettaa muutamia ampeereja, mikä on huomattavasti enemmän kuin mikrofoni- ja instrumenttikaapelien kuljettamat milliampeerit. Kaiutinkaapelin paksuuteen vaikuttaa pituus, lähtöimpedanssi ja se, kuinka paljon tehoa on varaa menettää. Esimerkiksi 16 ohmin vastusta kohti vahvistimelta saadaan virtaa puolet vähemmän kuin 8 ohmin vastusta vastaan. Kaapeli aiheuttaa signaaliin tehohäviöitä joka tapauksessa, mutta pienempi poikkipinta-ala vastustaa virran kulkua enemmän. Esimerkiksi 3,26 millimetriä paksu ja 15 metriä pitkä kaiutinkaapeli tuottaa 4 ohmin lähtöimpedanssilla 0,76 % tehohäviöitä ja 0,81 millimetrin paksuus aiheuttaisi signaalille peräti 7,74 % häviöt. [1, s. 62–63.]

Kaapelin paksuus ja pituus vaikuttavat myös vahvistimen kykyyn hallita kaiuttimien liikettä, mikä ilmenee erityisesti basson ja rumpujen äänenlaadussa. Tätä ilmiötä kutsutaan nimellä damping factor, ja lähtöimpedanssi vaikuttaa siihen suuresti. Esimerkiksi kun 200 damping factorin vahvistin, jolla on 4 ohmin lähtöimpedanssi kytketään, 3,61 millimetriä paksuun ja 15 metriä pitkään kaapeliin, saadaan damping factoriksi vain 39. Samalla kaapelilla, mutta 16 ohmin lähtöimpedanssilla on damping factor 156. [1, s. 63.]

Kuva 20 havainnollistaa kaiutinlinjojen rakennetta, ja niissä ei yleensä ole suojaa, kuten instrumentti- ja mikrofonikaapeleissa, koska kaiutintasoinen, matalaimpedanssinen signaali minimoi häiriöt. On suositeltavaa kuitenkin käyttää suojattua kaiutinkaapelia, jos mikrofonikaapeli ja kaiutinkaapeli joutuvat kulkemaan pitkiä matkoja rinnakkain. Asentamalla kaapelit johtavan putken sisään saadaan myös hyvä suojaus alueilla, joissa on erittäin vahvoja radiotaajuisia tai elektromagneettisia häiriöitä, jotka voisivat muutoin päästä tunkeutumaan suojaamattomiin kaiutinkaapeleihin. [1, s. 63.]

Kaiutinkaapelin kannattaa siis omata suuri poikkipinta-ala ja olla mahdollisimman lyhyt, mistä syystä vahvistimet yleensä sijoitetaankin lähelle kaiuttimia. Linjatason signaalia voidaan kuljettaa pitempiä matkoja haitatta, jolloin vältetään tehohäviöitä. [1, s. 63.]



Kuva 20. Kaiutinkaapeli [1, s. 63]

7.4 Optinen valokuitukaapeli

Digitaalista ääntä on mahdollista siirtää sähköisesti kuparia pitkin ja valona optisen kuitukaapelin avulla samankaltaisesti kuin analogista audiota. Impedanssilla on vaikutusta, ja pitkiä kaapelivetoja kannattaa välttää, koska kaapelin vastus aiheuttaa räpsyjä äänessä ja matalan tason kohinan. Lisäksi valoksi

muunnettu ääni hajoaa kaapelissa, jolloin signaalin tarkkuus heikkenee. [1, s. 65.]

Kuluttajatasolla käytetään S/PDIF-standardia, jolloin digitaalista signaalia kuljetetaan koaksiaalisella 75 ohmin kaapelilla, joissa on RCA-liittimet. On olemassa optinen muunnelma, jossa käytetään JIS F05-liittimiä ja kuitukaapelia. Kyseistä kuvan 21 kaapelia kutsutaan usein Toslink-kaapeliksi. [1, s. 65.]

Optista valokuitukaapelia käytetään digitaalisen signaalin siirtoon ammatti-audiossa ja kodin elektroniikassa. Toshiba esitteli kaapelin markkinoille ensimmäisenä, ja siksi JIS F05-liitintä käyttäviin kaapeleihin viitataan yleensä nimellä Toslink. [1, s. 65.]

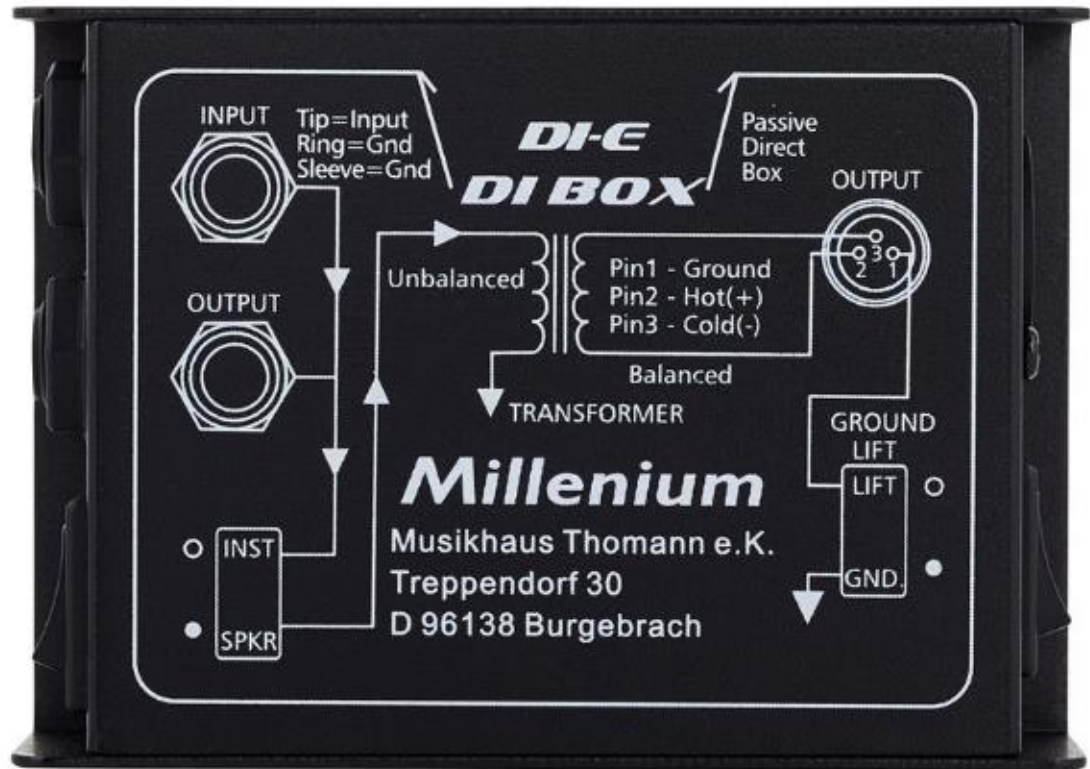


Kuva 21. Toslink-kaapeli [1, s. 65]

8 DI-BOXI

DI-boxin avulla korkeaimpedanssinen balansoimaton signaali saadaan muutettua matalaimpedanssiseksi balansoiduksi signaaliksi, jolloin siitä ulos tuleva signaali voidaan yhdistää etuasteeseen. DI-boxista on passiivi- ja aktiivimalleja. [5]

Testauksissa DI-boxina toimi kuvan 22 passiivinen Millenium DI-E DI box.



Kuva 22. Millenium DI-E DI Box [6]

8.1 Passiivinen DI-boxi

Kuvan 23 mukainen Passiivinen DI-boxi muuntaa impedanssin ja balansoi signaalin muuntajalla, jonka avulla sisäänmenolle ja ulostulolle tehdään sähköinen erotus. Lisäksi voidaan katkaista kytketyn laitteen ja äänipöydän välinen galvaaninen yhteys ground-lift-kytkimellä. DI-boxeissa on suuria hinta- ja laatueroja lähinnä muuntajan laadusta riippuen. [5.]



Kuva 23. Radial JDI passiivinen DI-boxi [7]

8.2 Aktiivinen DI-boxi

Aktiiviset DI-boxit ovat usein elektronisesti balansoituja, mutta hintavammissa malleissa voi olla myös muuntaja. Nämä kuvan 24 tyyppiset muuntajattomat DI-boxit käyttävät operaatiovahvistimia tuottaakseen ”kelluvan” balansoidun ulostulon, mutta eivät tee täydellistä galvaanista erotusta. DI-boxin ja äänipöydän välinen maajohdin voidaan erottaa ground-lift-ominaisuudella, kuten passiivisessa mallissa. Aktiiviset elektroniikkakomponentit tarvitsevat toimiakseen virtaa, joka saadaan yleensä patterista tai äänipöydän kaapelissa kulkevasta 48 voltin phantom-jännitteestä. [5.]



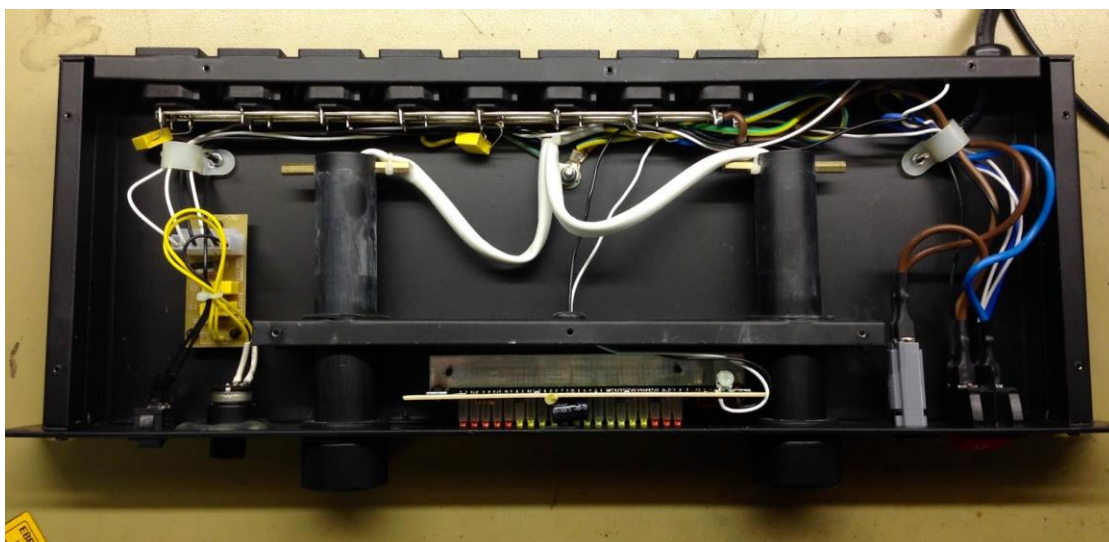
Kuva 24. Radial J48 aktiivinen DI-boxi [8]

9 JÄNNITTEENTASAAJA

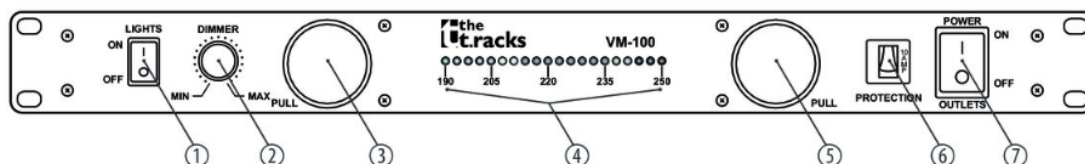
Jännitteentasaajan avulla saadaan syötettyä tasainen jännite useaan laitteeseen yhdestä lähteestä, ja lisäksi se sisältää häiriösuodatuksen sekä ylijännitesuojauksen.



Kuva 25. The t.racks VM-100 Voltage Meter jännitteentasaajan etupaneeli [9]

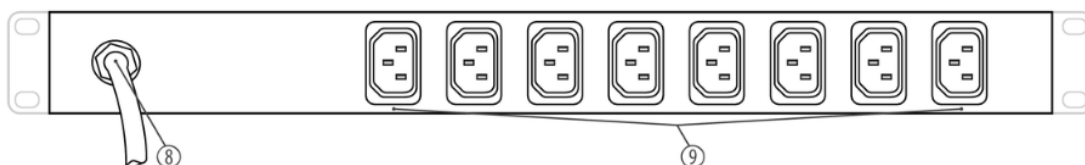


Kuva 26. The t.racks VM-100 Voltage Meter sisusta [10]



1	LIGHTS Rack illumination switch.
2	DIMMER Stepless dimmer control for rack illumination.
3, 5	Extensible rack lights. Briefly push on the round cover, then pull out the rack light and adjust the light beam as desired.
4	Indicates the currently available mains voltage in a range of 190 V...250 V.
6	PROTECTION Resettable fuse for the power supply outlets on the rear panel.
7	POWER OUTLET On / off switch for the power supply outlets on the rear panel.

Kuva 27. Etupaneelin ominaisuudet [11]



8	Mains cable.
9	IEC chassis sockets to supply up to eight devices.

Kuva 28. Takapaneelin ominaisuudet [11]

Kuvassa 25 ja 26 nähtävä toimeksiantajan jännitteentasaaja the t.racks VM-100 Voltage Meter sisältää kuvien 27 ja 28 mukaisesti säädettävän etupaneelin valaistuksen, jännitetason mittauksen LED:ien ilmoittamana, 8 IEC ulostu-

loa, 10 ampeerin sulakkeen, joka suojaa ulostuloja, sekä kytkimen, jolla saadaan katkaistua kaikkien ulostulojen virta. Syötöksi jännitteentasaajalle käy 220–240 V, 50/60 Hz vaihtovirta ja sen tehonkestoisuus on 2200 W. [11.]

Toimeksiantaja on kokenut ajoittain jännitteen epätasaisuudesta johtuvia ongelmia erilaisissa äänentoistoympäristöissä keikoilla soittaessa. Ongelmat esiintyvät lähinnä syrjäisillä paikoilla, joilla jännitevaihtelut aiheuttavat toiston laadun heikkenemistä erityisesti digitaalisissa instrumenteissa ja efekteissä. Toimeksiantaja on kokenut projektin yhteydessä hankitun jännitteentasaajan parantaneen äänenlaatua toivotulla tavalla live-esiintymistilanteissa isohkolla lavalla.

Jännitteentasaajalla on vaikutusta tehonsyötön tasaisuuteen vain jouduttaessa kytkemään laitteet huonolaatuiseen sähkönsyöttöön, minkä takia sen hyödyt eivät ilmenneet tehdyissä testauksissa, mutta syöttämällä kaikille laitteille virta sen kautta saadaan maalenkin syntyminen estettyä.

10 TESTAUKSET

Ohjaavan opettajan avustuksella koulun labran välineitä ja toimeksiantajani tarjoamaa kalustoa käyttämällä tein testejä, jotka selvittivät häiriöitä estävien laitteiden toimintaa ja vaikutuksia.

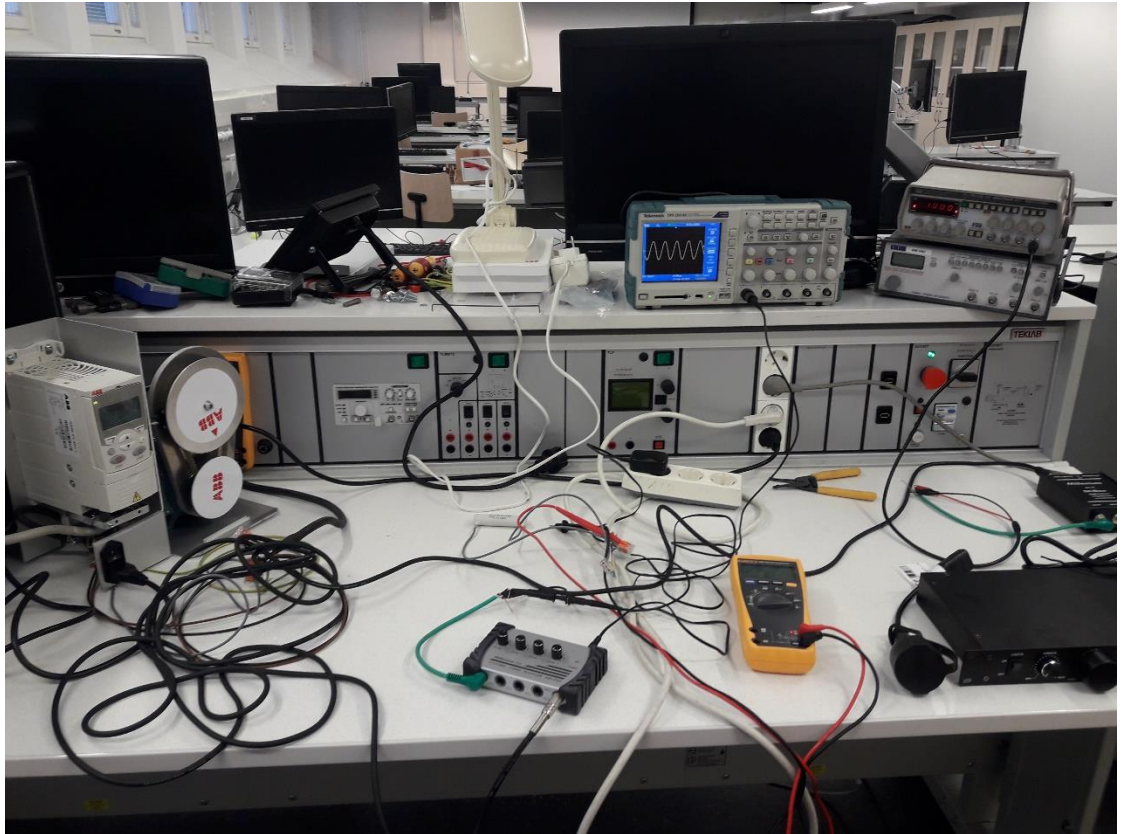
10.1 Ympäristöhäiriöt DI-boxissa

Kuvissa 29–40 esitetään, kuinka testasimme ympäristön häiriöiden vaikutusta DI-boxin kautta vahvistimeen kytkettyyn signaaliin oskilloskoopin, signaali-generaattorin (kuva 29) ja häiriölähteenä toimivan taajuusmuuttajaan kytketyn moottorin avulla. Koe simuloi kapasitiivista häiriökytkeytymistä DI-boxin ja vahvistimen väliseen signaalikaapeliin. Signaali generaattorilta DI-boxiin saatiin yhdistämällä hauenleuat vihreän johdon johtimiin (kuva 31). Sitten signaali kulki DI-boxilta vahvistimeen pitkällä mustalla johdolla, jonka XLR-liitin oli kytketty DI-boxiin ja stereoplugi vahvistimen sisään tuloon (kuvat 31 & 32). Vahvistimen signaali vietiin oskilloskooppiin kytkemällä vihreän johdon johtimet oskilloskoopin mittapäähän (kuva 33). Häiriölähteenä toimi taajuusmuuttajaan kytketty moottori (kuva 38), joiden välinen kaapeli oli avattu, jotta se säteilisi

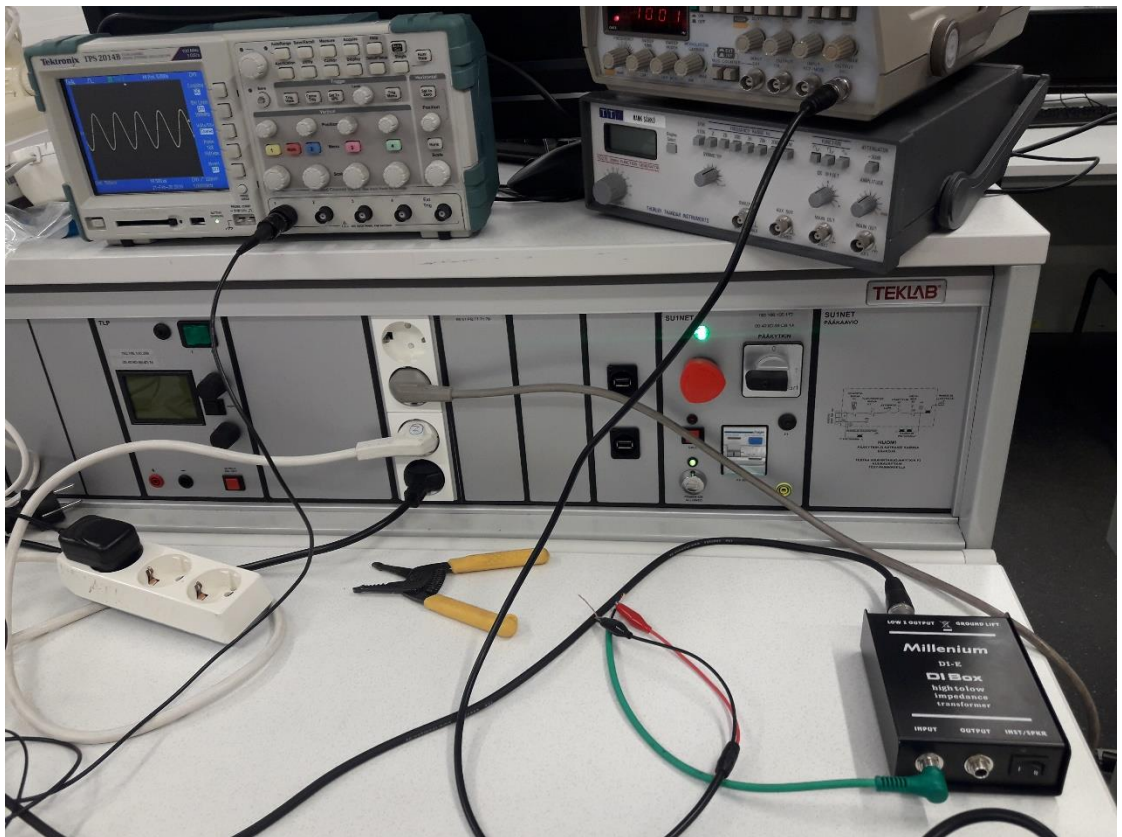
verkkotaajuushäiriöitä käynnissä ollessaan sen vierellä kelalla olevaan mustaan signaalikaapeliin (kuva 32). Taajuusmuuttajan ollessa käynnissä signaaligeneraattorin tuottamaan puhtaaseen siniaaltoon tuli oskilloskoopissa havaittavia häiriöitä, kun signaalikaapeli oli erotettu maasta DI-boxin ground lift-ominaisuudella. Kun galvaanista erotusta ei käytetty, ympäristöhäiriöllä ei ollut merkittävää vaikutusta, koska maadoitus oli kunnossa.



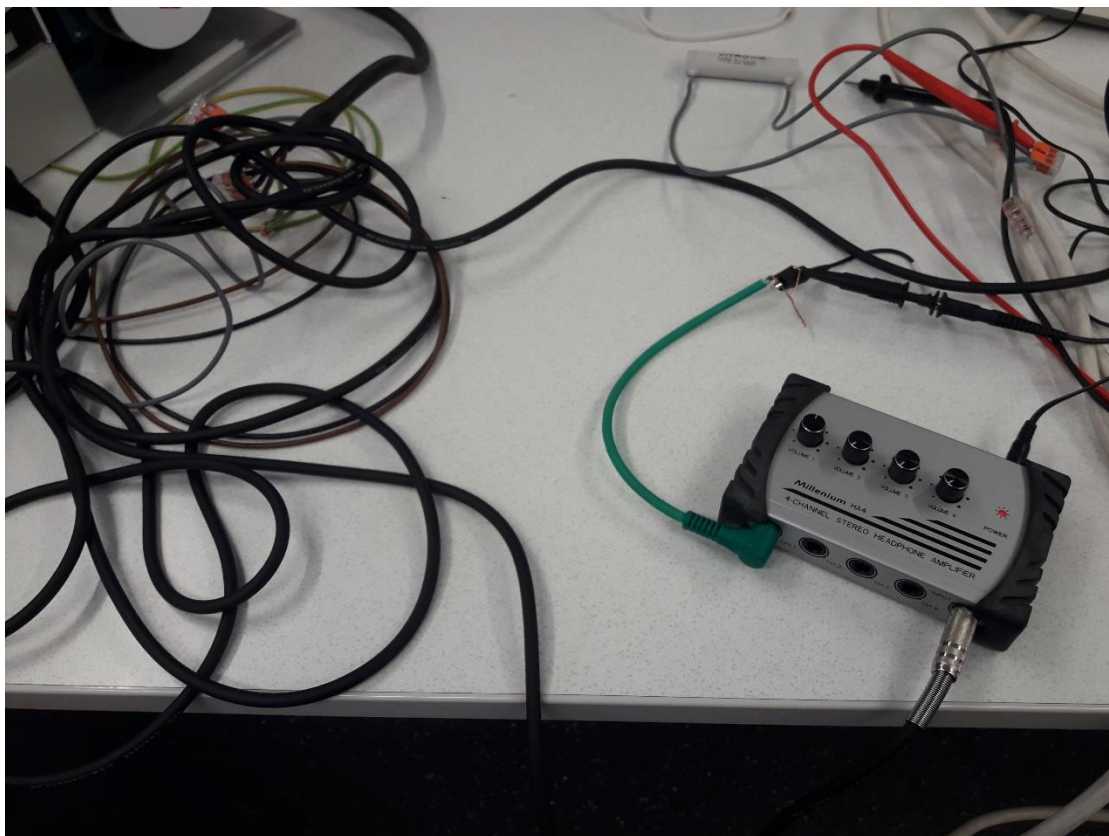
Kuva 29. Signaaligeneraattori



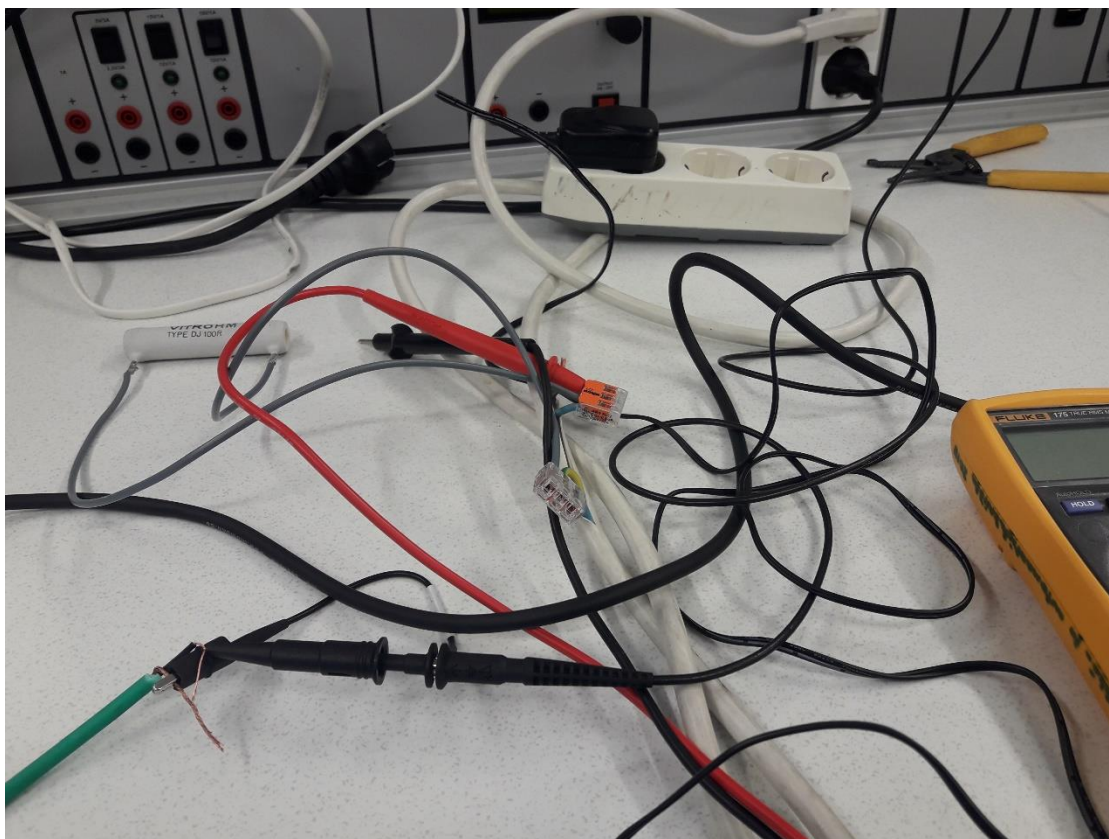
Kuva 30. DI-boxin testaus kokonaiskuva



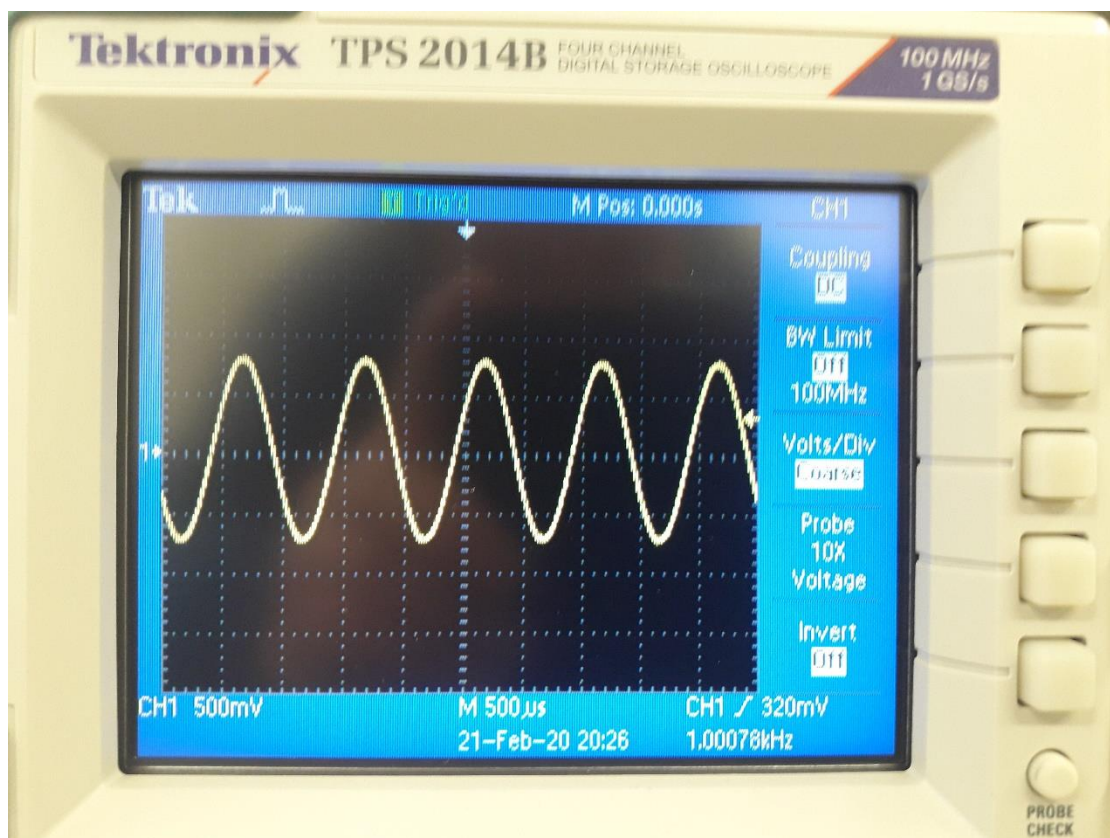
Kuva 31. Signaalin syöttö DI-boxiin



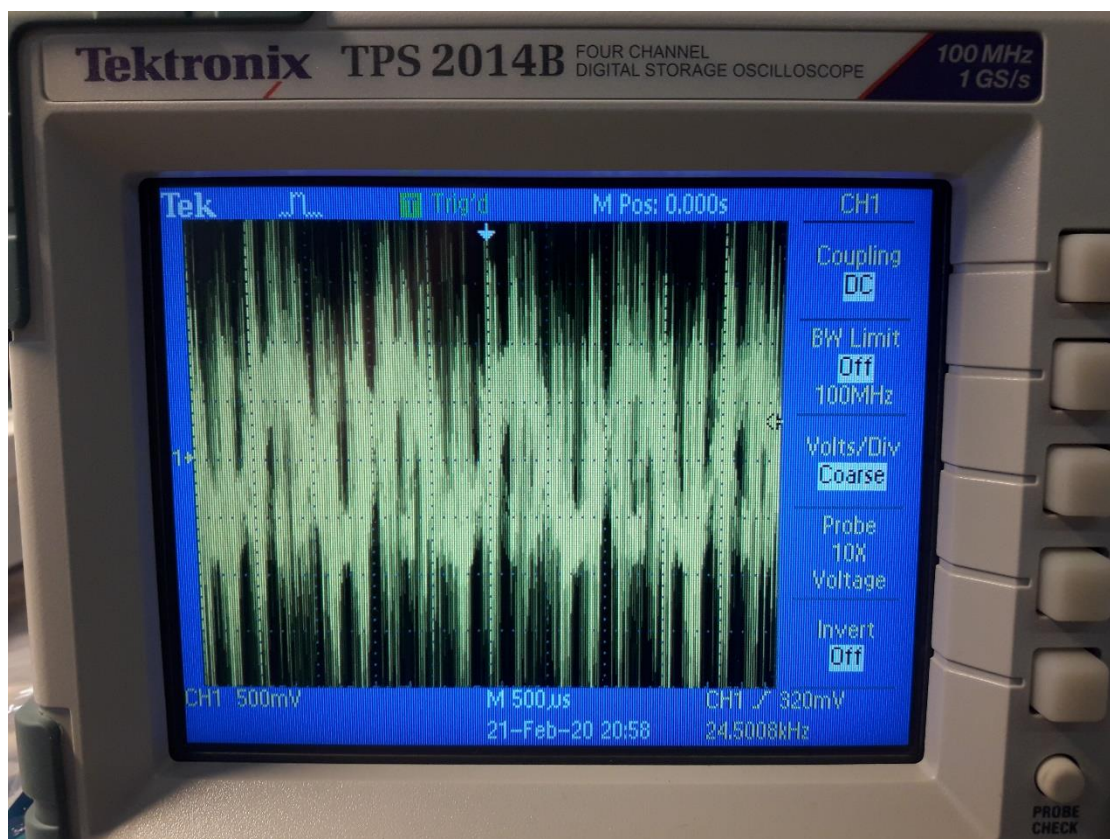
Kuva 32. Signaalikaapeli vyyhdillä häiriölähteen vieressä



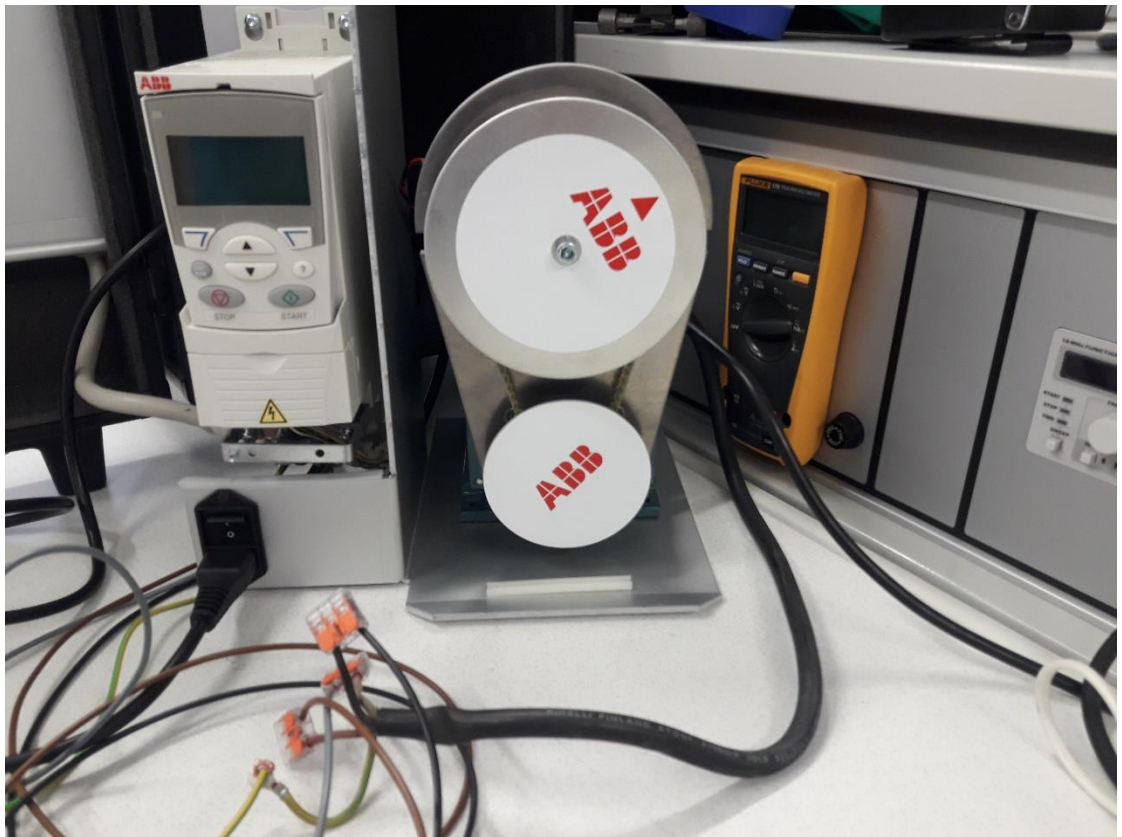
Kuva 33. Vahvistimen signaali oskilloskooppiin



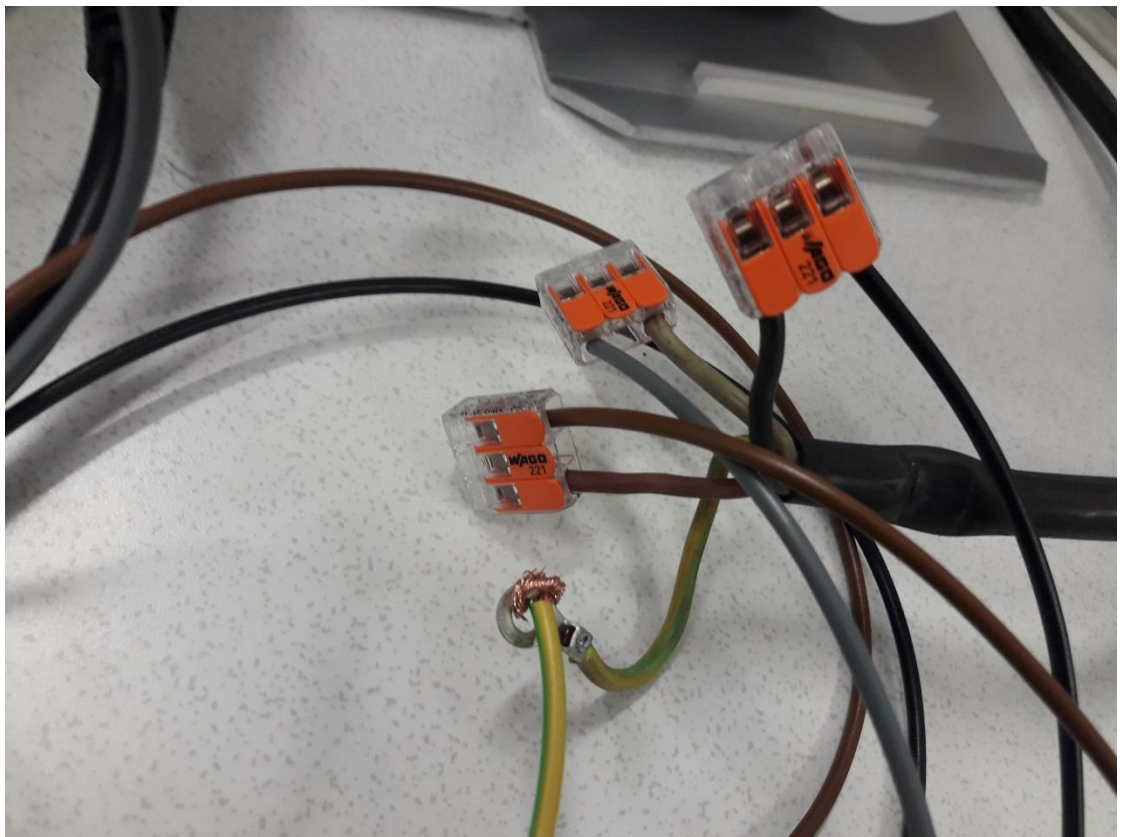
Kuva 34. Oskilloskooppikuva signaalista taajuusmuuttajan ollessa sammuksissa



Kuva 35. Oskilloskooppikuva maasta erotetusta signaalista taajuusmuuttajan käydessä



Kuva 36 Häiriölähteenä toimi taajuusmuuttajaan kytketty moottori



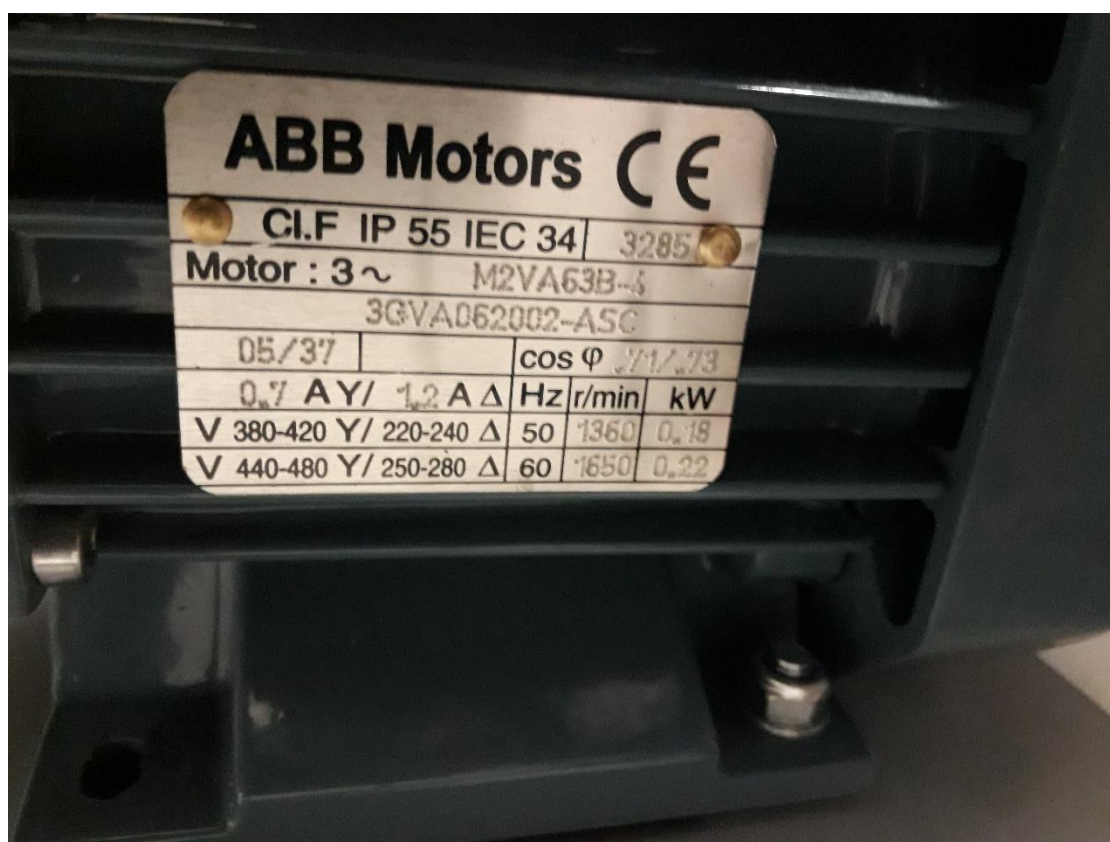
Kuva 37 Taajuusmuuttajan ja moottorin välinen kaapeli avattuna



Kuva 38 Taajuusmuuttajan ohjauspaneeli



Kuva 39 Taajuusmuuttajan arvokilpi

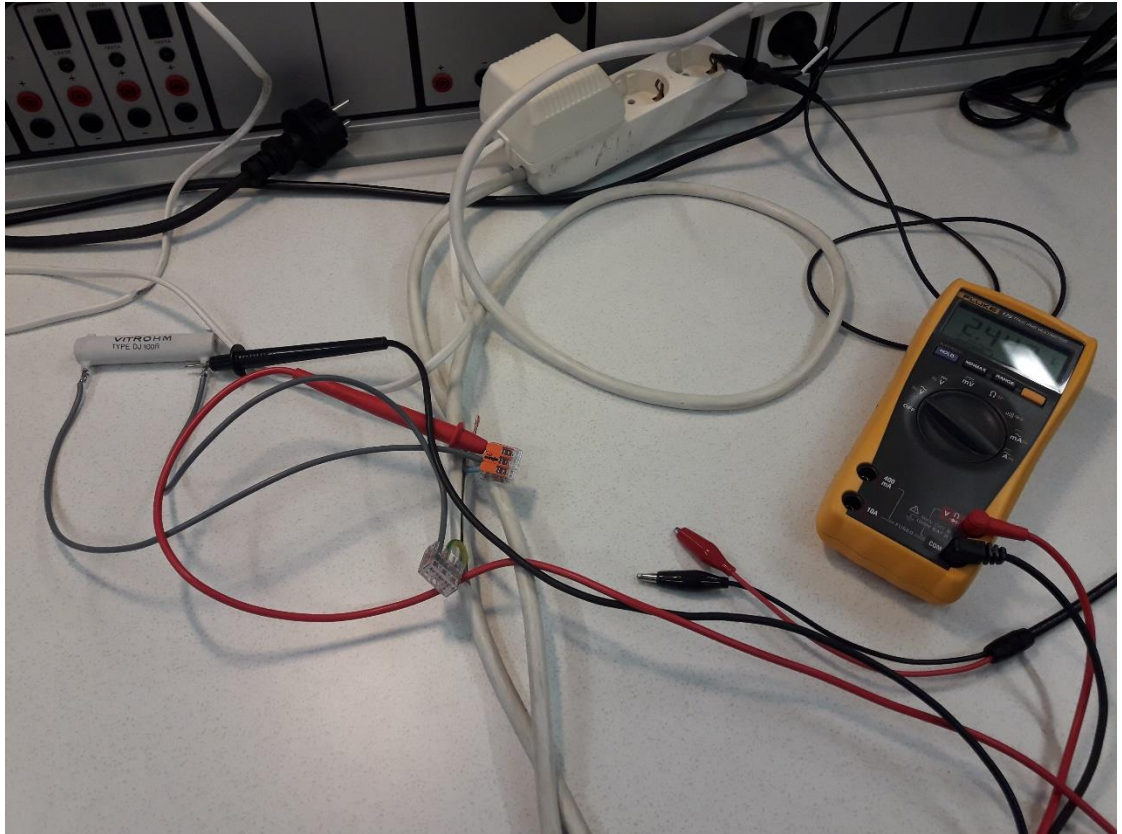


Kuva 40 Moottorin arvokilpi

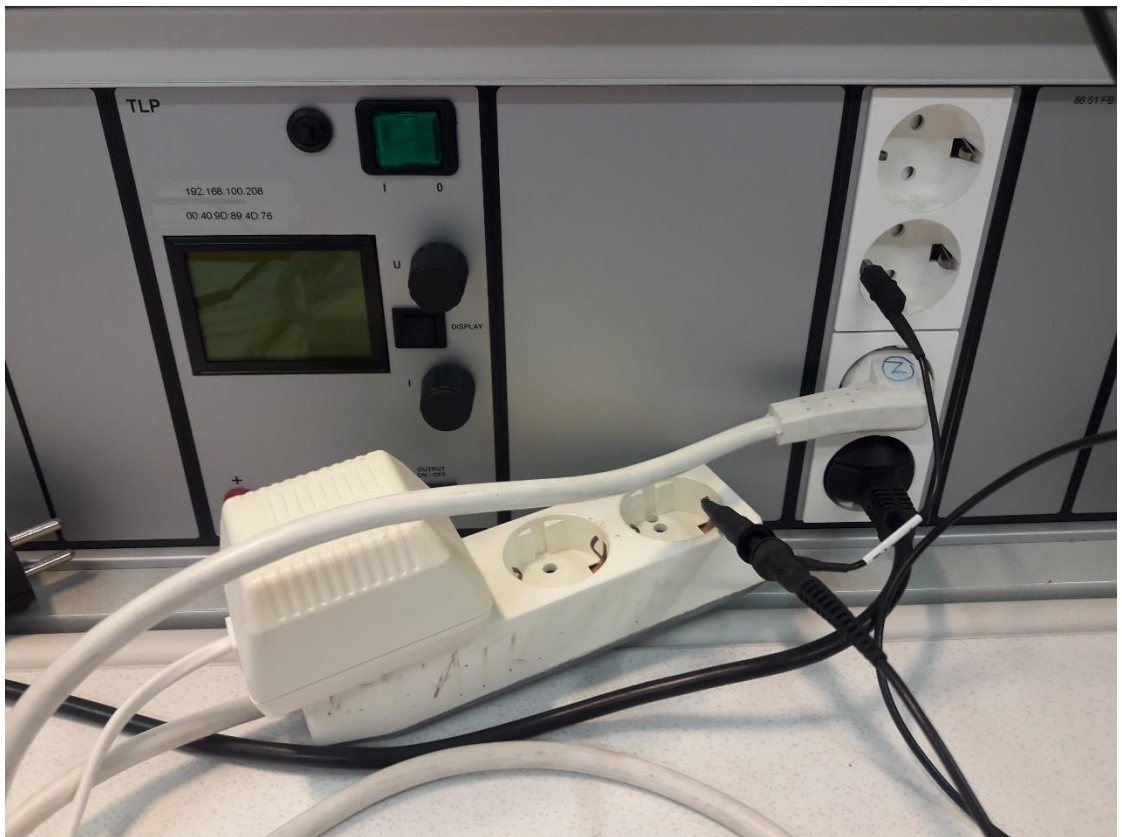
DI-boxi on heikko ympäristön häiriöille ground liftatessa, koska häiriö jää signaali-kaapeliin kimpoilemaan eikä pääse poistumaan maata pitkin, vaikka näin eliminoidaisiinkin maadoituksen potentiaalierosta johtuvat hurinat. On tärkeää ottaa huomioon myös kaapeleiden sijoitus ja kokonaisuus hurinanpoistoa miettiessä. Kyseisessä tilanteessa olisi välttytty galvaanisen erotuksen aikana kapasitiivisen kytketymisen häiriöiltä välimatkaa kasvattamalla tai maadoitukseen kytketyllä suojaputkella. Ilman DI-boxin kykyä torjua resistiivisen kytketymisen häiriöt puolestaan kunnollinen potentiaalintasaus poistaisi maadoituksen häiriövirrat.

10.2 Potentiaalieron aiheuttama jännite

Havainnollistimme potentiaalieron aiheuttamaa jännitettä muokatun jatkojohdon, mittarin ja oskilloskoopin avulla kuvien 41–50 mukaisesti. Kun jatkojohdon päässä, johon kuormana toimiva lamppu oli kytketty, yhdistettiin nolla- ja maadoitusjohdin (kuva 47), kulki lampun nollajohtimen jännite maadoitusjohtimeen. Mittarilla mitattiin jatkojohdon välille kytketyn vastuksen yli kulkeva jännite (kuva 41) ja oskilloskooppi oli kytketty jatkojohdon ja pistorasian maiden välille (kuva 42). Lampun ollessa päällä sen nollajohtimen jännite kulki maadoitusjohtimeen aiheuttaen potentiaalieron jatkojohdon ja mittauspöydän maiden välille. Kyseinen tilanne simuloi maalenkin potentiaalieron aiheuttaman jännitteen kytketymistä signaalipiiriin.



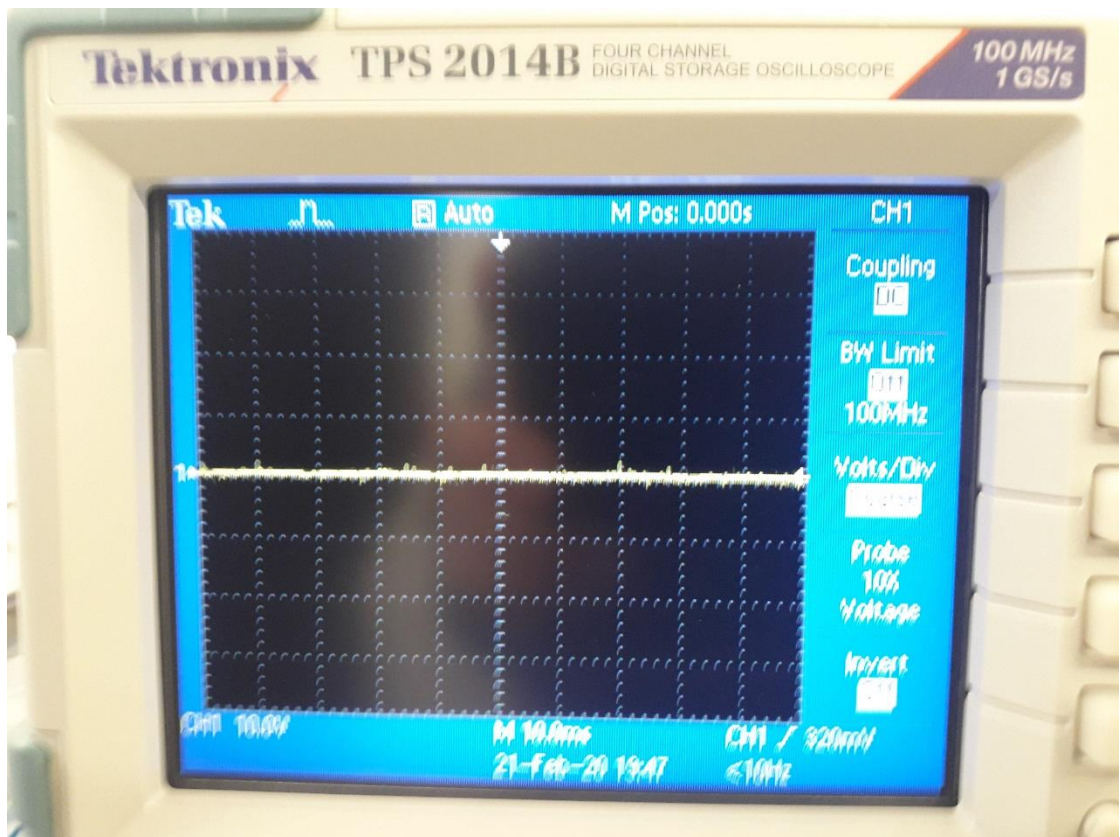
Kuva 41. Potentialieron jännite mitattiin vastuksen yli



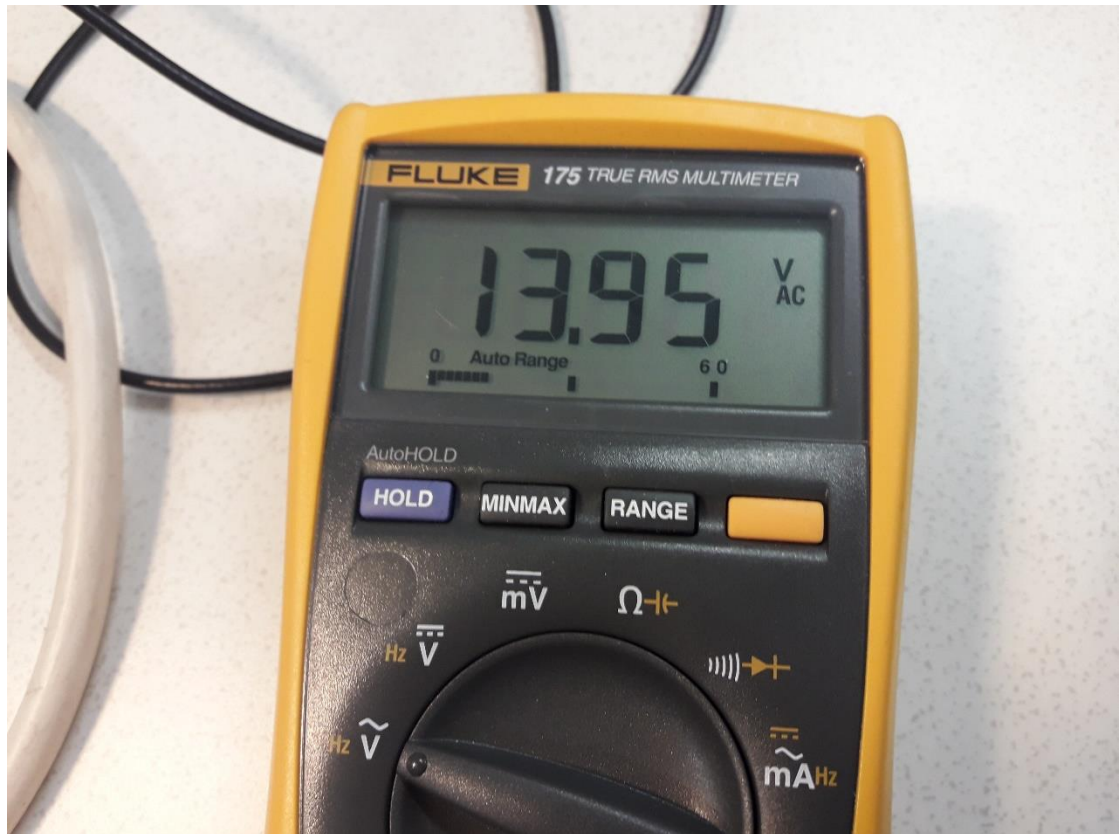
Kuva 42. Oskilloskoopin mittapääät laitettiin muokatun jatkojohdon ja testipöydän pistorasian maiden välille



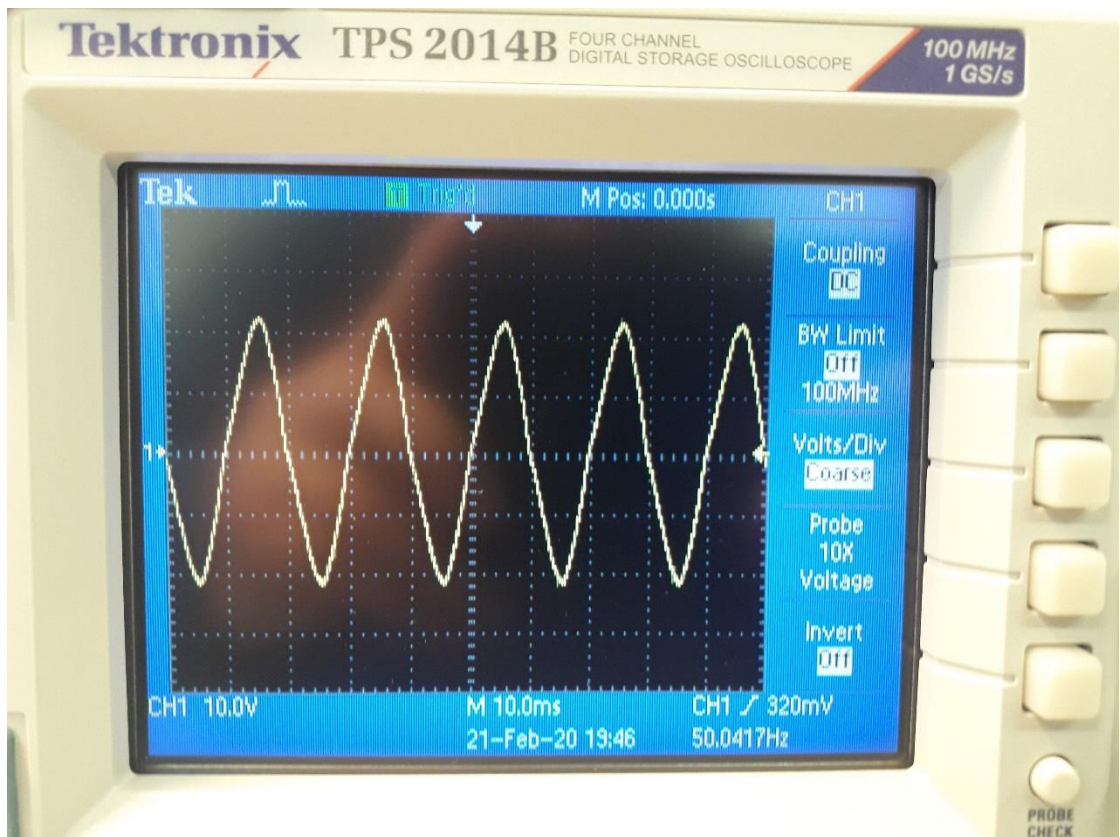
Kuva 43. Potentiaalieron jännite ilman kuormaa



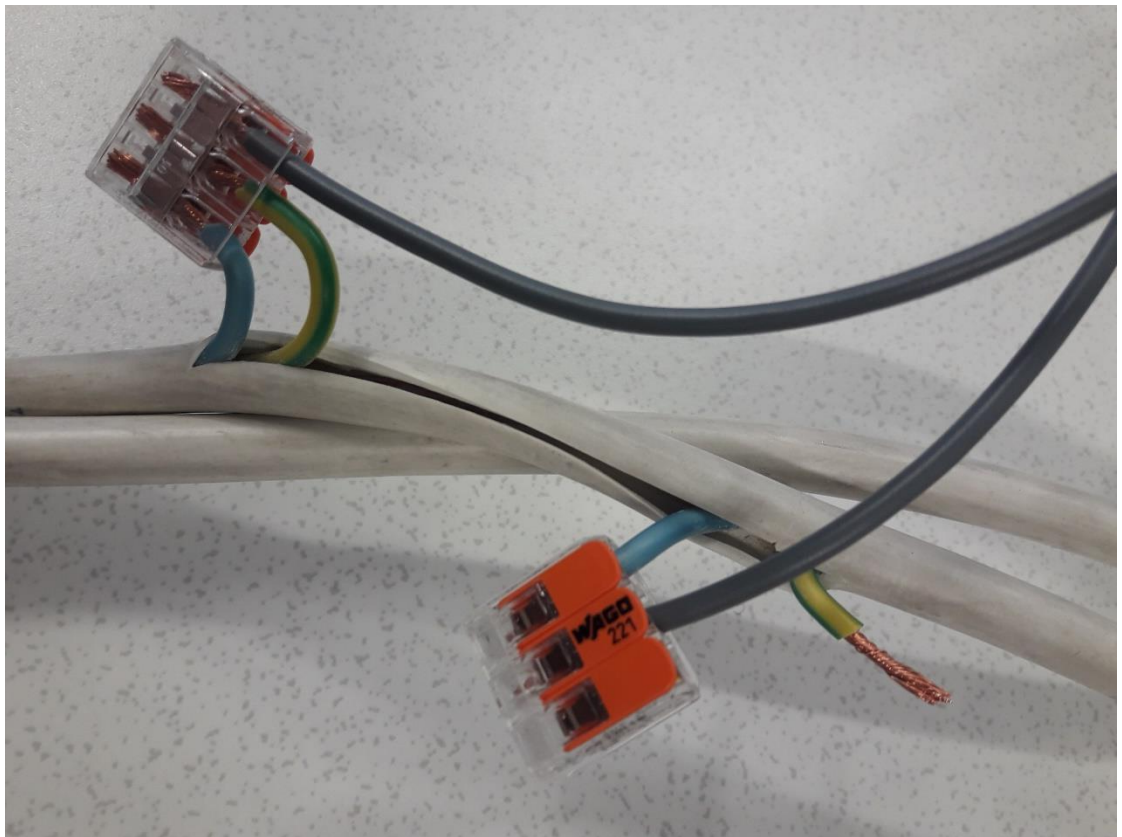
Kuva 44. Oskilloskooppikuva signaalista ilman potentiaaliero



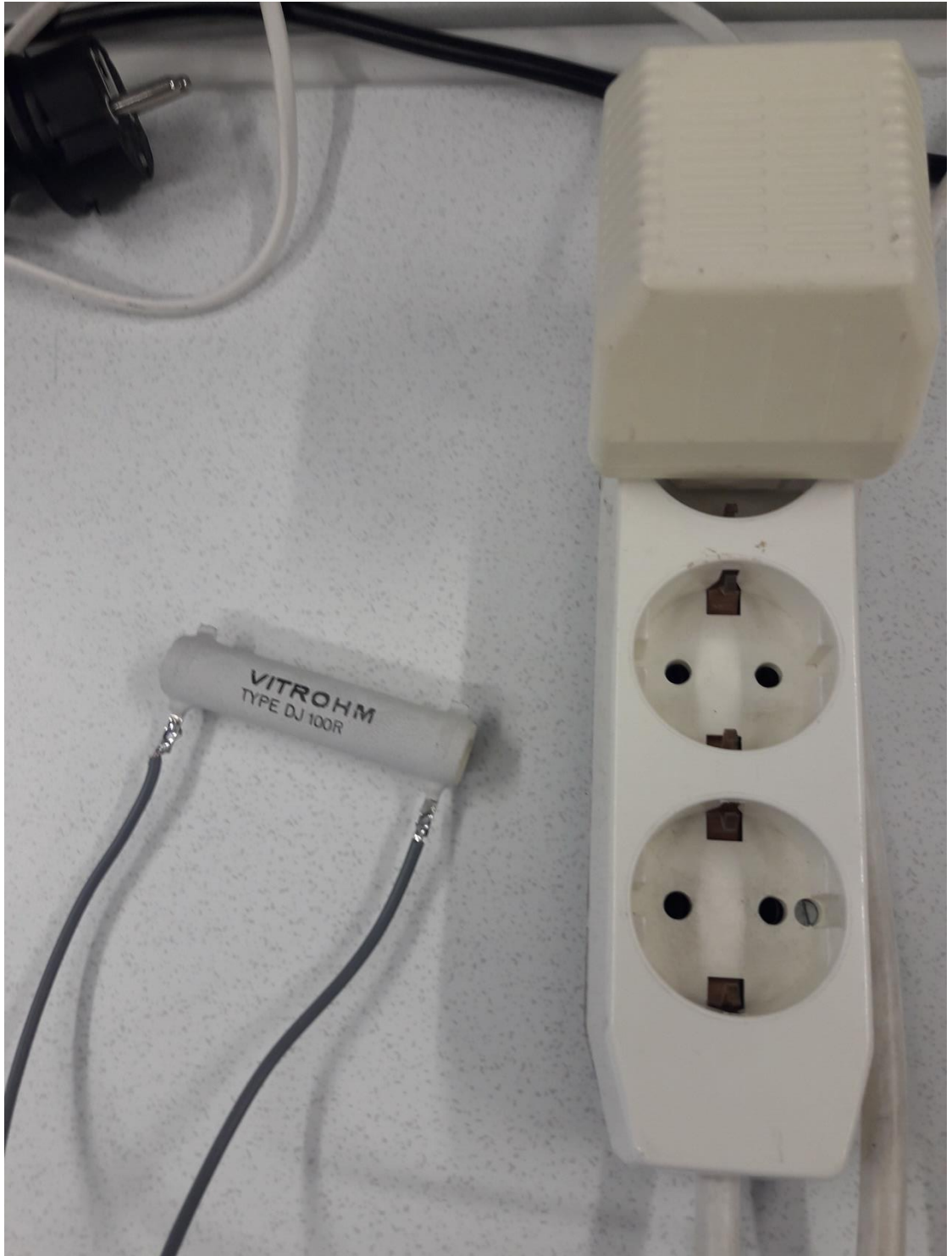
Kuva 45. Potentiaalieron jännite kuormalla



Kuva 46. Oskilloskooppikuva 14V potentiaalierosta



Kuva 47. Jatkojohdon toisen pään maa- ja nollajohdin yhdistettiin, jotta vastuksen yli kulkeva jännitehäviö päätyisi maahan aiheuttaen potentiaalieron.



Kuva 48. 100 ohmin vastuksen yli kulkeva kuorma aiheutti jännitehäviön kulkemisen maahan.



Kuva 49. Kuormana toimivan valaisimen muuntaja



Kuva 50. Kuormana toimivan valaisimen lamppu

Potentiaalieron aiheuttama jännite on torjuttavissa esimerkiksi DI-boxin galvanisella erotuksella tai potentiaalintasauksella.

11 STUDIOON HÄIRIÖT

HTL-recordsin studiolla ilmeni vaimeaa hurinaa ja kohinaa, jonka poistaminen oli yksi päätehtävistäni. Kitarana käytettiin Gibson Flying V:tä kaksikelaisilla

humbucker-mikrofoneilla (kuva 52). Humbucker koostuu kahdesta vierekkäin olevasta sähköisesti sarjaankytketystä yksikelaisesta mikrofoniasta, joista toisen magneetit on asennettu vastakkaisnapaisesti. Näin kitarankieliin indusoidut hurinasignaalit kumoavat toisensa samalla periaatteella kuin balansoidussa äänikaapelissa, mutta äänisignaalit vahvistavat toisiaan [12]. Testivahvistimena toiminut Music Man 112 RD Sixty five (kuva 51) oli itsessään täysin hiljainen myös kitaroihin kytkettynä. Digitech RP7 -putkietuaste pedaaliin (kuva 53) kytkettäessä esiintyi kohinaa ja hurinaa. Jännitteentasaajan kautta syötettynä pedaalin kohina hävisi ja äänen dynamiikka parantui, mutta hurina säilyi. DI-boxin lisääminen kitaran ja vahvistimen väliin myös poisti kohinan. DOD-pedaalien virransyöttömuuntajien irrottaminen sähköistä kokonaan poisti hurinan täysin. Paikallistimme häiriön yhteen pedaalin 9 voltin AC/DC-muuntajista (kuva 54).



Kuva 51. Vahvistimena Music Man 112 RD Sixty five, 65W:n teho putkipäätevahvistimella (valve/tube) ja transistori etuasteella (solid) eli ns. hybridivahvistin.



Kuva 52. Testeissä käytetty Gibson Flying V kaksikelaisilla humbuckereilla.



Kuva 53. Studiotestin pedaalisysteemi koostui Digitech RP7 Valve -multiefektipedaalista, DOD FX50B Overdrive Plus -säröpedaalista ja DOD FX80B Compressor Sustainer -kompresoripedaalista.

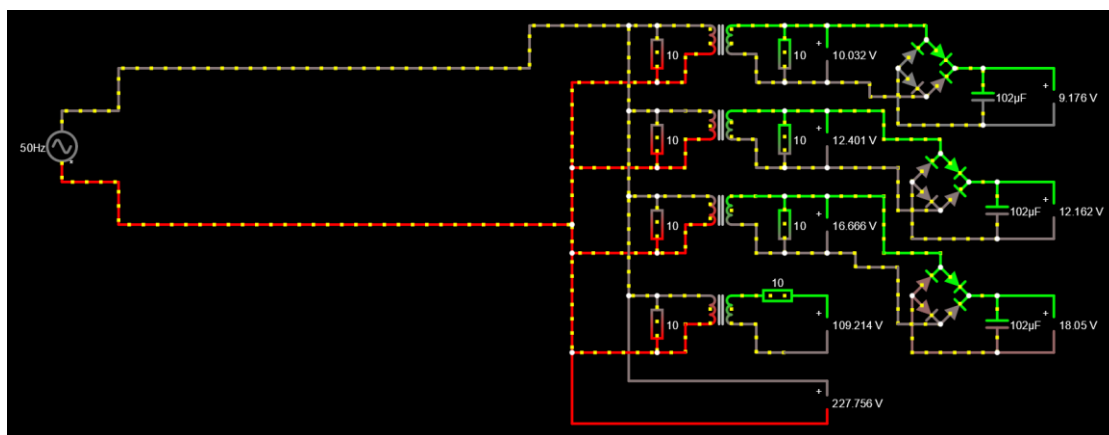


Kuva 54. Särö- ja kompressoripedaalin muuntajat, jonka pois kytkeminen verkosta eliminoi myös muita laitteita vaivanneen perushurinan.

Yllättäen kuvan 54 muuntaja aiheutti järjestelmän äänentoistoon ei-toivotun hurinan ollessaan pistorasiaan kytkettynä todennäköisesti viallisen maadoituksen takia. Toinen vastaava identtinen muuntaja ei aiheuttanut ongelmia.

12 APULAITEPROJEKTI

Tehtyjen testausten ja toimeksiantajan studion häiriöiden aiheuttajan löytämisestä saadun tiedon perusteella päätimme, ettei toimeksiannon kokonaisvaltaiselle apulaitteelle (kuva 55) oikeastaan ollutkaan tarvetta, koska markkinoilla jo olevat laitteet poistivat ongelmat tarpeeksi tehokkaasti, mutta kehitte-
lin ideaa teoriapohjaisesti miettien, minkälainen laite olisi voinut olla ja miten hurinat saisi täysin poistettua. Jotta laitteen avulla voitaisiin saada syöttösähkö kaikille keikalla käytettäville varusteille kerralla ja audiosignaali kulkemaan häiriöttömästi sekä "amerikkalaisella" että "eurooppalaisella" standardilla, siinä täytyisi olla jännitemuuntoja ja noin kolmen kilowatin tehoisuus. Laite siis sisältäisi jännitteen vakautuksen ja muunnon 50 Hz, 230 V \rightarrow 60 Hz, 110 V sekä pedaaleita varten muunnokset 230 VAC \rightarrow 9 VDC, 230 VAC \rightarrow 12 VDC, 230 VAC \rightarrow 18 VDC. Ideana olisi syöttää kaikille vahvistimille ja varusteille tasainen ja laadukas sähkö apulaitteen kautta, jonka metallinen runko olisi maadoitettu, jolloin maalenkkejä ei syntyisi ja potentiaalintasaus toteutuisi. Lisäksi, kun käytettäisiin parikierrettyä balansoitua signaalikaapelia ja suojattaisiin johtimet maadoitetulla putkella, olisi systeemi täysin suojattu myös induktiiviselta ja kapasitiiviselta kytkeytymiseltä.



Kuva 55. Falstadilla simuloitu piirikaavio toimeksiannon apulaiteprojektin toimintaperiaatteesta. Laite sijoitettaisiin maadoitettuun metallikuoreen. Katso liitteet.

Projektin ja tutkimusten edetessä todettiin, että toimeksiannossa esillä olleita toimintoja sisältävät laitteet ovat saatavilla erillisinä osina vähittäismyynnistä, mutta niistä ei löytynyt kaikkia toimintoja yllä esitetyn mukaisena kokonaisuutena. Lähinnä tutkittavista laitteista tarpeet tyydyttävä oli **Voodoo Lab Pedal Power 2 Plus**, jonka AC ulostulon virtateho (230 VAC, 200 W) oli riittämätön

suunniteltuun tehotarpeeseen (3 kW) verrattuna ja Amerikan suoratuontiputkivahvistimelle 110 VAC ulostulo puuttui. Tässä vaiheessa projektia todettiin, ettei laitteen fyysinen rakentaminen olisi mielekäästä projektin kustannus- ja aikarajat huomioon ottaen, koska vain sarjatuotannolla voitaisiin päästä kohtuullisiin laitteen yksikkökustannuksiin.

13 YHTEENVETO JA OHJELISTA

Ensimmäiseksi kannattaa katsastaa äänijärjestelmän verkkovirran laatu ja sitten tarkastella laitteiden kytkentöjä ja kaapelointeja. Verkkohäiriöiden välttämiseksi tehokkainta on saada laitteistolle oma sähkönsyöttö mahdollisimman aikaisesta vaiheesta, parhaassa tapauksessa suoraan sähkökeskuksesta. Erillisen sähkönsyötön avulla vältetään esimerkiksi valaistusten ja kodinkoneiden kytkentäpiikkien aiheuttamilta häiriöiltä. Jos oma sähkönsyöttö ei ole mahdollista, suojaerotusmuuntajien tai muun galvaanisen erotuksen avulla saadaan verkkoon kytkeytyneet häiriöt suodatettua.

Radiotaajuushäiriöiden yleistyessä ja täten tähtiverkkomaadoituksen vanhen tuessa paras ratkaisu häiriövirtojen pienentämiseksi on kokonaan balansoitu järjestelmä yhdistettynä silmukoituun potentiaalintasausverkkoon. Potentiaalintasauksen avulla saadaan häiriövirrat niin pieniksi, etteivät ne aiheuta merkittäviä ongelmia. Jotta potentiaalierot pienenevät ja häiriöt eivät pääse kytkeytymään maadoitusverkosta signaalipiiriin, on laitteiden kytkentöjen ja kaapelointien oltava kunnossa.

Balansoimattomien laitteiden käytön ollessa välttämätöntä ne tulisi erottaa galvaanisesti muusta järjestelmästä maadoitusverkon puhtaana pitämiseksi ja häiriövirtojen signaalipiiriin kytkeytymisen estämiseksi esimerkiksi DI-boxin avulla tai käyttämällä muokattuja kaapeleita.

Induktiivisen ja kapasitiivisen häiriökytkeytymisen välttämiseksi kaapeliylitykset tulee tehdä kohtisuoraan ja sähkönsyöttö- ja äänisignaali johdot pidettävä erillään. Välimatkan kasvattamisen ollessa mahdotonta balansoitu parikierretty kaapeli kumoaa induktiivisen magneettikentän aiheuttamat häiriöt ja asentamalla johtimet maadoitettuun suojaputkeen estytään kapasitiivisen sähkökentän häiriöiltä.

Ohjelista esimerkiksi keikkasetin kasaamiseksi:

- Tuo äänilaitteistolle virta muista laitteista erillään olevasta sähkönsyötöstä, ja on myös suositeltavaa käyttää jännitteentasaa-jaa sähkönlaadun parantamiseksi.
- Kytke laitteiston maadoitus joko tähtimäisesti eli tuo niille sähkönsyöttö yhdestä pisteestä tai toteuta potentiaalintasaus maalenkin aiheuttamien häiriöiden eliminoimiseksi.
- Tee virransyötöt sopivan pituisilla kaapeleilla ja vältä sijoittamasta niitä liian lähelle signaalikaapeleita.
- Käytä parikierrettyä balansoitua signaalikaapelia missä mahdollista ja tee kaapeliylitykset kohtisuoraan.
- Poista tarpeettomat laitteet, kuten puhelinlaturit, äänentoistoon käytetystä sähkönsyötöstä verkkohäiriöiden minimoimiseksi.
- Paikallista ensikytkennän jälkeen niin sanotut ”soundisyöpöt” eli mahdolliset hurinan aiheuttajat.
- Hurinan esiintyessä voidaan DI-boxin avulla tehdä maasta erotus ground lift -kytkimellä häiriökohdassa, jolloin ne eivät kulje eteenpäin signaalipiirissä. Tyypillinen paikka DI-boxille on kitaran ja etuasteen tai mikserin välissä.

14 POHDINTA

Sähkömagneettisten häiriöiden ymmärtäminen vaatii perehtymistä ja tietä-mystä sekä sähkötekniikasta että äänitekniikasta. Sähkömagneettiset häiriöt ovat sähköinen ilmiö, ja niihin vaikuttavat minulle sähköalaa opiskelleena en-tuudestaan tutut käsitteet, kuten impedanssi, induktanssi ja kapasitanssi, mutta äänitekniikan signaalitasot ja signaalinsiirtojärjestelmät ovat myös tär-keä osata ja näihin käsitteisiin en ollut aiemmin uppoutunut.

Koko laajuudessaan aihe oli hieman haastava, koska netissä kulkee tietoa, jolle kaikelle ei löydy selitystä tai tieteellistä tukea, ja tämä tuotti ylimääräistä vaivaa luotettavia lähteitä etsiessä. Opin kuitenkin työstä paljon uutta, ja vaikka se ei ole alaa mullistava eikä tällä hetkellä omien päätöiden kannalta tärkeä, minä ja monet ystäväni harrastamme musiikin kuuntelua ja soittoa, jo-ten perusteet teorioista on hyödyllistä tietää.

Apulaiteprojekti jäi lähinnä tutkimuksen ja teoreettisen suunnittelun pohjalle kaaviokuvineen odottamaan mahdollista toteutusta tai jatkoa tulevaisuudessa, mutta päätavoite toteutui; opinnäytetyön kokonaisuus selvittää sähkömagneet-tisten häiriöiden perusteet ja äänitysstudion ongelmien aiheuttajat löytyivät

sekä toimeksiantaja oli tyytyväinen opinnäytetyön tuloksiin. Tutkimus toimii oppaana vikatilanteen sattuessa, ja sitä voi myös hyödyntää uutta äänilaitteistokokonaisuutta kootessa. Tulevaisuudessa kyseisen apulaitteen rakentaminen voisi olla kannattavaa teknologian kehittyessä ja komponenttien pienentyessä.

LÄHTEET

1. Valkonen, J. Ääniteknologian signaalin kuljetus sekä siinä esiintyvät laitteet ja tekniikat. Tampereen ammattikorkeakoulu. Viestinnän koulutusohjelma. Digitaalinen ääni ja kaupallinen musiikki. Opinnäytetyö. 2014. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/88270/Valkonen_Jarno.pdf?sequence=1 [viitattu 1.5.2020].
2. Robjohns, H. Understanding Impedance. *Sound On Sound*. Verkkoartikkeli. 2003. Saatavissa: <https://www.soundonsound.com/techniques/understanding-impedance> [viitattu 1.5.2020].
3. Poikonen, S. Analogisen audiotekniikan häiriösuojaus; Maadoitus-, kytkentä- ja kaapelointimenetelmät. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Sähkövoimatekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. 2012. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/48442/Saku_Poikonen_Analogisen%20audiotekniikan%20hairiosuojauk.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 1.5.2020].
4. Laakso, V. Sähkömagneettisten häiriöiden aiheuttamat ongelmat äänitysstudiossa. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Sähkövoima- ja automaatiotekniikan suuntautumisvaihtoehto. Opinnäytetyö. 2009. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/4394/Laakso_Ville.pdf;jsessionid=3AE35BA40FA6A7F1C64FFF28867382CE?sequence=1 [viitattu 1.5.2020].
5. Using DI Boxes. *Sound On Sound*. Verkkoartikkeli. 2002. Saatavissa: <https://www.soundonsound.com/techniques/using-di-boxes> [viitattu 1.8.2020].
6. Millenium DI-E. Thomann. Verkkokauppa. Saatavissa: https://www.thomann.de/fi/millenium_die_dibox_passiv.htm [viitattu 1.8.2020].
7. JDI Features. Radial Engineering. Valmistajan esittelysivu. Saatavissa: <https://www.radialeng.com/product/jdi/features> [viitattu 1.8.2020].
8. J48 Features. Radial Engineering. Valmistajan esittelysivu. Saatavissa: <https://www.radialeng.com/product/j48/features> [viitattu 1.8.2020].
9. the t.racks VM-100 Voltage Meter. Thomann. Verkkokauppa. Saatavissa: https://www.thomann.de/fi/the_tracks_vm100_voltage_meter.htm [viitattu 1.9.2020].
10. Karg. LackRack - Power and Lights with a modded T.Racks VM-100. *Electronic Sound Creation*. Blogi. 2015. Saatavissa: <http://karg-music.blogspot.com/2015/08/lackrack-power-and-lights-with-modded.html> [viitattu 1.9.2020].
11. the t.racks VM-100 Voltage Meter user manual. Thomann. Käyttöohje. Saatavissa: https://images.static-thomann.de/pics/atg/atgdata/document/manual/c_107459_r1_en_online.pdf [viitattu 1.9.2020].

12. Guitar Technology. *Sound On Sound*. Verkkoartikkeli. 2008. Saatavissa: <https://www.soundonsound.com/techniques/guitar-technology> [viitattu 1.10.2020].

LIITTEET

Ohessa linkki Falstadiin ja tekstitiedosto, joiden avulla voidaan simuloida apulaiteen piirikaavion toimintaa: <https://www.falstad.com/circuit/circuitjs.html>



Apulaite Falstad.txt