



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUHANI TAKALO
TEHOELEKTRONIIKKALAITTEIDEN KOMPONENTTIEN TUOTTA-
MAT MELUHAITAT JA NIIDEN EHKÄISY

Kandidaatintyö

Tarkastaja: professori Teuvo Suntio
28. huhtikuuta 2017

TIIVISTELMÄ

JUHANI TAKALO: Tehoelektroniikkalaitteiden komponenttien tuottamat meluhaitat ja niiden ehkäisy

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 23 sivua

Huhtikuu 2017

Sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tehoelektroniikka

Tarkastaja: professori Teuvo Suntio

Avainsanat: melu, käänteinen pietsosähköinen ilmiö, magnetrostriktio, Maxwellin voimat

Tehoelektroniikkalaitteiden komponentit: kondensaattorit, kelat ja muuntajat voivat tuottaa ääntä, joka voi olla luokiteltavissa meluksi. Näiden lisäksi myös pulssinleveysmodulaatio voi aiheuttaa melua kytkentätaajuuden ollessa kuuloalueella.

Tässä työssä käsiteltävät melua aiheuttavat ilmiöt ovat käänteinen pietsosähköinen ilmiö, magnetrostriktio ja Maxwellin voimat. Käänteinen pietsosähköinen ilmiö aiheuttaa aineen muodon muuttumisen ulkoisen sähkökentän vaikutuksen takia. Magnetrostriktio ilmenee ferromagneettisissa aineissa ulkopuolisen magneettikentän muuttaessa aineen mittasuhteita. Maxwellin voimat johtuvat reluktanssista eli magneettisesta vastuksesta ferromagneettisten aineiden pintojen välillä. Nämä ilmiöt voivat aiheuttaa aineen värähtelyä kuuloalueen taajuuksilla.

Tässä työssä tarkastelun kohteena ovat nämä ilmiöt ja niistä aiheutuvan melun ehkäisy. Tämä vaatii aluksi melun määrittelemistä ja ilmiöiden esittelyä.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	MELUN MÄÄRITTELY	2
2.1	Melun aiheuttajat tässä työssä	2
2.2	Melu Suomen laissa ja A-painotus.....	4
2.2.1	Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 23.5.2015/545	4
2.2.2	A-painotettu äänentaso.....	5
3.	MELUA AIHEUTTAVAT ILMIÖT TEHOELEKTRONIKASSA	6
3.1	Käänteinen pietsosähköinen ilmiö melunlähteenä	6
3.2	Magnetostriktio ja Maxwellin voimat melunlähteenä.....	8
3.3	Pulssinleveysmodulaatio melunlähteenä.....	10
4.	MELUHAITTOJEN EHKÄISY	12
4.1	Meluhaittojen ehkäisy kondensaattoreissa	12
4.2	Meluhaittojen ehkäisy muuntajissa	13
4.3	Meluhaittojen ehkäisy keloissa	14
4.4	Meluhaittojen ehkäisy pulssinleveysmodulaatiossa ja esimerkkitapauksia .	14
4.4.1	Pulssinleveysmodulaation aiheuttama melu tasavirtatuulettimissa	15
4.4.2	Vaihtuvataajuuksisen pulssinleveysmodulaation aiheuttama melu	15
4.5	Meluhaittojen ehkäisyn ja aiheen tutkimuksen tärkeys.....	16
5.	MELUAVAN KOMPONENTIN PAIKALLISTAMINEN YKSINKERTAISELLA METODILLA	18
6.	YHTEENVETO	20
	LÄHTEET.....	22

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A-painotus	äänentason painotus vastaamaan ihmisen epälineaarista kuuloherkkyttä eri taajuuksille
et al.	lat. et alii tai et aliae, ja muut
FEM	engl. Finite element method, elementtimenetelmä
MLCC	engl. Multi-Layer Ceramic Capacitor, keraaminen monikerroskondensaattori
PWM	engl. Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
f	taajuus
F	voima
$L_{Aeq, t}$	tietyn ajanjakson t keskiäänitaso
L_{AFmax}	mittausjakson aikana korkein mitattu äänitaso
L_{Cpeak}	äänitapahtuman huippuarvon äänitaso
M	momentti
t	aika
W	teho

1. JOHDANTO

Tehoelektroniikkalaitteiden komponenttien tuottama melu on vähän tutkittu aihe, vaikka ilmiö on monelle tuttu esimerkiksi verkkovirtamuuntajan *hurinasta*. Vähemmän tunnettuja melunlähteitä voivat olla esimerkiksi kondensaattorit, kelat, muuntajat ja pulssinleveysmodulaatio. Nämä melunlähteet eivät ole yleensä voimakkaita äänentasoltaan, mutta ne voivat olla häiritseviä. Yksi tällainen melullaan häiritsevä laite voi olla esimerkiksi verkkovirtaan kytketty puhelimen laturi, joka voi tuottaa *sirisevää* ääntä.

Tehoelektroniikkalaitteiden aiheuttaman melun taajuus ja äänenvoimakkuus voivat vaihdella koko ihmisen kuuloalueen välillä, joka on noin 20–20000 Hz. Vanhemmiten kuulo kuitenkin heikkenee, eivätkä esimerkiksi vanhemmat ihmiset kuule korkeita taajuuksia yhtä hyvin kuin nuoremmat. Tämän vuoksi tehoelektroniikkalaitteen tuottaman melun kuuluvuus ja häiritsevyys voi olla hyvin yksilöllistä eri henkilöillä ja tämän vuoksi se voi olla vaikeasti mitattavissa. Otettaessa huomioon ihmiskorvan epälineaarinen kuuloherkkyys eri taajuuksilla mitatut melu- ja äänentason yleensä A-painotetaan vastaamaan paremmin toteutunutta kuuloaistimusta.

Tässä työssä käsitellään kondensaattoreiden, kelojen, muuntajien ja pulssinleveysmodulaation tuottamaa melua. Käsiteltäväksi ei oteta esimerkiksi laitetuulettimien aiheuttamaa ilmavirran turbulenssimelua tai tuulettimen pyörimisestä johtuvaa värinämelua. Luvussa 4.4.1 kuitenkin käydään läpi pulssinleveysmodulaation aiheuttama melu tasavirtatuulettimissa. Tässä työssä käsitellyt melunlähteet määritellään tarkemmin luvussa 2, jossa myös käsitellään melun määrittelyä Suomen laissa ja A-painotettu äänentaso.

Luvussa 3 käydään läpi tehoelektroniikan komponenteissa tapahtuvat fysikaaliset ilmiöt, jotka aiheuttavat melua. Näitä ilmiöitä ovat tässä työssä käänteinen pietsosähköinen ilmiö, magnetostriktio ja Maxwellin voimat. Lisäksi käsitellään pulssinleveysmodulaatiota, koska se voi aiheuttaa melua kytkentätaajuuden ollessa kuuloalueella. Luvussa 4 käsitellään erilaisia menetelmiä vähentää tai välttää näistä ilmiöistä johtuvaa melua eri tapauksissa. Lisäksi pohditaan työssä käsitellyn melun ehkäisyn ja aiheen tutkimuksen tärkeyttä objektiivisesti ja kirjoittajan näkökulmasta.

Luvussa 5 testataan kokeellisesti yksinkertaista metodia paikallistaa melua tuottava komponentti käyttäen rullalle käärittyä paperiarkkia kuuloapuna. Työn lopussa esitetään yhteenveto työssä käsitellyistä melunlähteistä, melua aiheuttavista ilmiöistä ja meluhaittojen ehkäisystä.

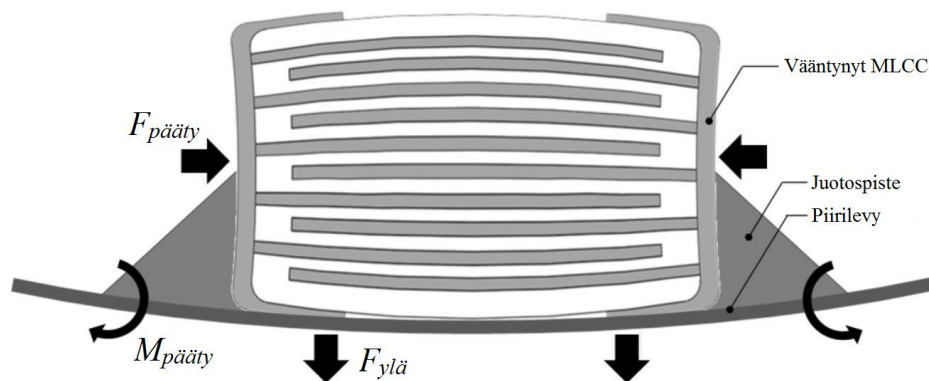
2. MELUN MÄÄRITTELY

Melun määrittely ei ole yksiselitteistä; melutasoista on annettu Suomen laissa useita asetuksia ja säädöksiä, mutta vaikka melutaso ei ylittäisikään määrärajoja, se voi kuitenkin olla häiritsevää. Melun häiritsevyyden mittaaminen on vaikeaa, koska aistikokemus äänen häiritsevyydestä voi vaihdella huomattavasti eri henkilöiden välillä. Tässä työssä keskitytään selvästi häiritsevän melun lisäksi myös lähes äänettömään meluun, joka on kuitenkin kuultavissa ihmisen kuuloaistilla.

2.1 Melun aiheuttajat tässä työssä

Tässä työssä käsitellään vähemmän tunnettuja tehoelektroniikan melunlähteitä. Yksi tällainen melunlähde voi olla piirilevyllä oleva keraaminen monikerroskondensaattori, engl. *Multi-Layer Ceramic Capacitor*, MLCC. MLCC:t koostuvat ohuista levyistä, jotka voivat alkaa värähdellä käänteisen pietsosähköisen ilmiön takia [1]. Tällöin kyseinen ilmiö aiheuttaa kondensaattorin fyysisten mittasuhteiden muuttumista, joka voi aiheuttaa *sirisevää* ääntä fyysisen värähtelyn taajuuden ollessa ihmisen kuuloalueella.

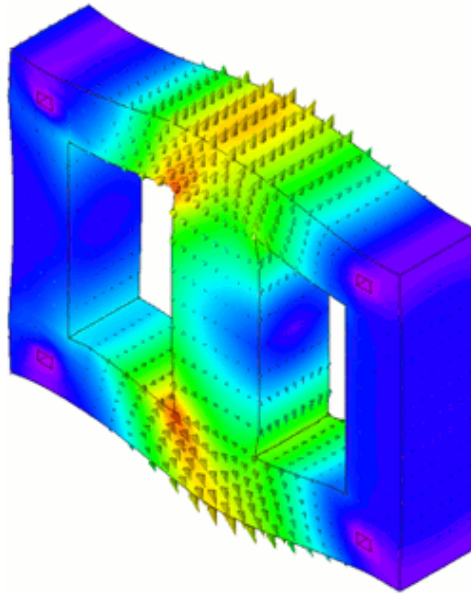
Alla olevassa kuvassa 1 on Byung-Hanin et al. tutkimuksessa [1] esiintyvä havainnollistus MLCC:n kokemista käänteisen pietsosähköisen ilmiön aiheuttamista voimista $F_{pääty}$ ja $F_{ylä}$. Kondensaattorin mittasuhteiden muuttuminen aiheuttaa juotospisteidensä kautta myös piirilevyn värähtelyä. Huomioitavaa on, että kondensaattorin eri pinnat värähtelevät eri vaiheessa kuvan 6 mukaisesti, mikä saa aikaan momentin $M_{pääty}$ piirilevyyn.



Kuva 1. MLCC:n kokemia voimia ja piirilevyn kokemat momentit, muokattu lähteestä [1, s. 2].

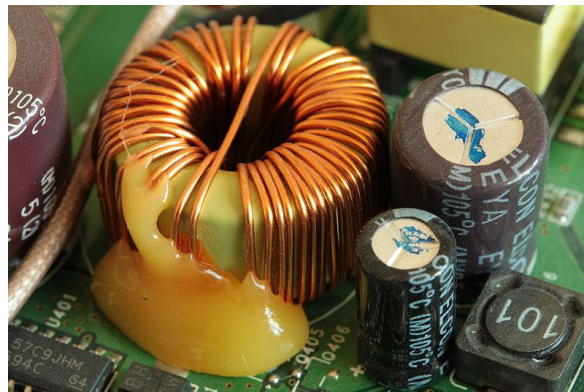
Toinen melua aiheuttava komponentti voi olla muuntaja. Esimerkiksi käytettäessä verkovirtamuuntajaa 50 Hz:n taajuudella on yleensä tuttu *humina* tai *hurina* kuultavissa. Tämä ilmiö perustuu magnetostriktiivisyyteen ja Maxwellin voimiin [2], jolloin muuttuva magneettikenttä saa ferromagneettisen muuntajasydämen mittasuhteet muuttumaan. Ku-

vassa 2 on havainnollistava elementtimallinnus, engl. *Finite element method*, magnetotriktion vaikutuksesta muuntajasydämeen. Mallinnus on luotu käyttäen JMAG-ohjelmissä. Fyysisten mittasuhteiden muuttumista on korostettu kuvassa.



Kuva 2. FEM-mallinnus muuntajasydämeen mittasuhteiden muuttumisesta [3].

Kolmas melua aiheuttava ilmiö tapahtuu keloissa ja kuristimissa. Ferriittisydämisissä ke-loissa ilmiön luonne on samanlainen kuin muuntajissa. Tämä kelaan liittyvä ilmiö on saanut englanninkielisen termin ”coil noise”, joka on yleensä käytetyin englanninkielinen termi puhuttaessa tässä työssä käsitellyistä melun lähteistä kuluttajien keskuudessa. Kuvassa 3 on piirilevyllä oleva toroidi, jonka liimaus pyrkii estämään ja vaimentamaan toroidin fyysistä värähtelyä [4, 5], joka voisi aiheuttaa korvin kuultavaa ääntä.



Kuva 3. Piirilevyyn liimattu toroidi [6].

Neljäs melua tuottava ilmiö liittyy pulssinleveysmodulaatioon ja sen luonteeseen. Puls-sinleveysmodulaation kytkentätaajuuden ollessa ihmisen kuuloalueella voi se aiheuttaa laitteen oheiskomponenteissa yllä kuvattuja ilmiöitä [4, 7-9]. Pulssinleveysmodulaatiosta kerrotaan tarkemmin luvuissa 3.3 ja 4.4.

2.2 Melu Suomen laissa ja A-painotus

Vaikka tässä työssä käsiteltävänä olevat melunlähteet ovat yleensä hiljaisia äänentasoltaan ja vain vähän häiritseviä, voi poikkeuksiakin löytyä. Tämän vuoksi käsitellään hie-man melun määrittelyä Suomen laissa ja siten esitellään yksi määritelmä melulle. Alla olevan aliluvun 2.2.1 asetus ei ole oleellisin asia tässä työssä, mutta sen numeeriset arvot ovat verrattavissa työssä käsiteltyjen tutkimustulosten melutasoihin. Aliluvussa 2.2.2 esitetään äänentason A-painotus, jota käytetään useissa tässä työssä esitellyissä tutkimustuloksissa painottamaan mitattuja äänentasoja vastaamaan ihmisen epälineaarista kuuloherkkyyttä eri taajuuksille.

2.2.1 Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 23.5.2015/545

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus [10] asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista määrittelee melun mittaamisen tavan ja toimenpiderajat keskiäänentason ja vuorokaudenajan avulla. Äänentasoja ei A-painoteta. Asetuksen mukaan melunmittaus tulee suorittaa käyttäen tarkkuudeltaan ja toiminnoiltaan luotettavia laitteistoja, ja mittaus tulee tehdä oleskeluvyöhykkeellä. Taulukossa 1 on asetuksen liitteen 2 taulukko, joka erittelee melun toimenpiderajat asunnossa tai muussa oleskelutilassa. Taulukoituun keskiäänentasaan lisätään laskennallisen impulssi- tai kapeakaistaisen melun korjaus, jonka suuruus on 3, 5, 6 tai 10 dB riippuen melun laadusta.

Taulukko 1. Päivä- ja yöajan keskiäänitasojen toimenpiderajat asunnoissa ja muissa oleskelutiloissa [10].

Huoneisto ja huonetila	Päiväajan keskiäänitaso L_{Aeq} (klo 7–22) (dB)	Yöajan keskiäänitaso L_{Aeq} (klo 22–7) (dB)
Asuinhuoneistot, palvelutalot, vanhainkodit, lasten päivähoitopaikat ja vastaavat tilat		
asuinhuoneet ja oleskelutilat	35	30
muut tilat ja keittiö	40	40
Kokoontumis- ja opetushuoneistot		
huonetila, jossa edellytetään yleisön saavan hyvin puheesta selvän ilman äänenvahvistuslaitteiden käyttöä	35	-
muut kokoontumistilat	40	-
Työhuoneistot (asiakkaiden kannalta)		
asiakkaiden vastaanottotilat ja toimistohuoneet	45	-

Asetuksen liitteestä 2 löytyy myös pienitaajuisen melun toimenpiderajat nukkumiseen tarkoitetuissa tiloissa, jotka on esitelty taulukossa 2. Ylärivillä on taajuusalue hertseinä ja

sen alla yhden tunnin keskiäänitaso desibeleinä. Päiväajan (klo 7–22) pienitaajuiselle melulle sovelletaan 5 dB suurempia arvoja kuin taulukossa 2.

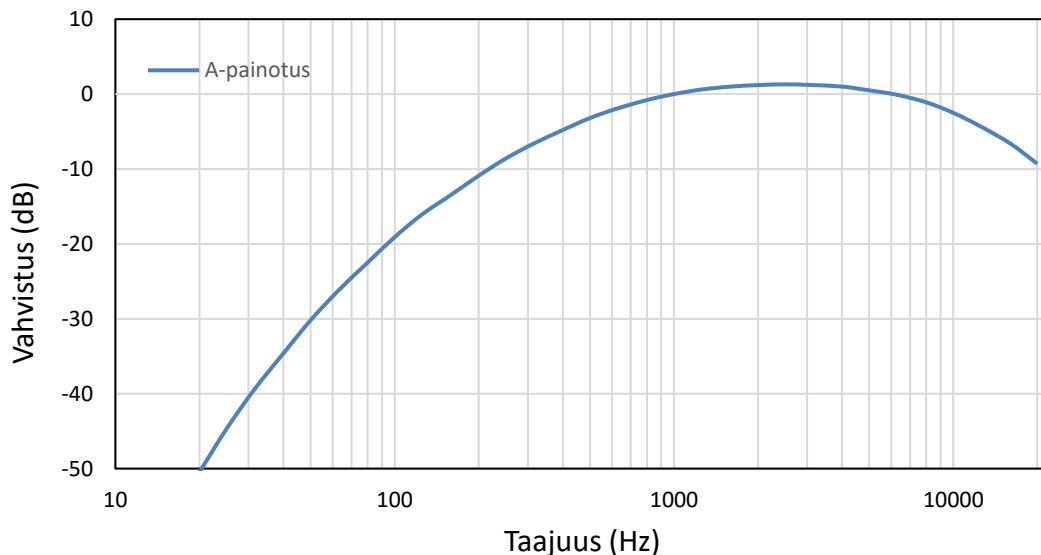
Taulukko 2. Pienitaajuisen sisämelun tunnin keskiäänitason toimenpiderajat nukkumiseen tarkoitetuissa tiloissa [10].

Kaista (Hz)	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
Yöajan (klo 22–7) Leq,1h (dB)	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34	32

Taulukon toimenpiderajojen lisäksi yöaikainen (klo 22–7) häiritsevä melu, esimerkiksi musiikki tai muu vastaava mahdollisesti unta häiritsevä melu, joka erottuu selvästi taustamelusta, ei saa ylittää 25 dB:ä mitattuna yhden tunnin keskiäänitasona nukkumiseen tarkoitettussa tilassa. Teknisten laitteiden yöaikaisen melun enimmäistaso ei saa ylittää 33 dB:ä, mutta jos yöaikaista melua esiintyy satunnaisesti tai harvoin, melutaso saa olla suurempi kuin 33 dB, kunhan yli 45 dB:n melutasoja ei esiinny ollenkaan. [10]

2.2.2 A-painotettu äänentaso

A-painotettu äänentaso on monissa kansainvälisissä standardeissa, esim. IEC 61672:2003:ssa, määritelty painotus äänentasolle. Sen avulla voidaan painottaa äänentaso vastaamaan ihmisen epälineaarista kuulon herkkyyttä eri taajuuksille. Kuvan 4 kuvaajasta voidaan lukea, että ihmisen kuulo on herkimmillään 1000 Hz:n ja 5000 Hz:n välillä.



Kuva 4. Äänentason A-painotus, piirretty käyttäen tietoja lähteestä [11, s. 378].

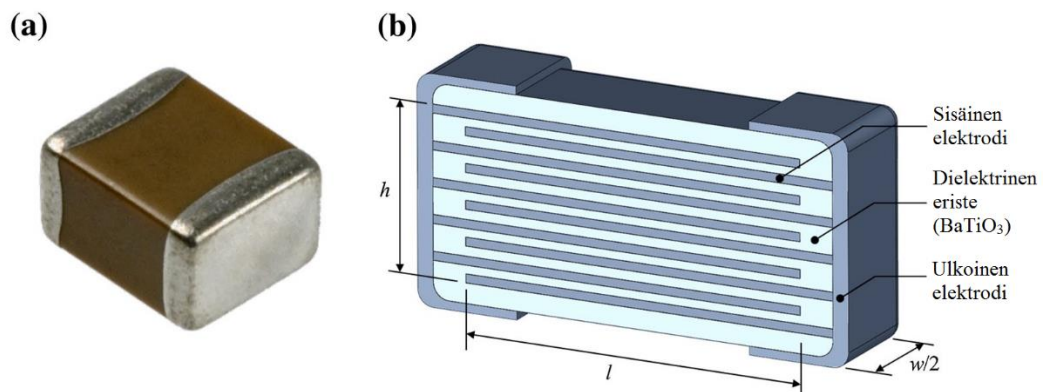
3. MELUA AIHEUTTAVAT ILMIÖT TEHOELEKT- RONIIKASSA

Tehoelektroniset kytkennät ja laitteet voivat tuottaa melua useilla tavoilla, joista yksi melunlähde on tuuletus. Tuulettimet voivat ilmavirran aiheuttaman turbulenssimelun lisäksi aiheuttaa mekaanista värinää laitteen koteloon tai runkoon, mikä voi vahvistaa laitteen tuottamaa melua. Tässä työssä ei käsitellä näitä ilmiöitä melunlähteenä, vaan aliluvun 2.1 alla käsiteltyjä ilmiöitä. Näitä ilmiöitä ovat käänteinen pietsosähköinen ilmiö, magnetostriktio ja Maxwellin voimat. Lisäksi käsitellään pulssinleveysmodulaatiota.

3.1 Käänteinen pietsosähköinen ilmiö melunlähteenä

Keraamisissa monikerroskondensaattoreissa, MLCC:ssä, voi tapahtua käänteinen pietsosähköinen ilmiö, jota kutsutaan myös sähköstriktioksi. Pietsosähköisessä ilmiössä mekaaninen jännitys aiheuttaa aineen polaroitumisen, eli aineen vastakkaisten pintojen välille muodostuu jännite. Käänteisenä tämä ilmiö tapahtuu siten, että kun aine kokee ulkoisen sähkökentän, se muuttuu muotoaan. Pietsosähköinen ilmiö on tunnettu esimerkiksi kvartsikiteistä, jotka saadaan tämän ilmiön avulla värähtelemään erittäin tasaisesti vakiotaaajuudella.

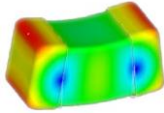
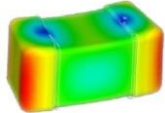
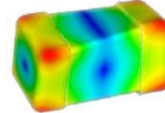
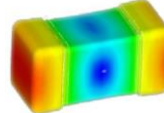
MLCC:ssä tämä ilmiö voi kuitenkin olla haitaksi, koska kondensaattorin yli muuttuva jännite voi aiheuttaa kondensaattorin mekaanista värähtelyä [1, 8, 12, 13]. Tämän värähtelyn ollessa ihmisen kuuloalueella, voi *sirisevä* ääni olla kuultavissa. Yleisesti MLCC:ssä käytetty dielektrinen eriste bariumtitanaatti, BaTiO_3 , omaa ison kapasitanssin kokoonsa suhteutettuna, mutta sillä on myös pietsosähköisiä ominaisuuksia [1]. MLCC:n tapauksessa monikerrostuneisuus vielä lisää kondensaattorin pietsosähköisiä ominaisuuksia. Kuvassa 5 on nähtävissä kuva MLCC:stä ja sen sisäinen rakenne.



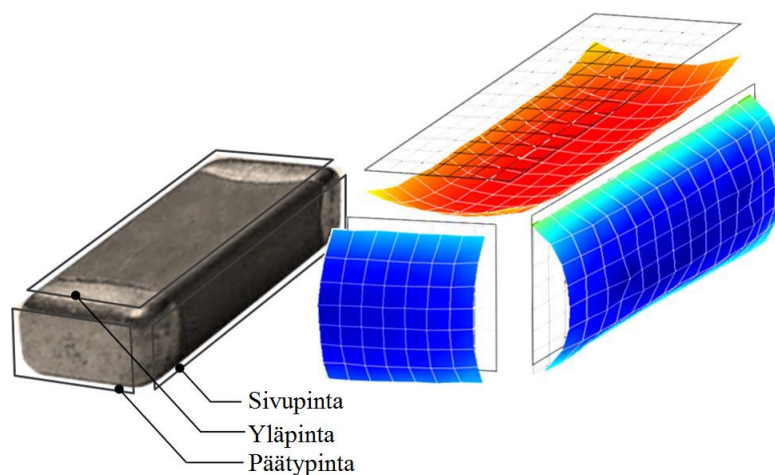
Kuva 5. *a* MLCC ja *b* MLCC:n sisäinen rakenne, muokattu lähteestä [1, s. 2].

Dongjoon et al. esittelevät tutkimuksessaan [1] FEM-mallinnusta ja testipiirilevyä, joiden avulla he havaitsivat korrelaation akustisen äänen ja MLCC:n värähtelyn välillä. FEM-mallinnuksessaan he havaitsivat kondensaattorin muuttavan muotoa eri taajuuksilla, jotka näkyvät taulukossa 3. Mallinnuksen kondensaattorin ominaistaajuus oli 1,5 MHz, joka on kuuloalueen ulkopuolella mutta mallinnuksessa testattiin vain yksittäisen, irrallaan olevan MLCC:n pietsosähköisiä ominaisuuksia. MLCC:n pienestä koosta johtuen värähtelyn mallinnus piirilevyn kanssa ei onnistunut, minkä vuoksi mallinnukseen otettiin mukaan vain kondensaattori. Tutkijat kuitenkin olettivat kondensaattorin värähtelevän samalla tavalla myös kuuloalueella kondensaattorin ollessa juotettu piirilevylle, mitä myös testattiin.

Taulukko 3. Kondensaattorin muodon muuttuminen FEM-mallinnuksessa eri taajuuksilla, muokattu lähteestä [1, s. 3].

	Tila 1	Tila 2	Tila 3	Tila 4
Mallin muoto				
Taajuus	1,46 MHz	1,47 MHz	1,48 MHz	2,27 MHz

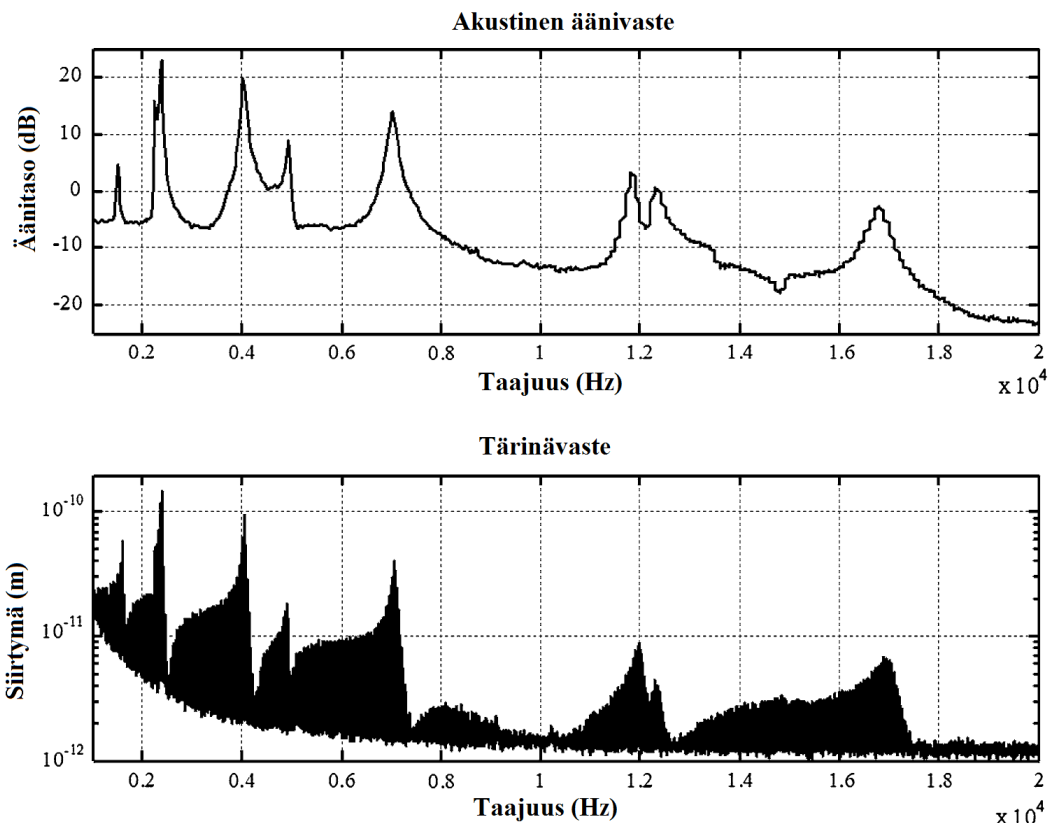
Seuraavaksi he mittasivat testipiirilevyllä olevan kondensaattorin muodon muuttumista, kun sen yli on sinimuotoinen 1 kHz jännite. Piirilevy oli 100 mm leveä, 40 mm korkea ja 1 mm paksu, lisäksi MLCC oli ainut komponentti keskellä piirilevyä. Mittaus tapahtui kahdella laser-doppler-anemometrillä, jolloin voitiin mitata eri pintojen värähtelyä yhtä aikaa. Pintojen muodonmuuttuminen on havaittavissa kuvassa 6.



Kuva 6. Laser-doppler-anemometrillä mitattu kondensaattorin muodon muuttuminen 1 kHz siniaallon vaikutuksesta, muokattu lähteestä [1, s. 3].

Yläpinta on eri vaiheessa sivuihin nähden, mistä johtuvat voimat aiheuttavat kuvan 1 momentin $M_{pääty}$ piirilevyyen. Mitatut tulokset vastasivat FEM-mallinnuksessa olleita muo-

donmuutoksia. Pelkkä MLCC:n muodonmuuttuminen ei yksin riitä tuottamaan ihmiskorvin kuultavaa ääntä, mutta kondensaattorin ollessa juotettuna piirilevyyn, se saa piirilevyn värähtelemään kuuloalueella momentin $M_{pääty}$ takia [1]. Laser-doppler-anemometriä käytettiin mittaamaan myös piirilevyn värähtelyä, jonka mittaustulokset ovat kuvassa 7 alhaalla. Myös piirilevyn värähtelyn äänentaso mitattiin mikrofonilla 3 cm päästä piirilevystä käyttäen eri taajuuksia verraten sitä piirilevyn värähtelyyn eri taajuuksilla. Näiden korrelaatio on luettavissa kuvasta 7.



Kuva 7. Ylempi kuvaaja mikrofonilla mitattu äänentaso piirilevystä ja alempi kuvaaja laser-doppler-anemometrillä mitattu piirilevyn pinnan värähtely, muokattu lähteestä [1, s. 6].

Vaikka äänentason mittaaminen tapahtuikin lähellä kondensaattoria, tutkimuksessa havaittiin selvä korrelaatio kondensaattorin yli olevan jännitteen taajuudella ja piirilevyn tuottaman äänen välillä. Tässä tapauksessa äänentaso oli korkeimmallaankin alhainen, mutta huippuarvojen ollessa noin 20 dB tasolla, voi ääni olla häiritsevää, mikäli sen tuottava laite on lähellä kuulijaa.

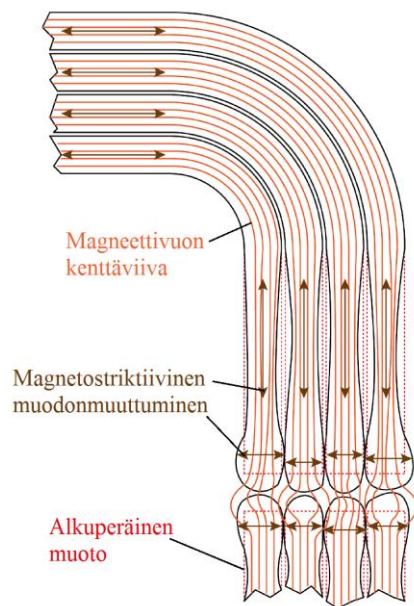
3.2 Magnetostriktio ja Maxwellin voimat melunlähteenä

Magnetostriktio eli Joulen ilmiö ilmenee ferromagneettisissa aineissa, eli aineissa, jotka pysyvät magneettisina olematta ulkopuolisessa magneettikentässä. Ferromagneettisia ai-

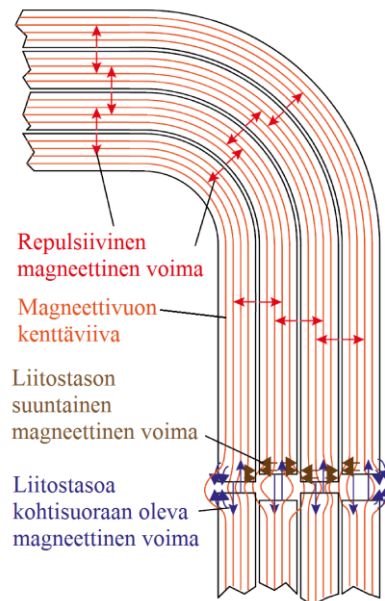
neita ovat erimerkiksi rauta, koboltti ja nikkeli, sekä monet näiden seokset. Magnetostriktio saa ferromagneettisten aineiden mittasuhteen muuttumaan, kun niihin vaikuttaa ulkoinen magneettikenttä. Tämä johtuu ferromagneettisen aineen magneettisten dipoleiden kääntymisestä aineen sisällä magneettikentän vuoksi. Muuntajasydämen magnetostriktiota on havainnollistettu kuvassa 8, jossa laminoidun muuntajasydämen kerrosten paksuuden muutos on havaittavissa ja verrattavissa alkuperäiseen muotoon. Magnetostriktio ilmenee myös kelasydämissä.

Maxwellin voimat ilmenevät esimerkiksi laminoidun muuntajan kerrosten tai pakka-
muuntajan levyjen välissä, tai muuntajasydämen leikkauspinoilla. Maxwellin voimien vaikutus on havaittavissa kuvassa 9, jossa muuntajasydämen laminointikerrosten välistä hylkivää voimaa on kuvattu punaisilla nuolilla ja leikkuupintojen välistä voimaa sinisillä ja ruskeilla nuolilla. Maxwellin voimat johtuvat reluktanssista eli magneettisesta vastuksesta ferromagneettisen aineiden pintojen välillä. [2]

Nämä molemmat sähkömagneettiset voimat aiheuttavat ferromagneettisen aineen fyysistä värinää, joka saa ympäröivän ilman värähtelemään aiheuttaen sopivalla taajuudella ihmiskorvin kuultavaa ääntä. Lisäksi värähtelyn ollessa taajuudeltaan sama kuin muuntaja- tai kelasydämen mekaaninen ominaistaajuus, värähtelyn amplitudi kasvaa. [2]



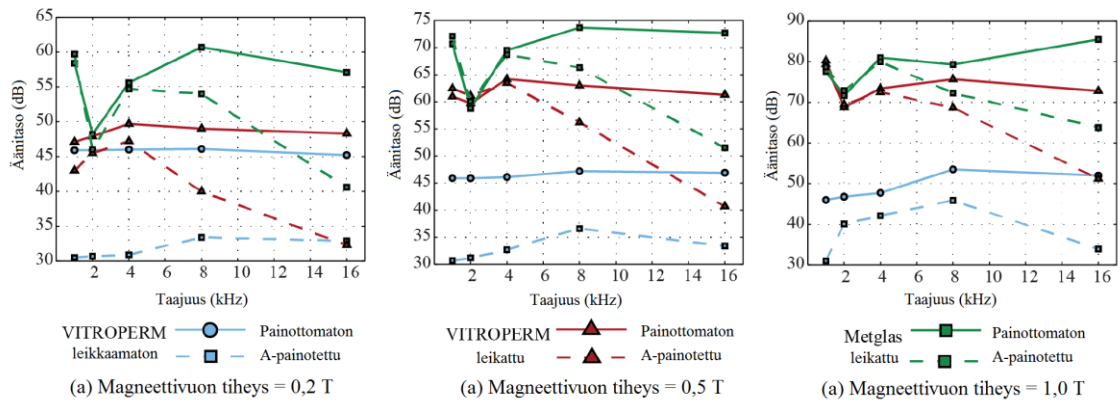
Kuva 8. Magnetostriktion vaikutus muuntajasydämessä, muokattu lähteestä [2, s. 3].



Kuva 9. Maxwellin voimien vaikutus muuntajasydämessä, muokattu lähteestä [2, s. 3].

Shuai et al. mittasivat tutkimuksessaan [2] erilaisten muuntajien värähtelyä ja värähtelyn tuottamaa äänentasoja. Muuntajat roikkuivat kahden narun varassa värähtelyvaimennetulla pöydällä, ja muuntajia käytettiin eri taajuuksilla. Jännite oli mittauksissa sellainen,

että se aiheutti muuntajiin 0,2:n, 0,5:n tai 1,0:n teslan magneettivuon tiheyden. Muuntajien tuottamaa äänentasoja mitattiin mikrofonin avulla. Tulokset eri muuntajille näkyvät kuvan 10 kuvaajissa, joissa on mitattu äänentaso ja A-painotettu äänentaso.

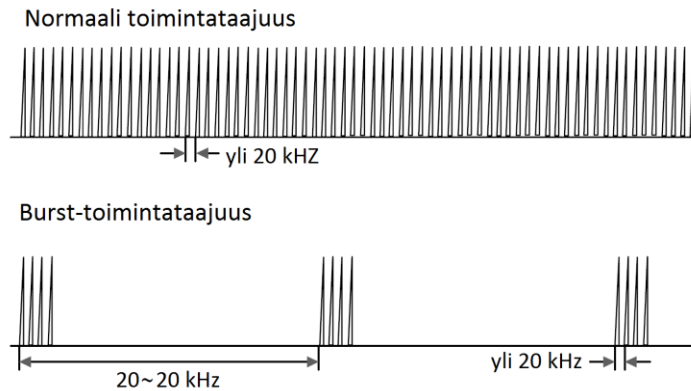


Kuva 10. Muuntajien mitattu ja painotettu äänentaso eri vuontiheyksillä, muokattu lähteestä [2, s. 9].

Kuten kuvaajista voi lukea muuntajasydämien aiheuttama melu tässä tapauksessa oli äännekkäämpää kuin aliluvussa 3.1 käsitelty kondensaattorin melu ja ylittää aliluvussa 2.2 käsiteltyjä melurajoja. Eri muuntajien äänentaso vaihteli magneettivuon tiheyden muuttuessa. Huomioitavaa on, että leikatut muuntajasydämet tuottivat enemmän melua kuin leikkaamattomat.

3.3 Pulssinleveysmodulaatio melunlähteenä

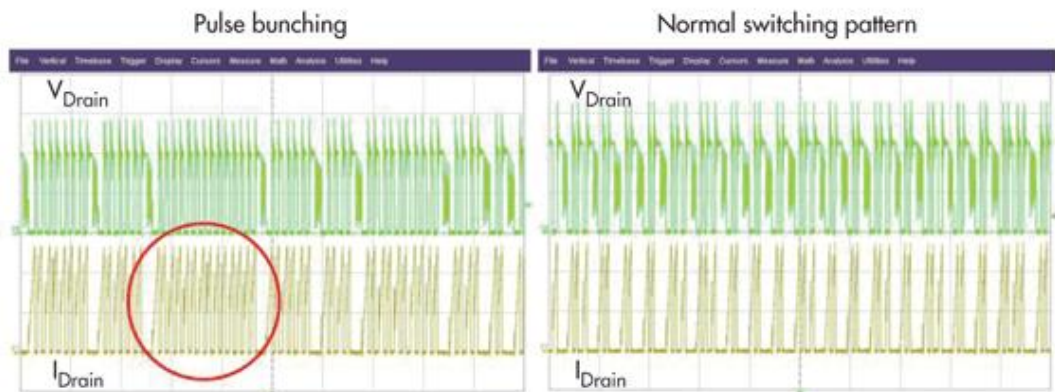
Tehoelektroniikkalaitteiden toimiessa ultraäänialueella (>20 kHz), komponenttien värähtelyn taajuus pysyy yleensä myös ihmisen kuuloalueen ulkopuolella. Nykyaikana esimerkiksi energiatehokkaat hakkuriteholähteet ovat kuitenkin monesti suunniteltu siten, että kuorman ollessa pieni tai jos sitä ei ole ollenkaan, tehonlähteen toimintataajuus voi muuttua, millä saavutetaan energiatehokkaampi toimintatila. Yhdessä tällaisessa toimintatilassa hakkurin toimintataajuus muuttuu jatkuvasta taajuudesta pulssimaiseksi. Englanniksi tämän toimintatilan nimi on *burst switching operation*, ja sen ero normaaliin toimintataajuuteen on havaittavissa kuvasta 11.



Kuva 11. Hakkurin normaali toimintataajuus ja burst-toimintataajuus [7, s. 2].

Burst-tilassa hakkurin ulosantama teho on pienempi, mutta tämä kuitenkin voi aiheuttaa pulssinleveysmodulaation taajuusspektriin toisen taajuuskomponentin kuuloalueelle, mikä havaittavissa kuvassa 11.

Pulssinleveysmodulaatiolla on myös muita toimintatiloja, joiden taajuus voi olla hetkellisesti tai pidemmän aikaa kuuloalueella. Muuttuva kytkentätaajuus voi tuottaa melua, jos sen taajuus laskee kuuloalueelle. Lisäksi hakkurin takaisinkytkentäpiirissä, joka ohjaa hakkurin toimintataajuutta, voi esiintyä viivettä aiheuttaen pulssien epätasaisuutta, mikä voi aiheuttaa melua [8]. Kuvassa 12 vasemmalla on havaittavissa epätasainen kytkentätaajuus ja oikealla tasainen kytkentätaajuus. Luvussa 4.4 esitellään lisää esimerkkita-pauksia meluhaittojen ehkäisymetodeista pulssinleveysmodulaatiolle.



Kuva 12. Hakkuriteholähteen epätasainen ja tasainen kytkentätaajuus [8].

4. MELUHAITTOJEN EHKÄISY

Tehoelektroniikkalaitteiden meluhaittojen ehkäisyyn on monia tapoja, toisaalta meluhaitta voi johtua usean eri komponentin muodostamasta kokonaisuudesta. Yleisimmät melunlähteet ovat keraamiset kondensaattorit, kelat ja kuristimet, muuntaja- ja kelasydämet ja pulssinleveysmodulaatio [4, 8, 14]. Meluhaitta voi myös ilmetä vain laitteen suunnitteluvaiheessa, mutta esimerkiksi laitteen kotelointi voi vaimentaa tämän melun niin hiljaiseksi, että se ei kuulu häiritsevästi ihmisen kuuloaistilla. Vaikeinta meluhaittojen ehkäisyssä voi olla melunlähteen löytäminen, johon Texas Instruments esittelee kaksi helppoa tapaa, joiden käyttöön ei tarvitse kalliita mittauslaitteita [5]:

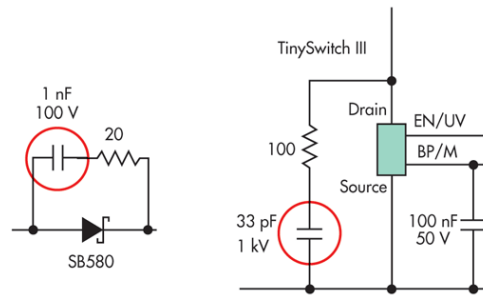
1. Käärimällä paperi rullaksi ja käyttämällä sitä kuuloapuna melua tuottavan komponentin tunnistuksessa.
2. Käyttämällä sähköä johtamatonta tikkua, esimerkiksi puista lyijykynää, tunnistamaan värisevä komponentti asettamalla se epäilyn melunlähteen päälle vaimentaen siitä tulevaa melua.

Ensimmäistä tapaa testattiin luvun 5 mittauksessa. Melulähde voi myös ilmetä vain tiettyillä tehoelektroniikkalaitteiden toimintatiloilla; esimerkiksi puhelimen USB-laturi voi toimia hiljaisesti ladattaessa puhelinta, mutta jos laturi on verkkovirrassa kiinni ilman kuormaa, voi se alkaa *siristä*. Alla olevissa luvuissa käydään läpi meluhaittojen ehkäisyä ja löytymistä eri tilanteissa.

4.1 Meluhaittojen ehkäisy kondensaattoreissa

Keraamisten kondensaattoreiden käänteinen pietsosähköinen ilmiö on voimakkaimmillaan tilanteessa, joissa jännitteen muutos ajan suhteen kondensaattorin yli on suurimmillaan [8]. Tämä käänteinen pietsosähköinen ilmiö on melun aiheuttaja, ja sen teoriaa käsiteltiin luvussa 3.1 Lisäksi ilmiö on voimakas MLCC:eissä johtuen niiden monikerroksisuudesta [1].

Vaughanin mukaan kondensaattoreiden kohdalla melunlähteiden ongelmapaikkoja voivat olla esimerkiksi: RC-vaimennuskytkennät, tasolukkokytkennät ja suodatuskondensaattorit [8]. Yksi tapa testata tuottaako kondensaattori ääntä, on vaihtaa se filmikondensaattoriksi, jolla on sama kapasiteetti ja jännitteenkesto. Suodatuskondensaattorin tapauksessa ratkaisu voi olla kondensaattorin vaihtaminen elektrolyyttikondensaattoriksi [5] tai kondensaattorin korvaaminen useamman pienemmän kondensaattorin rinnankytkennällä, joista lähtevä melu on hiljaisempaa [8]. Alla olevassa kuvassa 13 on ympyröity kondensaattorit, jotka voivat aiheuttaa melua kytkennässä.



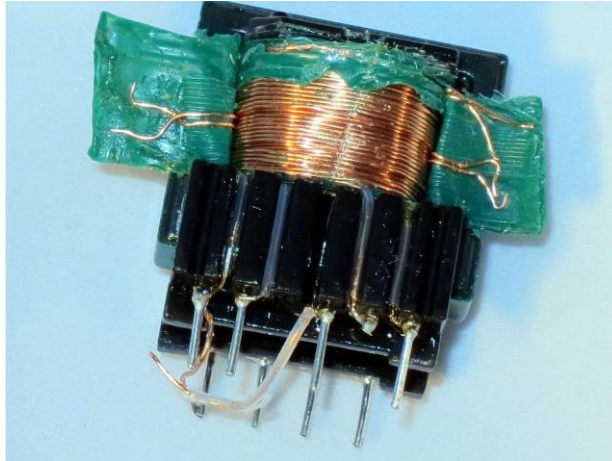
Kuva 13. Vasemmalla tasolukkokytkentä, oikealla takaisinkytkentä, joiden potentiaalisesti melua aiheuttava kondensaattori on ympäröity [8].

Dongjoon et al. havaitsivat tutkimuksessaan, että kondensaattorin pietsosähköisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa, ja niitä voidaan muuttaa lämmittämällä bariumtitanaattikondensaattori yli bariumtitanaatin Curie-lämpötilan. Tällöin bariumtitanaatti muuttuu ferromagneettisesta paramagneettiseksi, jolloin bariumtitanaattikerrosten polarisaatioon voidaan vaikuttaa kytkemällä kondensaattorin yli jännite. 135 minuuttia kestävä prosessin jälkeen bariumtitanaattikerrosten pietsosähköisiä ominaisuuksia saatiin muutettua, mikä vähensi niistä johtuvaa kondensaattorin fyysisistä värinää. Mittausten mukaan tämän prosessin avulla tutkimusryhmä sai vähennettyä tuotettua melua parhaimmillaan 14 dB, nelinkertaisesti alkuperäisestä. [12]

Kondensaattorit eivät yleensä yksistään aiheuta kuultavaa melua, mutta piirilevyille juotettuina ne aiheuttavat piirilevyn värinää [12]. Tämän värinän vaimennus kotelointitekniisin keinoin voi myös olla hyvä ratkaisu. Piirilevyn paksuudella, koolla ja komponentti-asettelulla on lisäksi vaikutus melun tuottoon [13].

4.2 Meluhaittojen ehkäisy muuntajissa

Muuntajien tapauksessa muuntajansydämen magnetostriktiivisyys ja Maxwellin voimat melun aiheuttajina muodostavat monimutkaisen yhtälön yhdessä muuntajan muiden ominaisuuksien kanssa. Erityyppisillä muuntajilla on erilaisia melun ehkäisytapoja. Yksinkertaisimmillaan levypakkamuuntajan melutessa voi pakkaa koossa pitävien pulttien ja mutterien kiristäminen auttaa. Kuvassa 14 olevan muuntajan tuottamaa melua on vähennetty käärimällä johtimet tiukasti muuntajasydämen ympärille, upottamalla muuntaja muuntajalakkaan ja teippaamalla muuntajan päällimmäinen johdinkerros teipillä [14].



Kuva 14. Corsairin ATX-virtalähteen lakattu ja teipattu 5 V muuntaja [14].

Muuntajan mekaaninen värinä liittyy vahvasti sen magneettivuon muuttumiseen ajan suhteen [7], ja oikeanlaisen muuntajan valinta tiettyyn käyttötarkoitukseen on tärkeää [8]. Jos muuntajaa käytetään sen spesifikaatioiden ulkopuolella, voi meluntuotto olla huomattavaa. Myös muuntajasydämen muodolla, mahdollisilla leikkuupinnoilla ja materiaalilla on vaikutusta tuotettuun meluun [2].

4.3 Meluhaittojen ehkäisy keloissa

Huberin et al. ja Rossin et al. mukaan tyypillisimmät magneettiset komponentit, jotka aiheuttavat melua hakkuriteholähteissä ovat muuntajat, sisääntulon induktiiviset suodattimet ja tehokertoimen korjauskuristimet [4, 15]. Yksi kuristimesta johtuva melunlähde voi olla magneettinen kuristin loisteputkivalaisimessa, joka voi *surista* käytön aikana tai valaisimen käynnistyksen yhteydessä. Toimiva ratkaisu tähän on esimerkiksi vaihtaa kuristimen tilalle uusi elektroninen kuristin.

Kelat voidaan myös lakata ja koteloida, sekä esimerkiksi liimata kiinni piirilevyyn vaimentaen niiden värähtelyä [4, 5]. Lakkaukset ja liimaukset sekä käämikierrosten tiukkuus voivat kuitenkin kelojen ja muuntajien tapauksessa kulua ja väljentyä komponenttien värähtelyn vaikutuksesta. Tämän vuoksi jotkut laitteet voivat alkaa meluta vasta vuosia niiden käytön aloittamisen jälkeen.

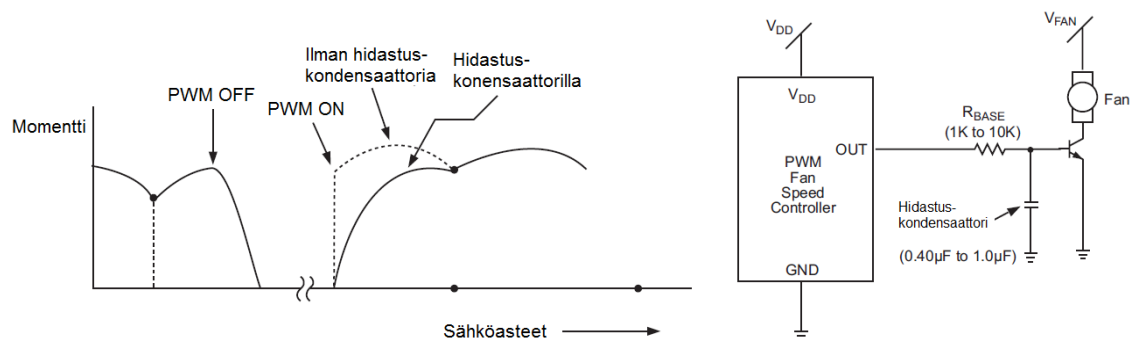
4.4 Meluhaittojen ehkäisy pulssinleveysmodulaatiossa ja esimerkitapauksia

Pulssinleveysmodulaation aiheuttamaa melua voidaan ehkäistä monilla eri tavoin. Kyt-kentätaajuus voidaan esimerkiksi pitää aina kuuloalueen yläpuolella, mikä ei ole kuitenkaan energiatehokkain tapa käytettäessä hakkuriteholähdettä alhaisemmalla tehoalueella. Yksi usean tehoalueen yleisesti käytetty teholaähde on puhelimen USB-laturi, jolla voi-

daan ladata useita eri laitteita. USB:n uusin PD-protokolla, engl. Power Delivery, mahdollistaa lataustehon 2,5 W:sta 100 W:iin [16]. Energiatehokkaan laturin suunnittelemisen koko tälle tehoalueelle ei ole yksinkertaista, jos halutaan välttää pulssinleveysmodulaation aiheuttamia meluongelmia.

4.4.1 Pulssinleveysmodulaation aiheuttama melu tasavirtatuulettimissa

Microchip Technologyn julkaiseman menetelmän mukaan kaikkein tehokkain tapa ohjata harjattomia tasavirtatuulettimia tuulettimien eliniän, tehokkuuden ja tuotetun turbulenssimelun kannalta on matalataajuinen pulssinleveysmodulaatio [9]. Tämä ohjaus tapahtuu suoraan tuulettimen oman kontrollipiirin avulla. Tällaisen tuulettimen ulkoinen ohjaus pulssinleveysmodulaatiolla aiheuttaa vielä suurempia momenttimuutoksia tuulettimessa, mistä johtuva värinä on kuultavissa meluna. Tämä on havaittavissa kuvasta 15, jossa ohjaussignaalin jännitteen nousunopeus kohdassa PWM ON on hyvin nopea. Hidastuskondensaattorilla tätä nousunopeutta saadaan kuitenkin hidastettua, mikä vähentää momenttipiikkiä. [9]



Kuva 15. Pulssinleveysmodulaatiolla ohjatun harjattoman tasavirtatuulettimen momentti sähköasteiden funktiona ja kytKentä ohjaussignaalin jännitteen nousunopeuden rajoittamiseksi, muokattu lähteestä [9, s. 2].

Toinen tapa välttää yllä kuvattu ongelma on siirtyä harjattomista tasavirtatuulettimista suoraan pulssinleveysmodulaatiolla ohjattuihin tuulettimiin, joiden ohjaus tapahtuu esimerkiksi 25 kHz:n signaalilla. Tällaiset tuulettimet kuitenkin maksavat yleensä enemmän.

4.4.2 Vaihtuvataajuuksisen pulssinleveysmodulaation aiheuttama melu

Huberin et al. tutkimuksessa etsittiin tapoja vähentää vaihtuvataajuuksisen pulssinleveysmodulaation aiheuttamaa melua. Ongelma oli löytää toimiva energiatehokas ratkaisu

hakkuriteholähteelle, jota on tarkoitus käyttää vaihtuvilla kuormilla. Yksi tapa on esimerkiksi muuttaa kytkentätaajuutta pienemmäksi pienillä kuormilla. Tämä voi kuitenkin tuoda kytkentätaajuuden kuuloalueelle. [4]

Tutkimuksessaan he esittelevät kytkennän, jolla voidaan tarkkailla kytkentätaajuutta ja pitää se kuuloalueen yläpuolella. Tämä tapahtuu laskemalla kytkentävirtapulseja, jolloin kytkentätaajuutta on nostettava, jotta kuormalle tulee sama kokonaisvirta. Oskillaation välttämiseksi piiriin voidaan lisätä myös hystereesi. Pienellä kuormalla tai kun kuormaa ei ole ollenkaan, korkea kytkentätaajuus aiheuttaa isompia kytkentähäviöitä. Tässä tilanteessa melunpoistopiiri voidaan kytkeä pois päältä, ja antaa kytkentätaajuuden laskea kuuloalueelle, jotta hakkuriteholähde toimii energiatehokkaasti. Melu ei välttämättä ole häiritsevää tässä tilanteessa, koska kytkentätaajuus laskee kuuloalueen alemmille taajuuksille. Ihmiskorvan epälineaarinen herkkyys eri taajuuksille aiheuttaa sen, että nämä matalammat taajuudet eivät ole yhtä häiritseviä kuin korkeammat. [4]

Suunnitteleamallaan melunpoistopiirillä he saavuttivat hyviä tuloksia testipiirinä olleessa 90 W tehokertoimen korjauksella varustetussa vastavaihemuuntimessa. Tulokset ovat nähtävissä alla olevassa taulukossa 4, johon on otettu mukaan äänekkäimmät testitilanteet 110 V_{rms} ja 220 V_{rms} verkkovirtajännitteillä. Mikrofonilla mitatut äänentasonnot ovat A-painotettuja vastaamaan ihmisen epälineaarista kuuloaluetta. Tuloksista voidaan havaita, että ilman melunvaimennuspiiriä äänekkäimmät tapaukset olivat noin 600 mA:n kuormituksella ja melunvaimennuspiirin kanssa melun tuotto oli suurimmillaan alle 100 mA:n kuormituksella. Äänentaso laski 8,8 desibeliä 110 V_{rms} verkkojännitteellä ja 2,9 desibeliä 220 V_{rms} verkkojännitteellä. [4]

Taulukko 4. A-painotetun melun tuotto desibeleissä huonoimmista tilanteista ilman äänenvaimennuspiiriä ja sen kanssa, muokattu lähteestä [4].

Muuntaja	Verkkojännite	
	110 V _{rms}	220 V _{rms}
Alkuperäinen (ilman melunvaimennuspiiriä)	29.0 dB(A) 0.595 A virralla	23.4 dB(A) 0.647 A virralla
Modifioitu (äänenvaimennuspiirillä)	20.2 dB(A) 0.093 A virralla	20.5 dB(A) 0.019 A virralla

4.5 Meluhaittojen ehkäisyn ja aiheen tutkimuksen tärkeys

Tässä luvussa on aiheen objektiivisen tarkastelun lisäksi tämän kandidaatintyön kirjoittajan pohdintaa aiheesta ja sen tutkimuksen tärkeydestä. Huber et al. toteavat tutkimuksessaan kirjallisuuden hakkurimuuntajien magneettisten komponenttien tuottamasta melusta

olevan vähäistä ja suurin osa saatavilla olevasta kirjallisuudesta ei esittele kokeellisia metodeja esitettyjen melunvaimennustapojen pohjaksi [4]. Tämän kandidaatintyön kirjoittaja huomasi myös saman asian etsiessään lähteitä tutkimustuloksista näille ilmiöille.

Englanninkielisen Wikipedian artikkelin [17] ”Coil noise”, mukaan, ilmiön aiheuttajiksi listataan vain kelat ja muuntajat. Kuitenkin esimerkiksi tässä työssä käytiin läpi kondensaattoreiden, kelojen, muuntajien ja pulssinleveysmodulaation aiheuttamaa melua. Huomioitavaa on, että tämän työn kirjoitushetkellä huhtikuussa 2017 englannin kielisen termin *coil noise* Googlehaku löytää noin 20 miljoonaa tulosta, joista moni on kuluttajien viestejä foorumeilla, videoita ja tuotearvosteluja. Näissä tuloksissa myös etsitään tapoja korjata tai vähentää tätä melua. Yksi monessa tuloksessa esiintyvä *ratkaisu* on olla ostamatta laitetta, joka tuottaa tällaista melua.

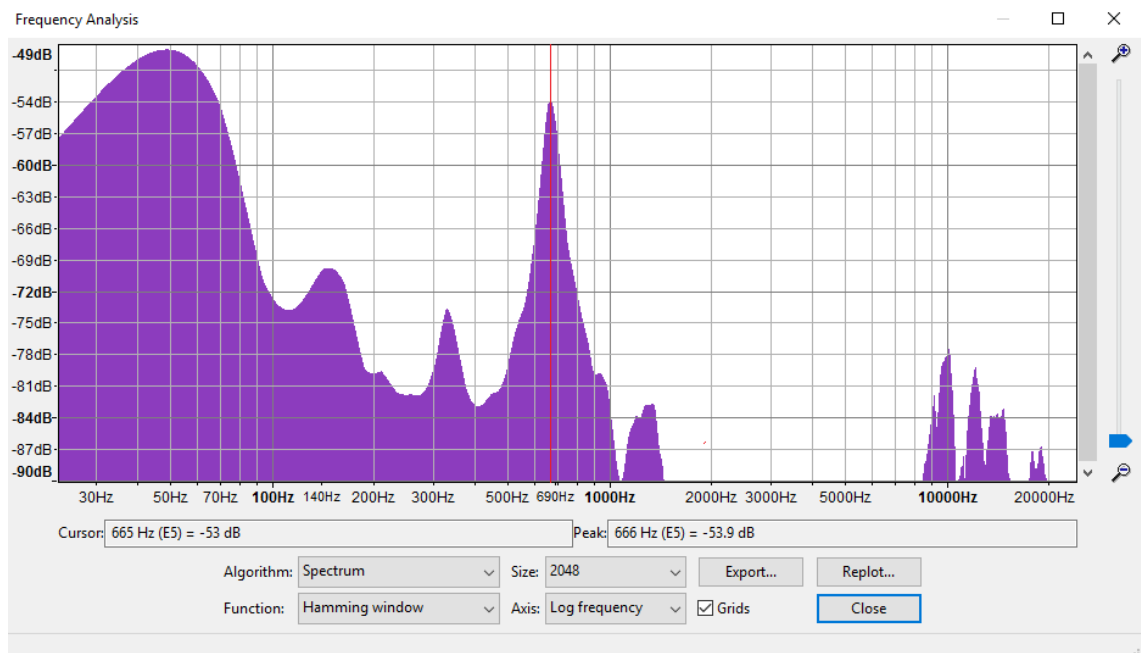
Tässä työssä käsitellyistä melunlähteistä löytyy paljon epätieteellistä materiaalia: esimerkiksi listaus näytönohjaimien tuottamasta melusta toisiinsa verrattuna [18]; uutinen iPhone 7s:n *sirinästä* [19]; video kondensaattoreiden tuottamasta melusta [20] ja monia tämän työn kirjoittajan kokemuksia näistä meluhaitoista.

Nämä vähemmän tunnetut tehoelektroniikan melunlähteet voivat vaikuttaa negatiivisesti kuluttajan kokemukseen ostamastaan tuotteesta, minkä vuoksi huomion kiinnittäminen näihin melunlähteisiin suunnitteluvaiheessa voi olla järkevää. Huber et al. toteavat tutkimuksessaan, että elektroniset melun ehkäisyratkaisut ovat halvempia ja toimivat luotettavammin kuin mekaaniset [4], mutta elektronisten ratkaisuiden käyttäminen vaatii enemmän tietoa ilmiöstä kuin mekaanisten ratkaisuiden käyttö. On myös mahdollista, että valmistajat kiinnittävät huomiota näihin melunlähteisiin, mutta niitä ei välttämättä voida ehkäistä.

5. MELUAVAN KOMPONENTIN PAIKALLISTAMINEN YKSINKERTAISELLA METODILLA

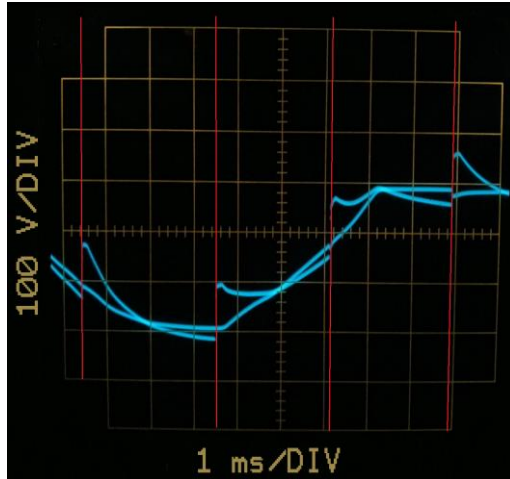
Tässä luvussa testattiin Texas Instrumentsin esittelemää tapaa [5] kääriä paperi rullaksi, jonka avulla meluava komponentti on helpompi paikallistaa. Tutkittavana laitteena oli Lenovon kannettavan tietokoneen 65 W:n, 20 V:n verkkovirtalaturi. Mittaus tapahtui kotioloissa käyttäen yksinkertaisia menetelmiä ja laitteita, mutta oletus oli, että saatujen mitaustulosten välillä havaitaan korrelaatio.

Työ alkoi etsimällä selvästi melua tuottava laite, joka oli yllä mainittu Lenovon 2007 valmistettu laturi. Laturi avattiin, kytkettiin verkkovirtaan ja käyttäen rullaksi käärittyä paperia kuuloapuna meluavan keraamisen pintaliitoskondensaattorin löytäminen oli helppoa. Kuuntelu ja mittaus tapahtuivat laturin ollessa kuormittamattomana. Kondensaattorin paikallistuksen jälkeen sen molemmille puolille juotettiin hyppylangat, jotka kytkettiin saatavilla olevaan analogiseen oskilloskooppiin (Kikusui Electronics Corp, model 5520). Ääntä mittauksessa käytettiin mikrofona noin 10 euron Zalmanin ZM-MIC1:tä, ja äänen tallennus tapahtui tietokoneella Audacity-ohjelmalla. Mikrofoni sijoitettiin rullaksi käärityn paperisuppilon sisään ja suppilo vietiin lähelle kondensaattoria. Tallennuksen taajuusanalyysi on alla olevassa kuvassa 16. Punainen kursori on kohdassa 665 Hz ja se on dominoiva taajuus 50 Hz:n taajuuden kanssa. 50 Hz taajuus johtui verkkovirran taajuudesta äänen mittauksessa.

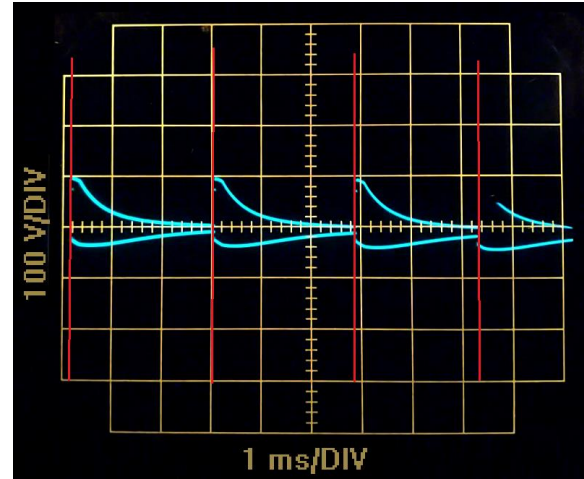


Kuva 16. Kondensaattorin äänen mittauksen taajuusanalyysi.

Seuraavaksi kondensaattorin yli olevaa jännitettä mitattiin oskilloskoopilla käyttäen kahta kanavaa, jotka kytkettiin kondensaattorin jalkoihin hyppylangoilla. Verkkojännitteen vaikutus saatiin pois kytkemällä muuntaja irti verkkovirrasta: muuntaja jatkoi melun tuottoa, kunnes laitteen toimintaa ylläpitävät kondensaattorit tyhjenivät. Kondensaattorin yli mitatut jännitteet näkyvät kuvissa 17 ja 18.



Kuva 17. Kondensaattorin yli oleva jännite verkkovirran kanssa, verkkovirran siniaallon nousukohta.



Kuva 18. Kondensaattorin yli oleva jännite ilman verkkovirtaa.

Kuvista 17 ja 18 voidaan lukea pulssien pituuden olevan n. 2,5–3 ms. Kuitenkin käänteinen pietsoelektrinen ilmiö on voimakkaimmillaan, kun jännitteen muutos ajan suhteen on suurin [8]. Kuvasta 17 näkyy parhaiten aika, jolloin kondensaattorin yli on noin 100 V:n jännite ja kun tämä jännite putoaa nolnaan noin puolessa välissä pulssia. Tämä aikaväli noin 1,25–1,5 ms, jota vastaava taajuusväli 665–800 Hz saadaan kaavasta $f = 1/t$. Saatu taajuusväli sopii kuvan 16 mitatun äänen taajuuspektriin.

Vaikka mittauksessa käytetyt laitteet olivatkin alkeellisia ja epätarkkoja, Texas Instrumentsin esittelemä tapa käyttää rullattua paperiarkkia melunlähteen paikallistamiseksi onnistui. Lisäksi halvalla mikrofoniolla mitattu meluntaajuus vastasi suurin piirtein oskilloskoopilla mitattua jännitteenmuutosta kondensaattorin yli. On myös huomioitava, että mittaus suoritettiin muuntajan ollessa ulkopuolella kotelostaan, jolloin se tuotti enemmän melua. Muuntaja ei myöskään tuottanut kuultavissa olevaa melua, jos sen ulostuloon kytki kuorman.

6. YHTEENVETO

Tässä työssä käsiteltiin tehoelektronikkalaitteiden komponenttien tuottamaa melua. Lisäksi esiteltiin yhtä melun määritelmää Suomen laissa ja tuotiin esille äänentason A-painotus, jonka avulla mitattu äänentaso saadaan painotettua vastaamaan ihmisen epälineaarista kuulon herkkyyttä eri taajuuksilla.

Ensimmäinen melua tuottava tapaus on **käänteinen pietsosähköinen ilmiö** kondensaattoreissa. Ilmiö perustuu kondensaattoreissa olevien eristekerroksien pietsosähköisiin ominaisuuksiin, jotka aiheuttavat eristekerrosten muodonmuuttumista ulkoisen jännitteen vaikuttaessa kondensaattorin navoissa. Voimakkaimmillaan muodonmuuttuminen tapahtuu keraamisessa monikerroskondensaattorissa, engl. MLCC:ssä. MLCC:t eivät yksistään aiheuta melua kuuloalueella, mutta ne aiheuttavat juotospisteidensä kautta taivutusmomentin piirilevyilleen. Tämä saa piirilevyn värähtelemään ja värähtelyn ollessa kuuloalueella, voi *sirisevä* ääni olla kuultavissa. Melun ehkäisy onnistuu esimerkiksi erilaisella komponenttisijoittelulla, muuttamalla piirilevyn mittoja, käyttämällä MLCC:n tilalla filmikondensaattoria tai vaimentamalla piirilevyn värähtely koteloteknisin keinoin.

Toinen melutapaus on **magnetostriktio ja Maxwellin voimat** ferromagneettisissa aineissa. Magnetostriktio aiheuttaa ferromagneettisen aineen mittasuhteiden muuttumisen ulkoisen magneettikentän vaikutuksen takia, ja se ilmenee kelojen ja muuntajien sydänmateriaaleissa. Maxwellin voimat vaikuttavat muuntajasydämen laminointikerrosten tai leikkuupintojen välillä, ja ne johtuvat reluktanssista eli magneettisesta resistanssista näiden kerrosten välillä. Nämä voimat aiheuttavat muuntajasydämen värähtelyä tuottaen aineen ulkopinnalle painetta, joka on kuultavissa äänenä.

Näistä ilmiöistä johtuvaa melua on mahdollista ehkäistä tekemällä käämityksistä tiukoja, lakkaamalla käämitykset ja varmistamalla että muuntajaa tai kelaa käytetään spesifikaatioidensa rajoissa. Kelat voidaan myös liimata kiinni piirilevyyn, jolloin piirilevy voi vaimentaa värähtelyä. Sydänmateriaalilla, sen muodolla ja leikkuupinnoilla on myös vaikutusta melun tuottoon.

Kolmannessa tapauksessa käydään läpi **pulssinleveysmodulaation** tuottamaa melua ja yhteisvaikutusta yllä kuvattujen tapausten kanssa. Pulssinleveysmodulaatio voi luonteensa vuoksi aiheuttaa melua kytkentätaajuuden tai tietyissä toimintatiloissa ilmenevän taajuuskomponentin ollessa kuuloalueella. Lähtökohtaisesti jos pulssinleveysmodulaation taajuuspektrissä on taajuuksia välillä 20–20000 Hz:ä, voi se aiheuttaa yllä olevissa tapauksissa 1 ja 2 esiteltyjä ongelmia. Esimerkiksi burst-tilassa pulssinleveysmodulaation kytkentätaajuus on yli kuuloalueen, mutta tämä toimintatila aiheuttaa matalataajuisemman taajuuskomponentin, joka voi olla kuuloalueella. Kytkennässä voi esiintyä myös viivettä, joka voi aiheuttaa pulssien välistä jäämistä ja aiheuttaa siten kuuloalueella olevia

taajuuskomponentteja. Kytkentätaajuus voidaan myös tietoisesti laskea alemmaksi kuuloalueelle pienemmillä kuormilla. Pulssinleveysmodulaation aiheuttamaa melua voidaan ehkäistä piirisuunnitelulla, joka estää tai ehkäisee kuuloalueen taajuuskomponenttien ilmenemisen kytkennässä.

Tehoelektroniikkalaitteiden komponenttien tuottama melu on vähän tutkittu aihe, vaikka siitä löytyykin paljon epätieteellistä materiaalia. Englanninkielinen termi *coil noise* on yleisesti käytetty termi kuvaamaan lähes kaikkia tässä työssä käsiteltyjä melun ilmiöitä ja lähteitä kuluttajien keskuudessa, vaikka melun lähde ei aina olekaan kela.

Lopuksi testattiin Texas Instrumentsin esittelemää tapaa paikallistaa melua tuottava komponentti rullalle käärityn paperin avulla, mikä onnistui. Testauksessa mitattiin myös melua tuottavan kondensaattorin taajuusspektri käyttäen noin 10 euron mikkiä ja jännite kondensaattorin yli analogisella oskilloskoopilla. Näiden välillä havaittiin korrelaatio.

LÄHTEET

- [1] B. Ko, S. Jeong, Y. Ahn, K. Park, N. Park, Y. Park, Analysis of the correlation between acoustic noise and vibration generated by a multi-layer ceramic capacitor, *Microsystem Technologies*, Vol. 20, Iss. 8, 2014, pp. 1671-1677.
- [2] P. Shuai, J. Biela, Investigation of acoustic noise sources in medium frequency, medium voltage transformers, 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-11.
- [3] JMAG FEA Software for Electromechanical Design
JMAG-Designer [Multiphysics], nettisivu. Saatavissa (viitattu 12.3.2017):
<https://www.jmag-international.com/products/jmag-designer/multiphysics.html>.
- [4] L. Huber, M.M. Jovanovic, Methods of Reducing Audible Noise Caused by Magnetic Components in Variable-Frequency-Controlled Switch-Mode Converters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, Iss. 6, 2011, pp. 1673-1681.
- [5] UCC28880, UCC28881 Audible Noise Reduction Techniques, Texas Instruments, 2017, 7 p. Saatavissa:
<http://www.ti.com/lit/an/slva821/slva821.pdf>
- [6] Slick Toroidal inductor in the power supply of a wireless router, nettisivu. Saatavissa (viitattu 11.3.2017): https://en.wikipedia.org/wiki/File:3Com_OfficeConnect_ADSL_Wireless_11g_Firewall_Router_2012-10-28-0869.jpg.
- [7] Audible Noise Reduction Techniques for FPS Applications, Fairchild Semiconductor, 2005, 7 p. Saatavissa:
<https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-4148.pdf>
- [8] P. Vaughan Troubleshoot A Flyback Supply That Generates Audible Noise, nettisivu. Saatavissa (viitattu 5.3.2017): <http://electronicdesign.com/power/troubleshoot-flyback-supply-generates-audible-noise>.
- [9] Suppressing Acoustic Noise in PWM Fan Speed Control Systems, Microchip Technology, Inc., 2003, 6 p. Saatavissa: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00771a.pdf>
- [10] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista, L

23.5.2015/545, 2015. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545>.

- [11] S. Bech, N. Zacharov, *Perceptual Audio Evaluation-Theory, Method and Application*, John Wiley & Sons, 2006, 442 p.
- [12] D. Kim, B. H. Ko, S. Jeong, N. C. Park, Y. P. Park, Vibration reduction of MLCC considering piezoelectric and electrostriction effect, 2015 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric (ISAF), International Symposium on Integrated Functionalities (ISIF), and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (PFM), pp. 186-189.
- [13] N. Guibourg Reducing MLCCs' piezoelectric effects and audible noise, nettisivu. Saatavissa (viitattu 12.4.2017): <http://www.edn.com/design/components-and-packaging/4397351/2/Reducing-MLCCs--piezoelectric-effects-and-audible-noise->.
- [14] J. Gerow How we fight coil whine in the RM Series power supplies, Corsair, nettisivu. Saatavissa (viitattu 12.3.2017): <http://www.corsair.com/en-us/blog/2013/september/coil-whine>.
- [15] M. Rossi, J. Le Besnerais, Vibration Reduction of Inductors Under Magnetostrictive and Maxwell Forces Excitation, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 51, Iss. 12, 2015, pp. 1-6.
- [16] USB Power Delivery Specification 1.0 USB-IF, 2012, 11 p. Saatavissa: http://www.usb.org/developers/powerdelivery/PD_1.0_Introduction.pdf
- [17] Coil Noise, nettisivu. Saatavissa (haettu 14.4.2017): https://en.wikipedia.org/wiki/Coil_noise.
- [18] Graphics Card Coil Whine; An Investigation, nettisivu. Saatavissa (viitattu 14.1.2017): <http://www.hardwarecanucks.com/forum/hardware-canucks-reviews/67822-graphics-card-coil-whine-investigation.html>.
- [19] D. Bohn Why are some iPhone 7s making hissing noises? The Verge, nettisivu. Saatavissa (viitattu 12.3.2017): <http://www.theverge.com/2016/9/18/12960526/iphone-7-hissing-noises-coil-whine>.
- [20] D. Jones EEVblog #855 - Ceramic Capacitor Piezoelectric Effect, YouTube, nettisivu. Saatavissa (viitattu 12.3.2017): <https://www.youtube.com/watch?v=F2gX-R1k7MM>.