

VALAISTUSKUORMIEN VERKKO- VAIKUTUKSET

Karri Tuomimäki

Opinnäytetyö
Toukokuu 2013
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

KARRI TUOMIMÄKI:

Valaistuskuormien verkkovaikutukset

Opinnäytetyö 99 sivua, joista liitteitä 35 sivua
Toukokuu 2013

Tässä työssä tutkittiin yhä useampiin kotitalouksiin asennettavien pienloiste- ja LED-lamppujen aiheuttamia verkkovaikutuksia. Verkkovaikutusten osalta keskityttiin erityisesti kyseisten lampputyyppeihin aiheuttamiin harmonisiin yliaaltoihin sekä niiden loistehon kulutukseen. Tämän lisäksi työssä tutkittiin tavanomaisen himmentimen verkkovaikutuksia.

Työssä suoritettiin mittauksia pienloiste- ja LED-lamppukuormille sekä himmentimellä säädetyille halogeenilamppukuormalle. Mittauksissa havaittiin, että sekä pienloiste- että LED-lamput tuottavat huomattavia virran yliaaltoja. Tämä voi lamppujen käytön lisääntyessä vaikuttaa sähkön laatuun. Ne kuluttavat myös pätötehon kulutukseensa nähden huomattavan määrän loistehoa. Suurin osa lamppujen kuluttamasta loistehosta on särötehoa, jota ei voida kompensoida tavanomaisilla kompensointilaitteistoilla. Myös himmentimen käyttö lisää yliaaltojen määrää sekä loistehon kulutusta.

Tavalliselle kuluttajalle kyseisten lamppujen käytöstä ei välttämättä koidu ongelmia. Sähköverkkoyhtiöille sen sijaan koituu kustannuksia lisääntyneestä loistehon kulutuksesta sekä yliaaltojen määrästä sähköverkossa. Tällä hetkellä pienkuluttajalta ei laskuteta loistehon käytöstä, mutta tulevaisuudessa se saattaa tulla ajankohtaiseksi.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

KARRI TUOMIMÄKI:
The Effects of Lighting Loads on Power Grid

Bachelor's thesis 99 pages, appendices 35 pages
May 2013

In recent years there has been an increase in use of compact fluorescent lamps and LED lamps due to introduction of EcoDesign Directive by EU. The purpose of this thesis was to examine the effects these lamps have on the power grid. The focus was especially on power system harmonics the lamps produce and their consumption of reactive power. Additionally this thesis examined the effects of an ordinary dimmer on the power grid.

Several tests were performed on lighting loads that consisted of compact fluorescent lamps, LED lamps and halogen lamps controlled by a dimmer. The results of these tests show that CFLs and LED lamps produce significant amounts of harmonic currents that could affect the quality of electricity when these lamps are used in larger quantities. They also consume noticeable amounts of reactive power which is mostly consisted of distortion power which cannot be counteracted by ordinary shunt capacitors. The test results also show that the use of a dimmer increases harmonics in the grid and the consumption of reactive power despite the controlled load being purely resistive.

From a consumer's point of view using CFLs and LED lamps won't necessarily cause any problems. But the increased usage of these lamps (which will lead to an increase in consumption of reactive power and increased production of harmonics) will lead to increased costs for the power distribution companies. This might eventually lead to a situation that even the small consumers might have to pay for their consumption of reactive power.

Key words: lighting, harmonics, reactive power, LED, compact fluorescent lamp

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	VALAISTUSTEKNIikka.....	8
2.1	Valaistustekniikan perussuureet	8
2.1.1	Valovoima.....	8
2.1.2	Valovirta.....	9
2.1.3	Valaistusvoimakkuus	10
2.1.4	Luminanssi	11
2.2	Lamppuihin liittyviä käsitteitä	12
2.2.1	Väriämpötila.....	12
2.2.2	Valotehokkuus	12
2.2.3	Energiatehokkuusmerkintä.....	13
2.2.4	Värintoistokyky.....	14
3	LAMPUT.....	16
3.1	Hehkulamput.....	16
3.2	Halogeenilamput	18
3.3	Loistelamput	20
3.4	Pienloistelamput.....	23
3.5	LED.....	25
3.5.1	LED-lamppu.....	27
4	VALONSÄÄTÖ.....	29
4.1	Valonsäätö yleisesti	29
4.2	Valonsäätö tyristorin ja triakin avulla.....	30
4.3	Eri lampputyypin valonsäätö.....	31
4.3.1	Hehku- ja halogeenilamput	31
4.3.2	Loistelamput.....	32
4.3.3	LED-lamput.....	32
5	VALAISTUKSEN VERKKOVAIKUTUKSET.....	33
5.1	Loisteho	33
5.1.1	Sinimuotoisen vaihtosähkön tehosuureet ja tehokerroin.....	33
5.1.2	Loistehon kompensointi	34
5.2	Yliaallot	35
5.2.1	Yliaallot ja Fourier-analyysi	35
5.2.2	Yliaaltojen spektriesitys	37
5.2.3	Kokonaissärö THD.....	38
5.2.4	Säröteho.....	38
5.2.5	Yliaaltojen aiheuttajat	40

5.2.6	Yliaaltojen vaikutukset.....	41
5.2.7	Yliaaltojen torjuminen	43
6	VALAISTUSKUORMAMITTAUKSET	45
6.1	Mittausten tavoitteet	45
6.2	Mittausjärjestelyt	45
6.3	Tutkitut laitteet.....	47
6.3.1	Lamput	47
6.3.2	Valonsäädin.....	48
6.4	Mittaustilanteet	49
6.5	Tulosten tarkastelu	50
6.5.1	Valonsäädin ja halogeenilamppukuorma	50
6.5.2	Pienloistelamppukuorma.....	53
6.5.3	LED-lamppukuorma	56
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	60
	LÄHTEET.....	62
	LIITTEET	65
	Liite 1. Himmenninmittausten tulokset	65
	Liite 2. Pienloistelamppumittausten tulokset	74
	Liite 3. LED-lamppumittausten tulokset	87

LYHENTEET JA TERMIT

TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
W	watti
VA	voltiampeeri
VAr	vari
Hz	hertsi
I	virta
I_{rms}	virran tehollisarvo
P	sähköinen pätöteho
LED	ledi (light-emitting diode)

1 JOHDANTO

Euroopan komissio antoi vuonna 2009 niin sanotun EcoDesign-direktiivin, jonka myötä kuluttajia pyritään ohjaamaan käyttämään energiatehokkaampia valaistusratkaisuja. Direktiivissä kielletään energiaa tuhlaavien lamppujen markkinoille saattaminen vaiheittain vuoteen 2016 mennessä. Käytännössä kiello koskee lähes kaikkia hehkulamppuja sekä suurinta osaa halogeenilamppuja. Tämä johtaa siihen, että kuluttajat joutuvat vaihtamaan vanhat hehkulamppunsa uudempiin vähemmän pätötehoa kuluttaviin lampputyyppeihin, kuten pienloiste- ja LED-lamppuihin.

Nämä lampputyypit ovat sähköisenä kuormana hyvin erilaisia kuin hehkulamput, sillä ne kuluttavat pätötehon lisäksi myös loistehoa. Lisäksi ne aiheuttavat sähköverkkoon harmonisia yliaaltoja, jotka vaikuttavat negatiivisesti sähkön laatuun. Kuormatyyppien muutos on sähköverkon kannalta huomattava, koska ennen direktiivin voimaantuloa valaistuksen osuus on ollut peräti 22 % suomalaisten kotitalouksien sähkönkulutuksesta.

Työn tarkoituksena on tutkia pienloiste- ja LED-lamppujen verkkovaikutuksia erityisesti loistehon ja yliaaltojen osalta, sekä selvittää miksi niitä syntyy ja kuinka niitä voidaan torjua. Lisäksi tarkoituksena on tutkia valonsäätöön käytettävän himmentimen tuottamia yliaaltoja. Työssä suoritetaan erilaisille valaistuskuormille mittauksia, joiden avulla verkkovaikutuksia voidaan tarkemmin tutkia.

Valaistuksen verkkovaikutusten ymmärtämiseksi työssä käydään läpi tyypillisimpien sisävalaistuksessa käytettyjen lampputyyppeiden toimintaperiaatteet ja ominaisuudet. Lisäksi työssä tutustutaan valaistustekniikan peruskäsitteisiin sekä valonsäätöön puolijohdesäätimien osalta.

2 VALAISTUSTEKNIikka

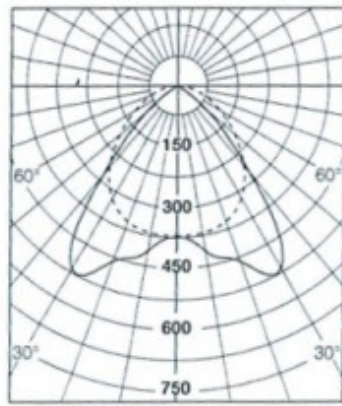
2.1 Valaistustekniikan perussuureet

2.1.1 Valovoima

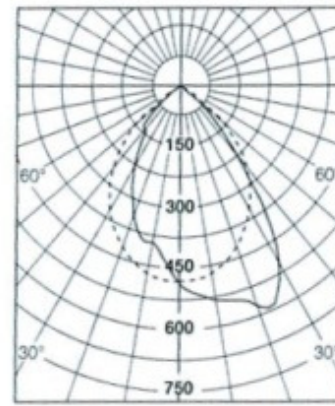
Valovoima I on SI-järjestelmän perussuure, josta muut valaistustekniikan suuret on johdettu. Valovoima kuvaa valon intensiteettiä ja sen yksikkö on kandela (cd). Valovoima kertoo, kuinka paljon valoa valonlähde säteilee johonkin tiettyyn säteilykulmaan eli käytännössä sen avulla ilmaistaan valaisimien ja kohdelamppujen valonjak ominaisuudet. Yksi kandela vastaa suurin piirtein yhden kynttilän valon voimakkuutta. (Halonen & Lehtovaara 1992, 34; Lampputieto 2009; Fagerhult 2012, 429)

Valonlähteen tuottama valovoima on sitä suurempi, mitä suuremman valovirran lumenina se tuottaa, mikäli sen säteilykulma pysyy vakiona. Jos valonlähteen tuottama valo kohdistetaan pienemmälle alueelle, sen valovoima kasvaa vaikka valovirta pysyisi vakiona. (Lampputieto 2009)

Valovoima ilmoitetaan yleensä ns. valonjakokäyrien avulla. Niissä valaisimen tai valonlähteen valovoima on ilmoitettu yleensä napakoordinaatistossa yhdessä tai useammassa pysty akselin suuntaisessa tasossa. Valaisimen valonjako ilmoitetaan yleensä normalisoiduna muodossa cd/klm (kandeloita tuhatta lumenta kohden). Näin samaa valonjakokäyrää voidaan käyttää valovirraltaan erilaisille, mutta valokappaleeltaan samanmuotoisille lamppuille, kuten eri tehosarjaa oleville loistelamppuille. (Fagerhult 2012, 429)



Symmetrisen valonjako
28 W T5-loistelamppu (2600 lm)
antaa suoraan alas n. 975 cd.



Epäsysteemisen valonjako
Valovoiman maksimi kulmaan 25°
on 28 W T5-loistelampulla n.
1500 cd.

KUVA 1. Symmetrisen ja epäsymmetrisen valonjaon valonjakokäyrät (Fagerhult 2012, 431)

Esimerkiksi kuvan 1 vasemmanpuolimmaisessa valonjakokäyrässä 2600 lm:n T5-loistelamppu antaa valovoimaa suoraan alaspäin (katkoviivalla merkitty ympyrä) seuraavasti:

$$I = \frac{375}{1000} \text{ cd/klm} \cdot 2600 \text{ lm} = 975 \text{ cd}$$

2.1.2 Valovirta

Valovirralla Φ ilmaistaan kuinka paljon valonlähde tuottaa näkyvää valoa. Valovirran yksikkö on lumen (lm). Valovirran suuruusluokka sisävalaistuksessa käytettävissä lamppuissa on 400–12000 lm ja ulkovalaistuksessa 2000–47000 lm. (Fagerhult 2012, 429; Halonen & Lehtovaara 1992, 35)

Useilla eri lampputyypeillä valovirta riippuu ympäristön lämpötilasta ja pienloistelampuilla myös valaisimen asennosta. Nimellisvalovirta on valonlähteen tuottama valovirta standardin mukaisessa 25 °C lämpötilassa. (Fagerhult 2012, 429)

2.1.3 Valaistusvoimakkuus

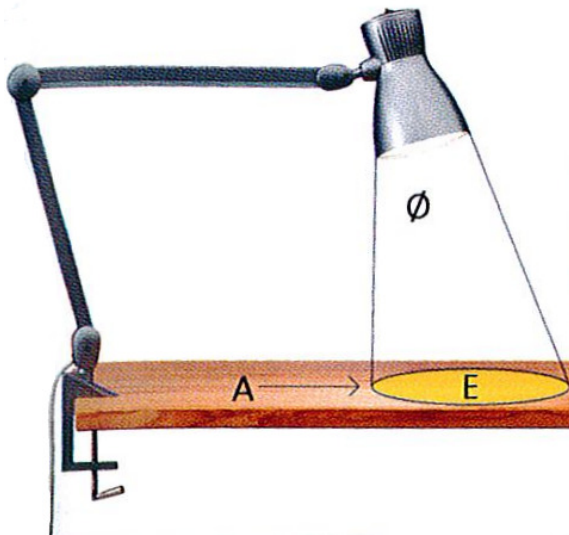
Valaistusvoimakkuus E kuvaa tietylle pinta-alalle saapuvaa valovirran tiheyttä. Valaistusvoimakkuudelle voidaan kirjoittaa seuraava yhtälö:

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (1)$$

jossa Φ = valovirta (lm)

A = pinta-ala (m^2)

Valaistusvoimakkuuden yksikkö on siis lumenta neliömetrille (lm/m^2) eli luks (lx).



KUVA 2. Valaistusvoimakkuus (Fagerhult 2012, 429)

Koska valaistusvoimakkuus riippuu suoraan pinta-alalle tulevasta valovirrasta ja kääntäen valaistavan pinnan alasta, seuraa tästä käänteinen neliölaki, jonka mukaan valaisimen ja valaistavan pinnan välisen etäisyyden kaksinkertaistuessa valaistusvoimakkuus laskee neljäsosaan. Valaistusvoimakkuus muuttuu myös kun valaistavaa kohdetta käännetään. (Fagerhult 2012, 429; Halonen & Lehtovaara 1992, 36)

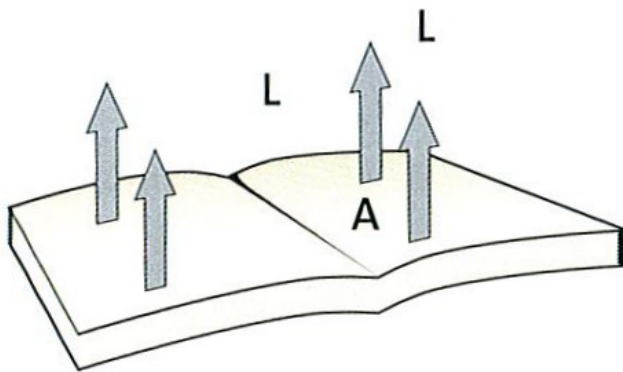
2.1.4 Luminanssi

Luminanssi L ilmaisee valaistavan tai valaisevan pinnan valotiheyttä eli pintakirkkautta. Luminanssi kertoo valovoiman tarkastelusunnassa projektiopinta-alaa kohti.

$$L = \frac{I}{A} \quad (2)$$

jossa I = valovoima (cd)
 A = projektiopinta-ala (m^2)

Luminanssin yksikkö on kandela neliömetrille (cd/m^2).



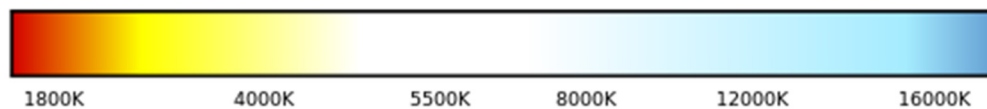
KUVA 3. Luminanssi (Fagerhult 2012, 429)

Luminanssi on siis valaistustekniikan ainoa silmin nähtävissä oleva suure. Mitä kirkkaammalta tarkasteltava pinta (esim. työtaso tai lampun pinta) näyttää, sitä suurempien luminanssi on. Esimerkiksi taivaankannen luminanssi on $8000 \text{ cd}/\text{m}^2$ ja vastaavasti 36 W loistelampun pinnan $10\,000 \text{ cd}/\text{m}^2$. (Fagerhult 2012, 429)

2.2 Lamppuihin liittyviä käsitteitä

2.2.1 Värilämpötila

Värilämpötila on valkoiseksi käsitetyn valon, kuten lamppujen valon ja auringonvalon mitattava ominaisuus ja se kuvaa valonlähteen värisävyä. Värilämpötilan yksikkö on kelvin (K). Mitä korkeampi värilämpötilan arvo on, sitä kylmempi ja sinertävämpi valonlähteen tuottaman valon väri on (kuva 4). Ihmissilmä pystyy näkemään värilämpötiloja noin 2790–11000 K. (Lampputieto 2009, Oversol)



KUVA 4. Värilämpötila-asteikko (Oversol)

Värilämpötila otetaan huomioon sisätilojen valaistusta suunniteltaessa, ja se vaikuttaa suuresti valaistavan tilan tunnelmaan. Tavallisen hehkulampun tuottaman valon värilämpötila on 2700 K, joka vastaa lämpimän valkoista, hieman kellertävää valoa. Halogeenilampun värilämpötila on noin 3000 K. Loiste- ja LED-lamppujen värilämpötiloissa on suurta vaihtelua. Niiden värilämpötilat voivat vaihdella 2700–6500 K. (Lampputieto 2009)

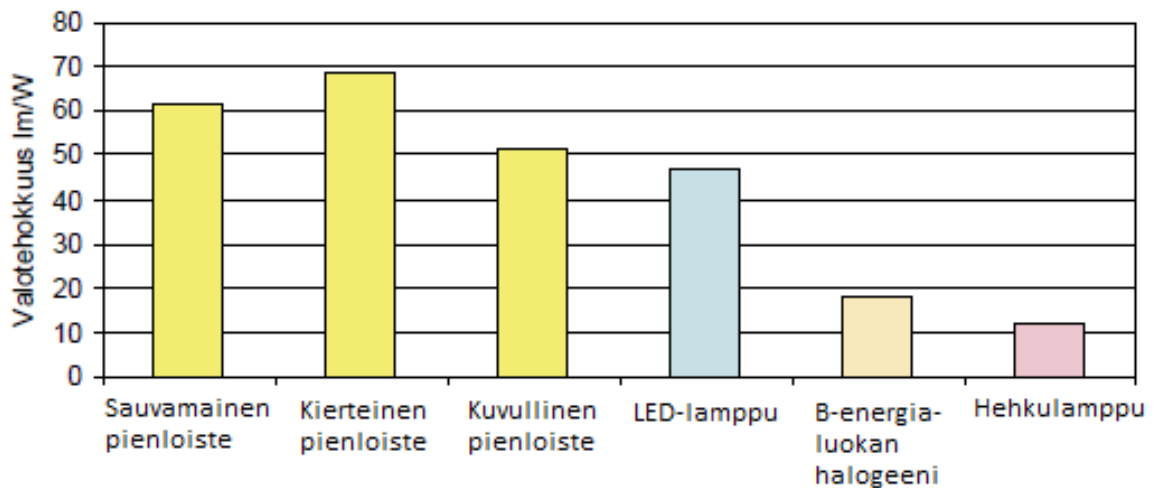
2.2.2 Valotehokkuus

Valotehokkuus η kuvaa sitä, kuinka tehokkaasti lamppu muuttaa sähköä valoksi. Valotehokkuus voidaan laskea jakamalla lampun tuottama valovirta lampun ottamalla teholla. (Tetri, Raunio & Halonen 2011, 8)

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (3)$$

jossa Φ = valovirta (lm)
 P = sähköinen pätöteho (W)

Tyypillisen hehkulampun valotehokkuus on vain noin 10–15 lm/W, kun esimerkiksi pienloistelampulla päästään yli 60 lm/W arvoihin. Hehkulamppujen korvaajiksi tarkoitettujen LED-lamppujen valotehokkuus on hieman alle 50 lm/W, mutta niitä kehitetään voimakkaasti ja arvioiden mukaan niillä voidaan päästä jopa 200 lm/W arvoihin vuoteen 2020 mennessä. (Tetri ym. 2011, 8)

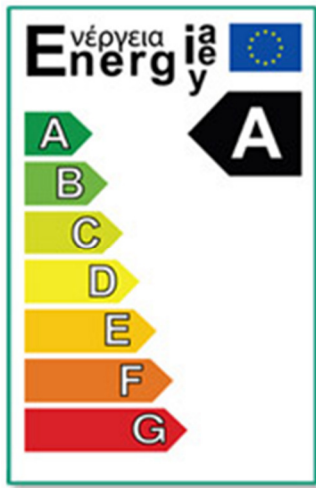


KUVA 5. Kierrekantaisten lamppujen valotehokkuudet (Tetri ym. 2011, 8)

Hehku- ja halogeenilamppujen heikko valotehokkuus onkin ollut merkittävä syy siihen, että niitä on alettu korvata loiste- ja LED-lampuilla. Etenkin LED-lamppujen odotetaan yleistyvän voimakkaasti tulevaisuudessa. Toistaiseksi ne ovat kuitenkin hankintakustannuksiltaan melko kalliita ja laadultaan arvaamattomia standardisoinnin puutteen takia (Sähköturvallisuuden edistämiskeskus 2009), joten loistelamput ovat vielä pienkuluttajalle ehkä se järkevämpi vaihtoehto hehku- ja halogeenilamppujen korvaajiksi

2.2.3 Energiatohokkuusmerkintä

EU:n alueella käytössä oleva energiatohokkuusmerkintä luokittelee lamput valotehokkuuden ja käyttöiän perusteella. Energiatohokkuusluokka ilmoitetaan lampun pakkauksessa. Lamput luokitellaan energialuokkiin kirjaimilla A–G, joista A on paras ja G huonoin. Hehkulamput kuuluvat yleensä luokkaan E, halogeenilamput luokkiin B–D ja lähes kaikki LED- ja pienloistelamput luokkaan A. (Taloon)



KUVA 6. Energiatohokkuusmerkintä (Euroopan komissio)

Merkinnän skaala alkaa olla lamppujen osalta ajastaan jälkeenyäännyt, sillä luokkia E–G ei enää saa myydä ja markkinoilla on heikoimpia A-luokan tuotteita tehokkaampia ratkaisuja. (Taloon)

2.2.4 Värintoistokyky

Värintoistokyky kertoo, kuinka hyvin valonlähde toistaa valaistavan tilan, huonekalujen ja muiden esineiden värit. Värintoistokyky ilmaistaan värintoistoindeksillä eli Ra-indeksillä, jonka asteikko on 0–100. Mitä suurempi luku, sitä luonnollisemmin värit toistuvat. Värintoisto-ominaisuksiltaan paras on päivänvalo, jonka Ra-indeksi on 100. (Säköturvallisuuden edistämiskeskus ry 2012; Lamputieto 2009)

TAULUKKO 1. Värintoistoindeksin asteikko (Säköturvallisuuden edistämiskeskus ry 2012)

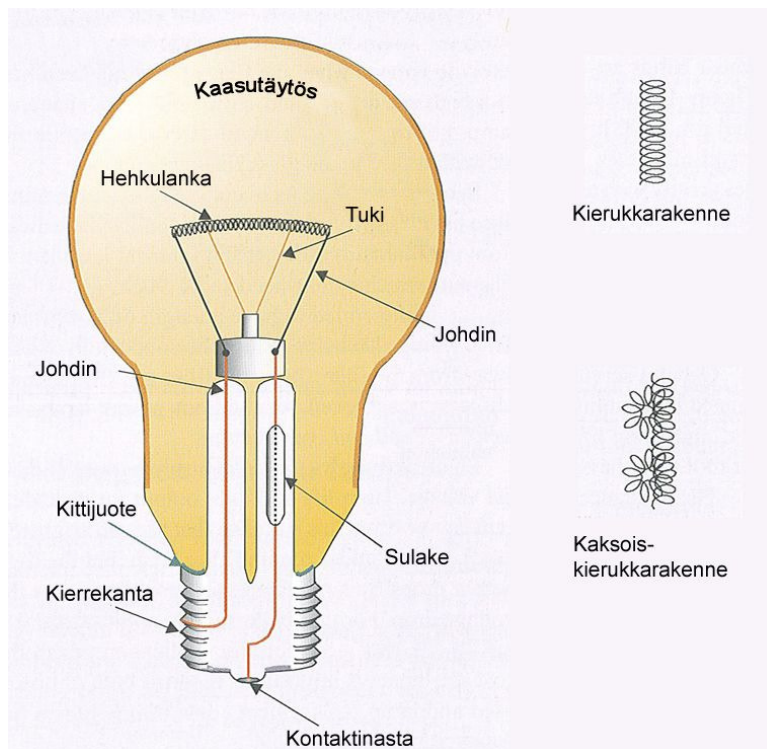
Ra-indeksi	arvosteluasteikko	valonlähdetyyppi
100	täydellinen	auringon tuottama päivänvalo, hehku- ja halogeenilamput
90-100	erinomainen	erikoisloistelamput, laadukkaat LED-lamput, muut erikoislamput
80-90	hyvä	tavalliset loistelamput, monimetallilamput, pienoisloistelamput, tavalliset LED-lamput
70-80	tydyttävä	heikkolaatuiset loistelamput
50-70	välttävä	jotkut katulamput, heikkolaatuiset loistelamput
0-50	huono	katu- ja tievalaistus yleensä
0	ei värintoistoa	pienpainenaatriumlamput, monokromaattiset valonlähteet, laservalo

Kodin sisätilojen valaistuksessa suositellaan käytettäväksi valonlähteitä, jotka ovat värintoistokyvyltään vähintään 80. Sisävalaistuksessa Ra-indeksiltään heikompia valonlähteitä voidaan käyttää esim. varastoissa ja aputiloissa. (Säköturvallisuuden edistämiskeskus ry 2012; Lamputieto 2009)

3 LAMPUT

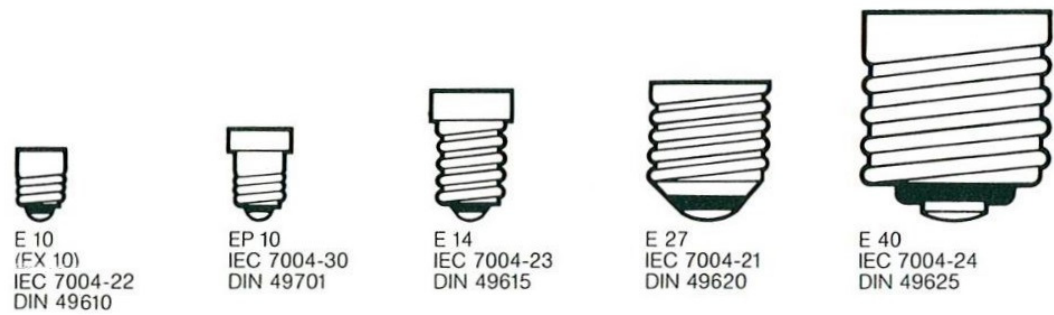
3.1 Hehkulamput

Hehkulamppu on lamputyypeistä vanhin. Hehkulamppujen toiminta perustuu vastuksena toimivan hehkulangan kuumentamiseen sähkövirralla hapettomassa tilassa riittävän korkeaan lämpötilaan (2650–2750 K) jolloin lanka alkaa säteillä valoa. Hehkulamppu koostuu lasikuvusta, jonka sisällä on hehkulanka sekä johtimet, joiden väliin hehkulanka on ripustettu päistään. Lisäksi hehkulamputissa on metallinen kanta, jolla lamppu liitetään valaisimeen. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 16–17)



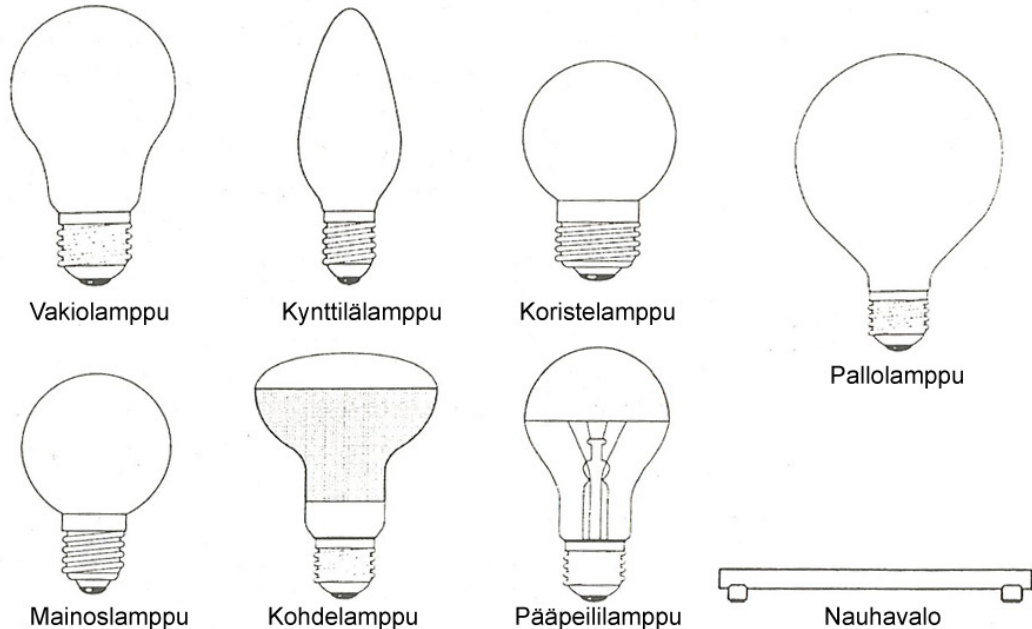
KUVA 7. Hehkulamputin rakenne (Simpson 2003, 113)

Hehkulamputille on standardoitu useita erilaisia kantoja (kuva 8), joista yleisimmin käytössä on E27, eli ns. Edison-kanta, joka on ruuvimainen kierrekanta. Hehkulamputin kanta on valmistettu yleensä alumiinista tai messingistä. Kannan johtavat osat on liitetty johtimien ulkopäihin, jotta sähkövirta saadaan johdettua hehkulankaan. Yleensä toisessa johdikkeessa on myös sulake. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 18, 23)



KUVA 8. Yleisimmät hehkulampujen kannat (Halonen & Lehtovaara 1992, 184)

Hehkulampun kupu on yleensä päärynänmuotoinen, joka voi olla joko kirkasta lasia tai pintakäsiteltyä. Käsitteily tasoittaa lampun lähettämää valoa ja estää kierukan näkymisen kuvun ulkopuolelle. Kupu voidaan myös opaloida, jolloin valo saadaan lähtemään laajemmalla pinnalta, mutta se absorboi valosta 5–15%. Kupu on tyhjiöity tai täytetty kaaseoksella, jolla estetään volframilangan hapettuminen sekä hidastetaan volframin höyrystymistä. Koristekäyttöä varten valmistetaan myös erilaisia kupumalleja kuten putkimaisia, kynttilänmuotoisia sekä muotoiltuja kuputyyppejä. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 17–18)



KUVA 9. Erilaisia hehkulampumalleja (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 26)

Hehkulanka valmistetaan volframimetallista, koska sen höyrystyminen korkeissa lämpötiloissa on varsin vähäistä. Langan höyrystyminen johtaa langan ohenemiseen ja lopulta langan katkeamiseen. Hehkulankaa kutsutaan usein myös kierukaksi, koska lanka

on kierretty spiraalin muotoon kokonaispituuden lyhentämiseksi ja lämpöhäviöiden pienentämiseksi. Joissain malleissa käytetään myös kaksoiskierukkarakennetta. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 16)

Hehkulamput ovat olleet hyvin yleisessä käytössä varsinkin kotikäytössä, pienen koon, teknisen yksinkertaisuuden, hankintahinnan ja hyvän värintoiston ansiosta. Hehkulampuilla on uudempiin lampputyyppeihin verrattuna hyvin lyhyt elinikä, joka on noin 750–1000 h. Lisäksi hehkulamppujen valotehokkuus on hyvin alhainen, sillä suurin osa lampun kuluttamasta sähköenergiasta muuttuu lämmöksi. Siksi niitä on alettu korvata muilla lampputyypeillä, kuten halogeeni-, loiste- ja LED-lampuilla. Vaihtoa muihin lampputyyppeihin ovat vauhdittaneet myös uudet säädökset. EU:n alueella huonevalaistukseen tarkoitettujen yli 7 W hehkulamppujen valmistaminen ja maahantuonti on ollut kiellettyä 1.9.2012 alkaen. Kaupat saavat kuitenkin myydä varastonsa loppuun. Kielto ei koske ei-kotikäyttöön tehtyjä erikoislamppuja. (Wikipedia)

Nykyään siis hehkulamppujen käyttö yleisessä sisävalaistuksessa on suuresti vähene-
mään päin. Niiden tarkastelu on kuitenkin tarpeellista, sillä muita lampputyyppejä yleensä vertaillaan ominaisuuksiensa puolesta juuri hehkulamppuihin. Tämän lisäksi varsinkin kotikäyttöön tarkoitettujen muiden lampputyyppeiden, kuten loiste- ja LED-lamppujen, tiedoissa ilmoitetaan minkä tehoista hehkulamppua kyseinen lamppu vastaa. Esimerkiksi teholtaan 3 W LED-lamppu voidaan ilmoittaa olevan valontuotoltaan 15 W hehkulamppua vastaava.

3.2 Halogeenilamput

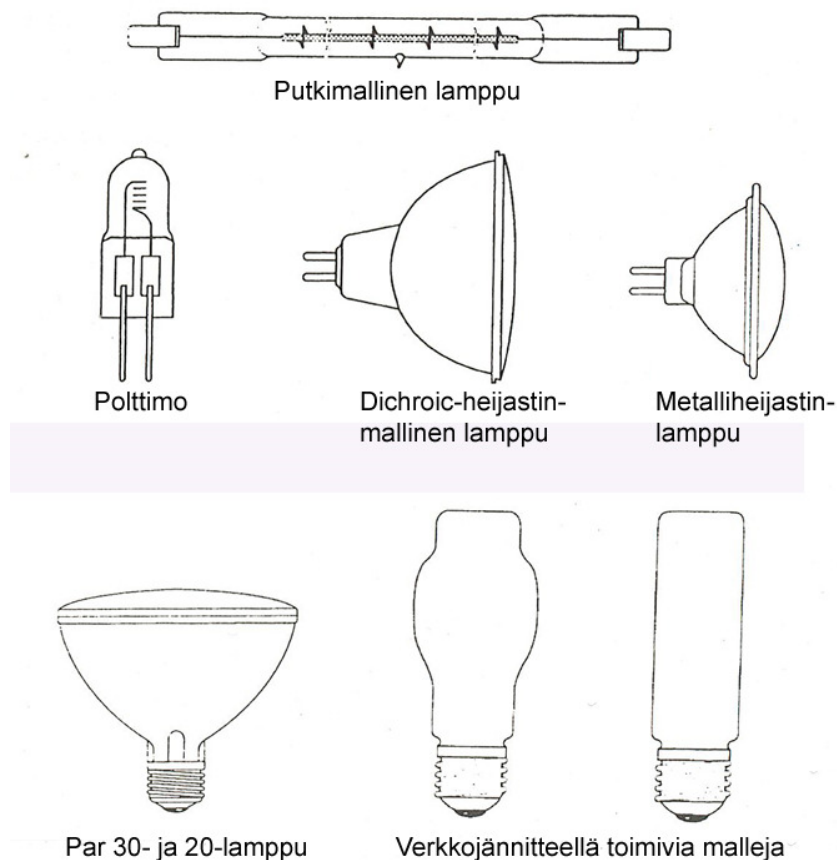
Halogeenilampun muistuttaa toimintaperiaatteeltaan ja ominaisuuksiltaan hehkulamppua, eli valontuotto perustuu hehkulangan kuumentamiseen. Halogeenilamput hyödynnetään halogeenikaasun kykyä palauttaa hehkulangasta höyrystyneet volframatomit takaisin lankaan, jolloin lampun käyttöikä kasvaa. Atomit eivät kuitenkaan pala samaan kohtaan langalla mistä ne höyrystyivät, joten jossain vaiheessa kierukka kiteytyy ja katkeaa. Halogeenitäytteen ja suuremman täytöspaineen ansiosta kierukka voidaan lämmittää korkeampiin lämpötiloihin, jolloin valotehokkuus paranee. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 27, 30)

Koska halogeenilamppujen kuvuilta vaaditaan suurta lämmönkestävyyttä ja mekaanista kestävyyttä, on ne hehkulamputa poiketen tehty joko kvartsista tai kovalasista. Kuvut ovat myös paljon pienempiä kuin vastaavan tehoisissa hehkulamputa, parhaimmillaan tilavuus on vain 1 % vastaavasta hehkulamputa tilavuudesta. Näin päästään tarvittaessa myös pienempiin lamputa kokoihin. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 29)

Yleiskäyttövalaistukseen tarkoitettut halogeenilamput voidaan jakaa rakenteellisesti seuraaviin pääryhmiin:

- kaksikantaiset verkkojännitteellä toimivat putkimalliset lamput,
- yksikantaiset verkkojännitteellä toimivat hehkulamputa muistuttavat lamput sekä
- pienoisjännitteellä toimivat polttimoon perustuvat lamput. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 28)

Kuvassa 10 on esitettyä erilaisia halogeenilamputa malleja.



KUVA 10. Erilaisia halogeenilamputa (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 28)

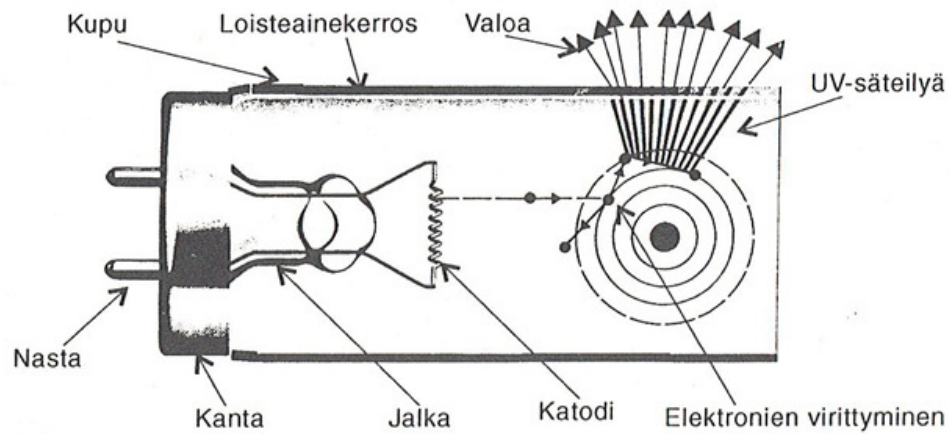
Ulkonäöltään hehkulamppua muistuttavia, verkkojännitteellä toimivia halogeenilamppuja käytetään hehkulamppujen korvaamiseen niiden paremman energiatehokkuuden takia niissä kohteissa, mihin muut lampputyypit eivät sovellu, kuten esimerkiksi himmenninkäytöt.

Halogeenilamput, hehkulamppujen tavoin, ovat ainakin osittain poistumassa markkinoilta. Verkkojännitteellä toimivat yli 60 W lamput ovat jo poistuneet, ja 1.9.2016 jälkeen markkinoilta poistuvat pienoisjännitteellä (12 V) toimivat sekä xenon-täytteiset halogeenilamput. Jäljelle jäävät vain energialuokan B halogeenilamput, joiden valikoiman odotetaan kasvavan lähitulevaisuudessa. (Sähköturvallisuuden edistämiskeskus 2009)

3.3 Loistelamput

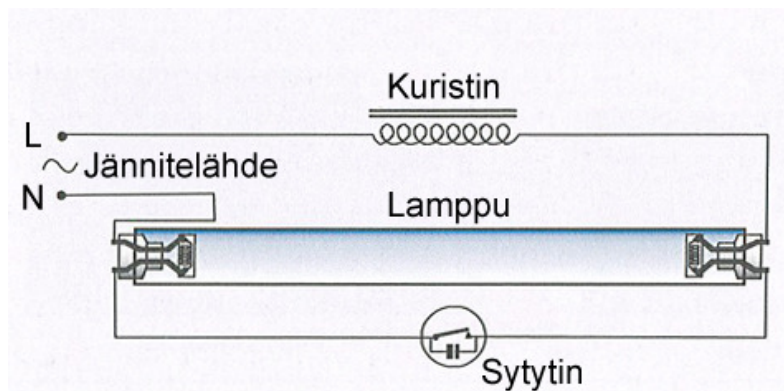
Loistelampun tai loisteputken toiminta perustuu matalapaineiseen sähköpurkaukseen. Loistevalaisin koostuu loistelampusta ja erillisestä liitäntälaitteesta.

Loistelampun päissä olevien elektrodien välille aikaansaatu sähköpurkaus virittää pienpaineisen täytöskaasuna olevan elohopeahöyryn atomeja. Kun viritetyt elektronit palaavat takaisin alemmille energiatasoille, ne lähettävät (emittoivat) ultraviolettisäteilyä ja näkyvää valoa. Loistelampun sisäpinta on päällystetty loisteainekerroksella, joka muuttaa UV-säteilyn näkyväksi valoksi. Valo syttyy ja sammuu 50–100 Hz taajuudella, joka saattaa aiheuttaa silmien rasittumista tai päänsärkyä. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 34; Wikipedia)



KUVA 11. Loistelampun toimintaperiaate (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 34)

Loistelamppua ei voida kytkeä suoraan verkkoon, vaan lisäksi tarvitaan liitälaitte ohjaamaan lampun toimintaa. Perinteisen liitälaitteen pääkomponentit ovat kuristin ja sytytin.



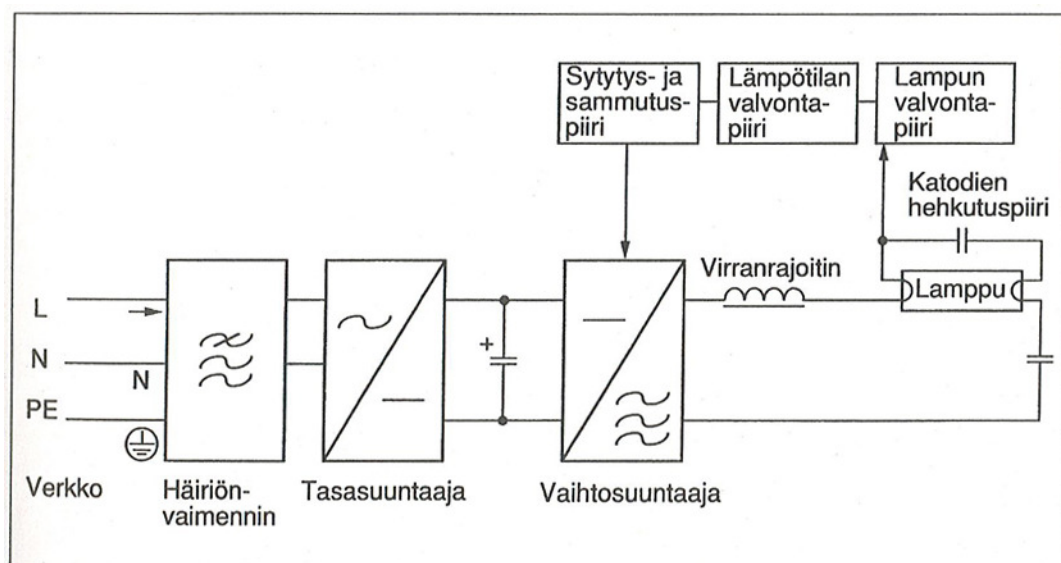
KUVA 12. Perinteisen liitälaitteen pääkomponenttien kytkentäkuva (Simpson 2003, 122)

Loistelampuilla sähköpurkauksen vastus pienenee virran kasvaessa. Jos lamppu on kytketty suoraan jännitelähteeseen, virta kasvaa jatkuvasti kunnes johdikkeet sulavat tai lamppu rikkoutuu. Virtaa täytyy siis rajoittaa kuristimella, joka kytketään lampun kanssa sarjaan. Kuristin on yksinkertaisimmillaan rautasydäminen käämi. Virranrajoitukseen ei käytetä vastusta, koska tehohäviöt kasvaisivat liian suuriksi. Kondensaattoria voidaan käyttää kun käytössä on yli 400 Hz taajuus, muussa tapauksessa lampun elektrodit eivät kestä kondensaattorien synnyttämiä varaus- ja purkausvirtoja. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 37, 79)

Loistelamppu ei syty normaalilla käyttöjännitteellä ilman katodien esihehkutusta. Esihehkutuksessa katodit kuumennetaan riittävään lämpötilaan, jolloin katodien lähettyvillä olevat kaasuatomit ionisoituvat. Tämän jälkeen katodien välinen pääpurkaus syntyy helposti. Esihehkutusta tehdään sytyttimellä tai erillisellä hehkutusmuuntajalla. Sytytin on rele, joka liitetään katodien kautta kulkevaan sytytyspiiriin. Piiri on suljettuna esihetkityksen aikana, jolloin katodien välinen jännite nolla. Sytyttimen piiri aukaistaan 1–2 s kuluttua ja täysi jännite muodostuu katodien välille, jolloin lamppu syttyy. Ellei lamppu tästä huolimatta syty, sytytin toimii uudelleen. Sytyttämisyriyksille voidaan asettaa erillisellä piirillä yläraja, ettei lamppu jäisi vilkkumaan. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 38–39)

Liitälaitteen tehtäviin voi kuulua myös esimerkiksi verkkojännitteen muuntaminen lampulle sopivaksi, kuristimesta syntyvän loistehon kompensointi, häiriöiden vaimentaminen sekä verkkojännitteen stabilointi. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 79)

Perinteisen liitälaitteen sijaan voidaan käyttää elektronista liitälaitetta, joka on uusissa valaisimissa syrjäyttänyt perinteiset liitälaitteet lähes kokonaan. Elektroninen liitälaitte nostaa lampulle syötettävän virran taajuuden 30 000 Hz:iin tai korkeammalle, ja se korvaa perinteisen liitälaitteen kuristimen, sytyttimen sekä muut komponentit. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 106, 109; Wikipedia)



KUVA 13. Elektronisen liitälaitteen osat (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 109)

Elektronisella liitäntälaitteella saavutetaan muun muassa pienempi energian kulutus korkeamman taajuuden ansiosta, lampun pienempi lämpenemä, valotehon hitaampi alenema, nopeampi syttyminen sekä laajat valonsäätömahdollisuudet. Tärkein etu perinteiseen liitäntälaitteeseen verrattuna on loistelampun välkynnän eliminointi korkeamman taajuuden ansiosta, jolloin silmät rasittuvat vähemmän. (Ad-lux)

Loistelamput voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: kaksi- ja yksikantaisiin loistelamppuihin.

Kaksikantaiset loistelamput ovat suoria putkia ja ne liitetään valaisimeen molemmista päistään. Näistä yleisimmin käytössä ovat läpimitaltaan 26 mm paksut T8-lamput, eli ns. vakioloistelamput, joiden tehoalue on 18–58 W. Niiden käyttökohteita ovat mm. toimistot, myymälät, koulut ja muut yleisvalaistuskohdeet, joissa valoja pidetään pitkään päällä. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 44; Halonen & Lehtovaara 1992, 213)

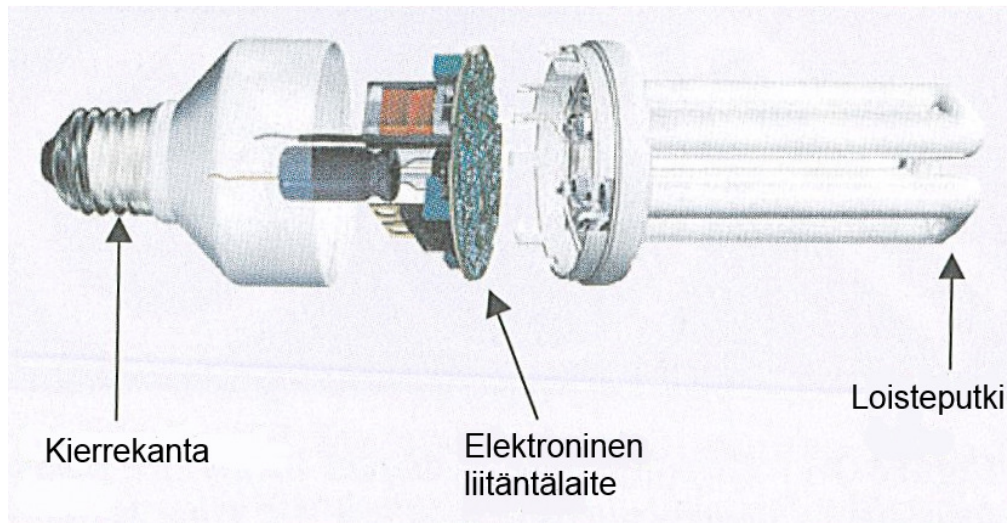
Yksikantaloistelamppujen kehitys on ollut viime aikoina voimakkaampaa kuin kaksikantaisten, ja niistä suuritehoisimmilla voidaan korvata vakioloistelamppuja. Yksikantaiset loistelamput voidaan edelleen jakaa pistokantaisiin ja kierrekantaisiin lamppuihin, joista jälkimmäiset on tarkoitettu korvaamaan hehkulamppuja. Yksikantaisissa loistelampuissa loisteputki on taivutettu U:n muotoon (tai H-kirjainta muistuttavaksi), jolloin lampusta on saatu lyhyempi. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 45; Halonen & Lehtovaara 1992, 217)

Monisauvaisissa loistelampuissa loisteputkia on liitetty useampia sarjaan ja asetettu ne vierekkäin, jolloin saavutetaan pitemmän purkausputken ansiosta suurempi valovirta. (Halonen & Lehtovaara 1992, 221)

3.4 Pienloistelamput

Pienloistelamput eli ns. energiansäästölamput ovat kierrekantaisia loistelamppuja, ja ne on tarkoitettu korvaamaan hehkulamput valaisimissa. Pienloistelamput toimivat tavallisten loistelamppujen tavoin, mutta niissä on elektroninen liitäntälaite integroituna lam-

pun kantaosaan, joten ne eivät tarvitse erillistä liitäntälaitetta ja ne voidaan asentaa suoraan hehkulamppujen tilalle. (Lampputieto 2009)



KUVA 14. Pienloistelampun rakenne (Simpson 2003)

Pienloistelamput kuluttavat 65–80 % vähemmän energiaa kuin vastaavan valovirran tuottava hehkulamppu. Niiden elinikä on laadusta ja käytötavasta riippuen 6 000–20 000 h eli siis noin 6–20 -kertainen hehkulamppuihin verrattuna. Ne myös tuottavat lämpöä vain murto-osan hehkulamppuihin verrattuna, joten ne sopivat myös ahtaisiin valaisimiin. (Helsingin Energia)

Pienloistelampuilla on pitkä syttymisaika. Valontuoton nousu 60 %:iin maksimista kestää 15–120 s. Pienloistelamput sopivatkin käyttökohteisiin, joissa valoja pidetään pitkään päällä. (Helsingin Energia, Lampputieto 2009)

Pienloistelamppuja on saatavana E 27- ja E 14-kierrekannoilla. Pienloistelamppuja on saatavilla erilaisten loisteputkimuotojen lisäksi myös kuvullisena mallina, joka muistuttaa hehkulamppua. (Säköturvallisuuden edistämiskeskus 2009)



KUVA 15. Erimallisia pienloistelamppuja (Lampputieto 2009)

Pienloistelamppuja on myös pistokantaisina, jolloin ne tarvitsevat oman valaisimensa, jossa liitântälaite on erikseen. (Säköturvallisuuden edistämiskeskus 2009)

3.5 LED

LED, eli hohtodiodi tai ledi, on puolijohdekomponentti, joka säteilee yhden sävyn valoa kun sen läpi johdetaan sähkövirtaa.



KUVA 16. LED (Wikipedia)

Ledejä on käytetty pitkään lähes yksinomaan elektronisten laitteiden merkkivaloina ja LED-näytöissä, mutta viime aikoina ne ovat alkaneet yleistyä myös valaistuksessa. Tämän ovat mahdollistaneet entistä valovoimaisempien ledien kehittyminen ja etenkin valkoisen ledin keksiminen 90-luvun puolivälissä. Valkoinen ledi perustuu siniseen lediin, joka on päällystetty fluoresoivalla loisteaineella, joka muuttaa osan säteilystä keltäväksi siten, että silmän aistima valon väri on valkoinen. Valkoinen väri voidaan myös muodostaa sekoittamalla sinisten, punaisten ja vihreiden ledien valoa. Tällaisten

RGB-ledien värintoistokyky on kuitenkin heikko, joten ne eivät sovellu valaistuskäyttöön. (Wikipedia)

LED-valaisimien tärkeimpiä etuja perinteisiin valolähteisiin ovat mm. pieni koko, alhainen energiankulutus, korkeampi hyötysuhde, pitkä käyttöikä (jopa 80 000 h), pieni huollontarve, nopea syttyminen ja sammuminen, hyvä värinän kesto, ei kärsi sytytyksistä tai sammutuksista, materiaalien ympäristöystävällisyys, pienempi lämpeneminen sekä helppo säädettävyys ja ohjaus. Heikkouksia ovat mm. kallis hankintahinta, lämpöherkkyys sekä valovirran alenema käytön myötä. (FarmLED 2012; Niskanen & Savela 2008, 2)

Ledit toimivat tasajännitteellä ja niiden tuottama valovirta on verrannollinen niiden läpi kulkemaan tasavirtaan. Jännitteen heilahtelut aiheuttavat ledin tuottamassa valotehossa vaihtelua. Siksi ledivalomoduulit tarvitsevat liitäntälaitteen. LED-liitäntälaite muuntaa verkkojännitteen ledille sopivaksi tasajännitteeksi ja suojaa sitä jännitevaihteluilta. (DiLouie 2006)



KUVA 17. LED-liitäntälaite (Taloon)

Yleensä liitäntälaite on toteutettu hakkuritekniikalla. Liitäntälaite voi olla kiinteänä osana LED-valaisinta tai lamppua tai se voi olla erillinen laite, johon LED-moduulit liitetään. Liitäntälaite voi olla vakiojännitetty (10 V, 12 V tai 24 V) tai vakiovirtaa (350 mA, 700 mA tai 1 A) syöttävä. Liitäntälaite voi mahdollistaa myös himmentämisen ja valon värin vaihdon. (DiLouie 2006; Niskanen & Savela 2008, 5)

Ledien ottamasta sähköenergiasta suurin osa, jopa 60–95 %, muuttuu lämmöksi. Ledin valo itsessään ei kuitenkaan säteile lämpöä IR-säteilyn muodossa, joten LED-valaisimet

eivät kuumene hehkulamppujen tavoin. Sen sijaan ledin sisällä oleva elektroniikka tuottaa lämpöä. Ledin lämmön nousu nimellistä korkeammaksi johtaa valontuoton heikentymiseen sekä ledin eliniän dramaattiseen lyhenemiseen. Siksi ledivaloja täytyy jäähdyttää. Jäähdytys toteutetaan yleensä passiivisella jäähdytys-elementillä, jonka kautta ledin tuottama lämpö johdetaan pois. Ledien lämpöherkkyyden takia LED-valaistusta ei suositella sijoitettavan erityisen lämpimiin tiloihin, kuten saunoihin. (FarmLED 2012; lamppuopas; Niskanen & Savela 2008, 9; Whitaker 2005)

3.5.1 LED-lamppu

LED-lampulla tarkoitetaan leditekniikalla toteutettua lamppua, jolla voidaan korvata valaisimesta esimerkiksi hehku- tai halogeenilamppu. LED-lampussa liitäntälaite ja jäähdytys ovat kiinteänä osana lamppua. LED-lamppuja on saatavilla yleisimmillä lamppukannoilla. (Lampputieto 2009)

Koska yksittäisen ledin teho on pieni, yhdessä LED-lampussa voi olla useita, jopa kymmeniä ledejä, joilla saadaan tuotettua haluttu valovirta.



KUVA 18. LED-lamppu (Taloon)

LED-lamput ovat oikein asennettuina erittäin pitkäikäisiä ja energiatehokkaita. LED-lamppujen käyttöiäksi luvataan 10000–50000 h. LED-lamput syttyvät välittömästi, ei-

vätkä ne sisällä elohopeaa loistelamppujen tavoin. (Helsingin Energia, 12; Tetri ym. 2011, 12)

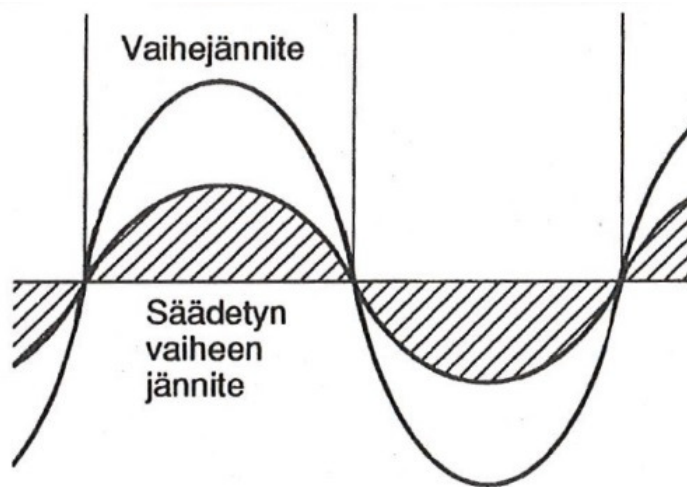
LED-lamppujen kehitys on ollut nopeaa ja niiden odotetaan tulevaisuudessa syrjäyttävän perinteiset lampputyypit. Kuitenkin toistaiseksi LED-lamppujen luotettavuudessa, väriominaisuuksissa ja eliniässä on suuria eroja (Helsingin Energia, 12). Nämä seikat yhdistettynä kalliiseen hankintahintaan ainakin toistaiseksi hidastavat niiden yleistymistä.

4 VALONSÄÄTÖ

4.1 Valonsäätö yleisesti

Valonsäätöä käytetään muun muassa energian säästämiseen, valaistavan tilan tunnelman luomiseen tai valaistusolosuhteiden parantamiseen. Lähes kaikkia on mahdollista säätää jollakin tavalla, mutta kaupalliset säätimet on suunniteltu pääasiassa hehku-, halogeeni-, LED- tai loistelamppuja varten. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 121)

Valonsäätö perustuu lampun jännitteen säätöön. Ennen tehpuolijohdetekniikan kehittymistä 1960-luvulla, jännitteensäätö toteutettiin vastusten, sarjaimpedanssien tai säädettävien muuntajien avulla. Näitä säätötapoja käyttämällä jännitteen huippu- tai tehollisarvoa voitiin muuttaa jännitteen käyrämuodon pysyessä kuitenkin sinimuotoisena. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 121)



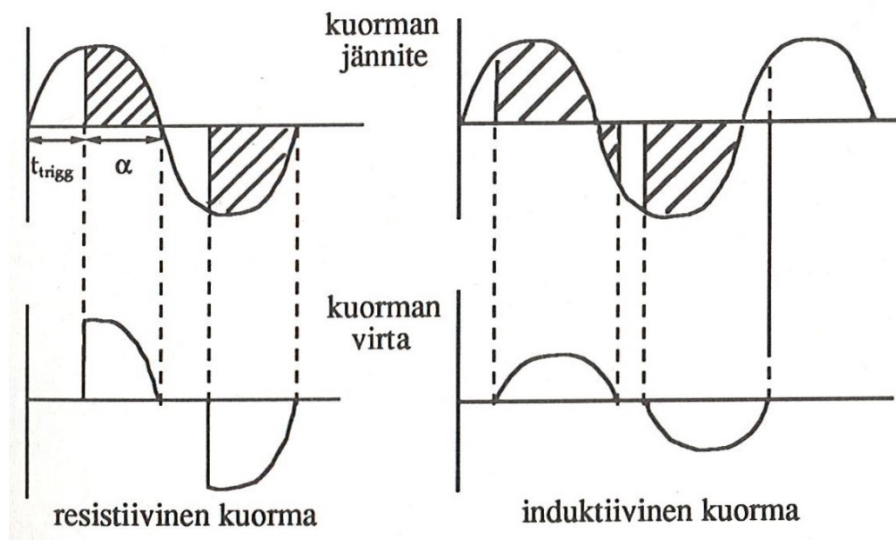
KUVA 19. Jännitteen amplitudin säätö (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 121)

Edellä mainitut ratkaisut tekevät kuitenkin säätimistä isokokoisia, hankalia kauko-ohjata sekä hyötysuhteeltaan heikkoja, joten näitä säätötapoja ei juuri enää käytetä paitsi joissakin erikoissovelluksissa. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 121; Halonen & Lehtovaara 1992, 306)

4.2 Valonsäätö tyristorin ja triakin avulla

Nykyään yleisimmin valonsäätimien toiminta perustuu vaihejännitteen leikkaamiseen puolijohteilla, jolloin lampun käyttöjännitteen tehollisarvo laskee. Tehollisarvon laskiessa myös lampun tuottama valovirta laskee.

Tyristori on ohjattava puolijohde, joka johtaa virtaa vain yhteen suuntaan. Tyristori saadaan johtavaan tilaan tuomalla sen hilalle liipaisupulssi. Tällöin lampun jännite nousee heti vaihejännitteen arvoon ja seuraa vaihejännitettä seuraavaan nollakohtaan saakka. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 122; Halonen & Lehtovaara 1992, 307)



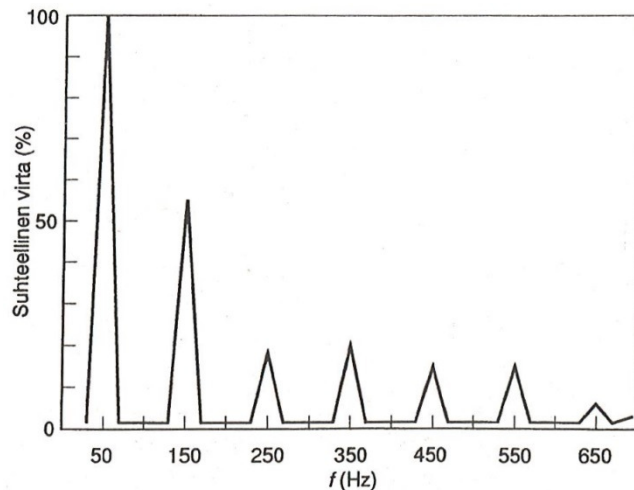
KUVA 20. Jännitteen säätö tyristorilla. t_{trigg} on hetki, jolloin tyristori liipaistaan (Halonen & Lehtovaara 1992, 307)

Syttymisen edellytyksenä on se, että tyristorin anodijännite on liipaisuhetkellä positiivinen. Säätimessä kaksi tyristoria on asetettu vastarinnan, jolloin toinen johtaa positiivisen ja toinen negatiivisen puolijakson aikana. Vastarinnan kytketyt tyristorit voidaan korvata pienemmän teholuokan säätimissä triakilla. Triakki on kaksisuuntainen tyristori, joka pystyy johtamaan virtaa molempiin suuntiin. Triakin koko ja kustannukset ovat pienemmät tyristoriin verrattuna, mutta sen ohjaaminen ei ole yhtä tarkkaa. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 122; Halonen & Lehtovaara 1992, 307)

Tyristori on herkkä jännitteen vaihteluille toimintaperiaatteensa takia. Koska tyristori on liipaisun jälkeen johtavassa tilassa seuraavaan nollakohtaan asti, mahdollisten häiriöi-

den kompensointi pääsee vaikuttamaan vasta seuraavan liipaisun ajoitukseen. Tämä saattaa aiheuttaa epätasaisuuksia valon tasossa verkoissa, joissa sähkön laatu on huono. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 121)

Säädin myös itse tuottaa yliaaltovirtoja liipaisutilanteiden nopeiden muutosvirtojen takia. Yleensä kolmannen ja viidennen harmoniset yliaallot ovat suurimmat. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 122, 126; Halonen & Lehtovaara 1992, 307)



KUVA 21. Tavallisen säätimen verkkovirran harmoniset yliaallot (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 126)

Tyristorisäätimen häiriöitä voidaan suodattaa laitekohtaisesti häiriönpoistokuristimen ja –kondensaattorin avulla. Säätimien tuottamien yliaaltovirtojen määrää rajoitetaan standardeilla. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 126)

4.3 Eri lampputyypin valonsäätö

4.3.1 Hehku- ja halogeenilamput

Hehku- ja verkkojännitteellä toimivat halogeenilamput ovat resistiivisiä kuormia, joten niiden säätö on yksinkertaista. Lamput voidaan suoraan kytkeä säädettyyn vaihejännitteeseen. Säätöalue on 1–100 %. Huomioitavaa on, että halogeenilamppujen halogeenikierto hidastuu tai ei toimi ollenkaan käyttöjännitteen ollessa pitkiä aikoja hyvin

alhainen, jolloin lampun käyttöikä lyhenee huomattavasti. (Suomen Sähkö- ja teleura-koitsijaliitto ry... 1998, 131; Riikkula 2004, 3)

4.3.2 Loistelamput

Kaksikantaisten elektronisilla liitälaitteilla varustettujen loistelamppujen säätö onnistuu useammalle eri tavalla. Joitakin elektronisia liitälaitteita voidaan suoraan säätää tyristori- tai triakkisäätimellä. Sekä säätimen että liitälaitteen tulee kuitenkin olla yhteensopivia. Ohjattavat liitälaitteet ovat nykyään yleensä toteutettu analogisella tasajänniteohjauksella. Liitälaitteelle tuodaan 1–10 V tasajännitesignaali, joka säätää valon tasoa. Muita säätötapoja ovat osoitteellinen digitaaliohjaus (DALI), osoitteeton digitaaliohjaus (DSI) sekä liitälaitteen suora painikeohjaus. (Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry... 1998, 133)

Kierrekantaisia pienloistelamppuja ei yleensä voida säätää. Jonkin verran himmennettäviä malleja markkinoilla kuitenkin on.

4.3.3 LED-lamput

Joitakin kierrekantaisia LED-lamppuja pystytään suoraan säätämään hehku- ja halogeenilampuille tarkoitetuilla säätimillä. Säädettävyys ilmoitetaan yleensä pakkauksessa. Saatavilla on myös erityisesti LED-lamppujen valonsäätöön soveltuvia säätimiä.

5 VALAISTUKSEN VERKKOVAIKUTUKSET

5.1 Loisteho

5.1.1 Sinimuotoisen vaihtosähkön tehosuureet ja tehokerroin

Kun kyse on puhtaasti sinimuotoisesta vaihtosähköstä, ovat sen tehosuureet näennäisteho S_1 , pätöteho P_1 ja loisteho Q_1 . Pätöteho on varsinainen työtä tekevä osa tehosta ja loisteho verkon tai sähkölaitteen reaktiivisten komponenttien aiheuttama ”hukkateho”, joka ei tee työtä kuten pätöteho. Pätöteho ja loisteho yhdessä muodostavat näennäistehon kaavan 4 mukaisesti.

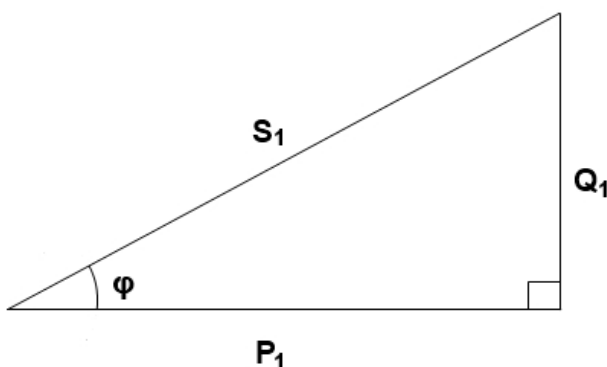
$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (4)$$

jossa S_1 = perustaajuinen näennäisteho

P_1 = perustaajuinen pätöteho

Q_1 = perustaajuinen loisteho

Suureista voidaan muodostaa kuvan 24 mukainen tehokolmio suureiden keskinäisten suhteiden tarkastelua varten.



KUVA 22. Perustaajuinen tehokolmio.

Perustaajuisen pätö- ja näennäistehon välistä suhdetta kuvataan tehokertoimella $\cos \varphi$ (tai *DPF*, Displacement Power Factor). Tehokerroin määritellään kaavalla 5.

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} \quad (5)$$

jossa φ = virran ja jännitteen välinen vaihesiirtokulma

Mitä lähempänä laitteen tai kuorman tehokertoimen arvo on ykköstä, sitä pienemmässä suhteessa se kuluttaa loistehoa pätötehoon nähden.

Perustajuinen loisteho voidaan suoraan laskea kuvasta 24 trigonometrian avulla johdetun kaavan 6 avulla.

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin \varphi \quad (6)$$

5.1.2 Loistehon kompensointi

Vaikka loisteho ei varsinaista työtä teekään, tulee se silti siirtää sitä kuluttavalle laitteelle. Loistehoa kuluttavia laitteita ovat muun muassa sähkömoottorit, muuntajat ja purkauslamput (Uusimäki 2004). Sähköverkon komponentit, kuten kaapelit, muuntajat ja kytkinlaitteet, mitoitetaan näennäistehon mukaan (Uusimäki 2004). Koska näennäisteho muodostuu pätö- ja loistehosta, voidaan päätellä että siirrettäessä loistehoa sähköverkossa kuluttajalle, pienenee kyky siirtää varsinaisen työn tekevää pätötehoa. Siksi loisteho pyritään kompensoimaan lähellä kulutuskohdetta.

Tyypillisesti sähköverkon kuormat kuluttavat induktiivista loistehoa, jolloin kompensointi toteutetaan kytkemällä kuorman rinnalle kompensointilaitteisto, joka koostuu kondensaattoreista. Näin tehokertoimen arvo saadaan lähemmäksi yhtä, ja loistehon siirtotarve sähköverkosta vähenee.

Kompensointi voidaan tehdä laitekohtaisesti, jolloin kompensointilaitteisto on kiinteänä osana laitetta tai sen läheisyydessä. Tällöin edellytyksenä on loistehon kulutuksen pieni vaihtelu. Laitekohtaista kompensointia käytetään esimerkiksi loistelampuissa. Kompensointi voidaan toteuttaa myös kojeryhmittäin, kuten esimerkiksi valaistuksen yhteydessä. Tällöin kompensointilaitteisto sijoitetaan tyypillisesti kojeryhmää syöttävän sähkö-

keskuksen yhteyteen. Keskitetyssä kompensoinnissa kompensointiparistot on sijoitettu pääkeskukseen. Keskitetty kompensointi on yleensä toteutettu automaattilaitteistolla, joka säätelee loistehon tuottoa kulutuksen mukaan. Näin vältetään ylikompensoinnilta. (ABB 2000, 4)

Jos kompensoitavassa verkossa on merkittävästi yliaaltoja tuottavia laitteita, kompensointi toteutetaan estokelaparistolla, joka estää resonanssien syntymisen yliaaltojen ja kompensointireaktanssien välillä, tai vaihtoehtoisesti yliaaltosuodattimella. (ABB 2000, 4)

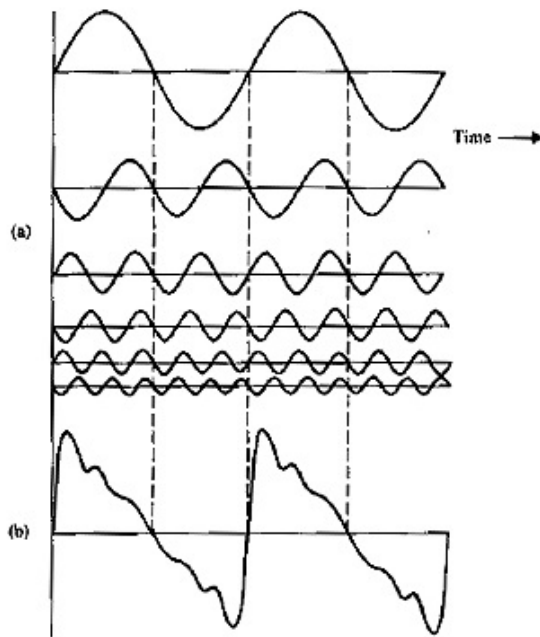
5.2 Yliaallot

Useimmat sähkölaitteet on suunniteltu toimimaan sinimuotoisella jännitteellä. Nykyään yhä useampi laite vaatii virheettömän sinijännitteen toimiakseen oikein. Sähkön käytön lisääntyessä on myös sähköverkkoon häiriöitä aiheuttavien laitteiden, kuten tehoelektronikan, määrä kasvanut jatkuvasti. Yksi sähkönlaatua merkittävästi huonontava tekijä on yliaallot. (Korpinen, Mikkola, Keikko & Falck, 3)

Yliaaltoja sähköverkkoon synnyttävät epälineaariset kuormat, joiden verkosta ottama virta on epäsinimuotoista. Epälineaaristen kuormien synnyttämät yliaallot leviävät muihin verkon osiin ja voivat aiheuttaa ongelmia muille sähkönkäyttäjille. (Korpinen ym., 3)

5.2.1 Yliaallot ja Fourier-analyysi

Sinimuodosta poikkeavan jännitteen tai virran voidaan ajatella muodostuvan useista eritaajuisista sinimuotoisista signaaleista.



KUVA 23. Epäsiniuotoinen signaali (b) muodostuu eri taajuisista sinisignaaleista (a) (Columbia College)

Signaalin funktio voidaan purkaa osiin hyödyntämällä Fourier-analyysiä. Jaksolliset funktiot, jotka ovat muotoa $f(t) = f(t + T)$ voidaan kehittää Fourierin sarjaksi kaavan 7 mukaan. (Korpinen ym., 3)

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \quad (7)$$

Sarja sisältää tasakomponentin a_0 , perusaallon ($n=1$) sekä yliaallot ($n>1$), joita kutsutaan järjestyslukunsa mukaan siten, että ($n=2$) on toinen yliaalto jne. Niitä yliaaltoja, joiden taajuus on perustaajuuden monikerta, kutsutaan harmonisiksi yliaalloiksi. Jos funktio on origon suhteen symmetrinen, sarja sisältää vain parittomia termejä. (Korpinen ym., 3)

Sarjakehitelmän kertoimet a_0 , a_n ja b_n saadaan integroimalla kaavojen 8, 9 ja 10 mukaisesti. (Korpinen ym., 3; Ruppaa 2001, 4)

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (8)$$

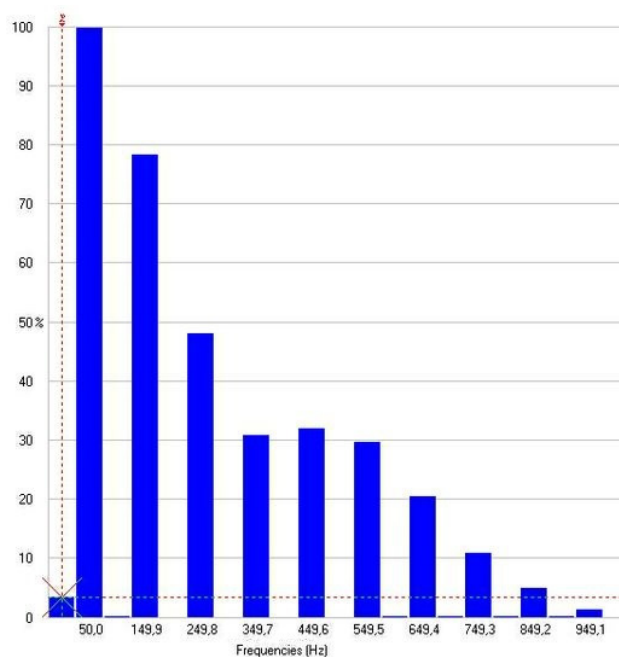
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \quad (9)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \quad (10)$$

Yksinkertaistettuna voidaan ajatella virran yliaaltokomponenttien olevan ideaalisia rinnankytkettyjä virtalähteitä, jotka syöttävät verkkoon yliaaltovirtoja. Yliaaltovirrat kohtaavat taajuuksiensa perusteella määräytyvät yliaaltoimpedanssit, joissa syntyy jännitehäviöitä. Näin syntyvät jännitteen yliaallot summautuvat perusaaltoon ja aiheuttavat jännitteen säröytymisen. Virtasärö on yleensä jännitesäröä suurempi johtuen verkon pienestä impedanssista. (Hietalahti 2011, 2; Korpinen ym., 5)

5.2.2 Yliaaltojen spektriesitys

Yliaaltojen suuruudet ilmoitetaan yleensä tarkastelun helpottamiseksi suhteellisarvoina perusaaltoon verrattuna, ja ne voidaan esittää spektriesityksenä kuvan 23 mukaisesti. (Korpinen ym., 4)



KUVA 24. Erään virran yliaaltospektri

Pystyakselilta voidaan lukea kunkin taajuisen yliaallon suhteellinen arvo (perusaalto 100 %).

5.2.3 Kokonaissärö THD

THD:lla (Total Harmonic Distortion) eli särökertoimella mitataan sitä kuinka säröytyntä tai yliaaltopitoista mitattava jännite tai virta on. THD voidaan määrittää joko suhteessa virran perustaajuiseen komponenttiin (THD-F) tai kokonaisvirran tehollisarvoon (THD-R) (Ruppa 2001, 8). Sähkötekniikassa suositellaan käytettävän THD-F -määritelmää, koska sillä saavutetaan mm. parempi mittaustarkkuus (Shmilovitz 2005, 1–2).

Esimerkiksi virran säröprosentti voidaan laskea molempien määritelmien mukaan kaavoilla 11 ja 12. (Shmilovitz 2005, 1)

$$THD_F = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_\infty^2}}{I_1} \quad (11)$$

$$THD_R = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_\infty^2}}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_\infty^2}} \quad (12)$$

joissa virran arvot ovat joko amplitudeja (kaava 11) tai tehollisarvoja (kaava 12). Standardin SFS-EN 50160 mukaan kokonaissäröä laskettaessa yliaaltokomponentteja huomioidaan 40. termiin saakka (STUL ry 2006, 13).

5.2.4 Säröteho

Puhtaasti sinimuotoisen vaihtosähkön tehosuureet ovat siis näennäisteho S_1 , jonka muodostavat pätöteho P_1 ja loisteho Q_1 . Yliaaltokomponentteja sisältävälle sähkölle nämä tehosuureet eivät riitä, vaan lisäksi pitää määritellä ns. säröteho D , joka on yliaaltojen aiheuttamaa loistehoa. Perustaajuiseen loistehon tavoin, myöskään säröteho ei tee työtä.

Särötehoa ei kuitenkaan voida kompensoida perustaajuudelle mitoitetuilla kompensointilaitteistoilla. (Ruppa 2001, 9; Korpinen ym., 29; STUL ry 2006, 36)

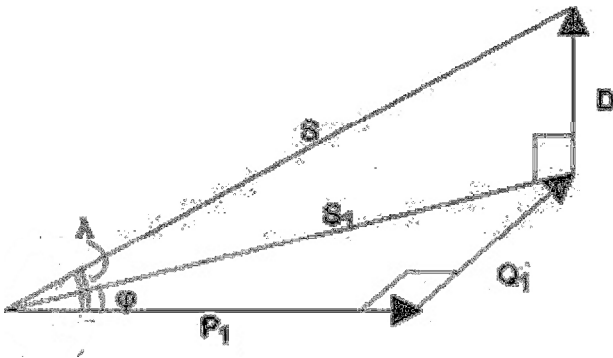
Säröteho määritellään kaavan 13 mukaisesti.

$$D = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q_1^2} \quad (13)$$

jossa D = säröteho
 S = kokonaisnäennäisteho
 P_1 = perustaajuinen pätöteho
 Q_1 = perustaajuinen loisteho.

Käytännön sovelluksissa sähköverkon voidaan olettaa olevan ns. jäykkä eli yliaallot eivät aiheuta jännitesäröä vaikka virta olisi säröytynyttä. Tällöin särötehon oletetaan sisältävän ainoastaan yliaaltoloistehoa eikä lainkaan yliaaltopätötehoa. (Ruppa 2001, 9–10)

Yliaaltopitoisen sähkön tehokolmio muotoutuu siis kolmiulotteiseksi kuvan 25 mukaisesti.



KUVA 25. Tehosuureiden vektoridiagrammi yliaaltopitoisessa verkossa. (Ruppa 2001, 10)

Tehokolmiossa S_1 on perustaajuinen näennäisteho ja S kokonaisnäennäisteho, jossa on mukana myös säröteho.

Yliaaltoja sisältävän järjestelmän tehokerroin λ (tai PF) muuttuu tavallisesta kaavan 14 mukaiseksi.

$$\lambda = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2}} \quad (14)$$

jossa λ = tehokerroin
 P_1 = perustaajuinen pätöteho
 S = kokonaisnäennäisteho
 Q_1 = perustaajuinen loisteho
 D = säröteho

5.2.5 Yliaaltojen aiheuttajat

Yleisesti ottaen yliaaltoja aiheuttavat kuormat, joiden ottama virta on epäsinimuotoista ja taajuudeltaan vaihtelevaa. Tällaisia kuormia ovat muun muassa tasa- ja vaihtosuuntaajakäytöt, hakkuriteholähteet, puolijohdekytkimet, tyristorisäätimet, kodin ja toimistotilojen elektroniikka (televisiot ja tietokoneet), hitsauslaitteet, valokaariuunit sekä viikaantuneiden muuntajien ja moottorien magneettiipiirit. (STUL ry 2006, 30)

Myös jotkut UPS-laitteistot, varsinkin huoltamattomina, aiheuttavat paljon yliaaltoja. Ongelmallisia verkon ja sähkön laadun kannalta ovat myös suuritehoiset akkulaturit tai muut tasasuuntaajat vaihdellessaan nopeasti tyhjäkäynnin ja täystehon välillä. Jännitesäröä syntyy jonkin verran myös generaattoreiden, moottorien ja muuntajien epälinearisuuksien takia, mutta niiden merkitys on yleensä vähäinen.

(STUL ry 2006, 30)

Valaistuksessa yliaaltoja synnyttävät loiste- ja purkauslamppujen elektroniset liitännälaitteet, jotka vaihtosuuntaavat verkkojännitettä suurella taajuudella (yli 20 kHz). Näissä laitteissa vaaditaan yliaaltojen pienentämiseksi yliaaltosuodatusta, jota säädetään standardeilla. (Korpinen ym., 20)

Pienloistelamppuja ja niiden elektronisten liitännälaitteiden yliaaltosuodatuksen taso voi olla tuotteen laadusta riippuen melkein mitä tahansa tai suodatus voi puuttua jopa koko-

naan. Ongelmia voi syntyä, kun pienloistelamppuja käytetään systemaattisesti isoissa rakennuksissa (Korpinen ym., 20).

Yliaaltoja aiheuttavat myös LED-lamppujen liitäntälaitteiden hakkuriteholähteet. Myös LED-lamppujen osalta yliaaltosuodatus on vaihtelevaa, sillä yksittäisen LED-lampun teho on pieni, joten niiden yliaaltojen tuottoa koskevien standardien vaatimukset eivät ole erityisen tiukkoja (Uddin, Shareef, Mohamed & Hannan 2012, 1).

5.2.6 Yliaaltojen vaikutukset

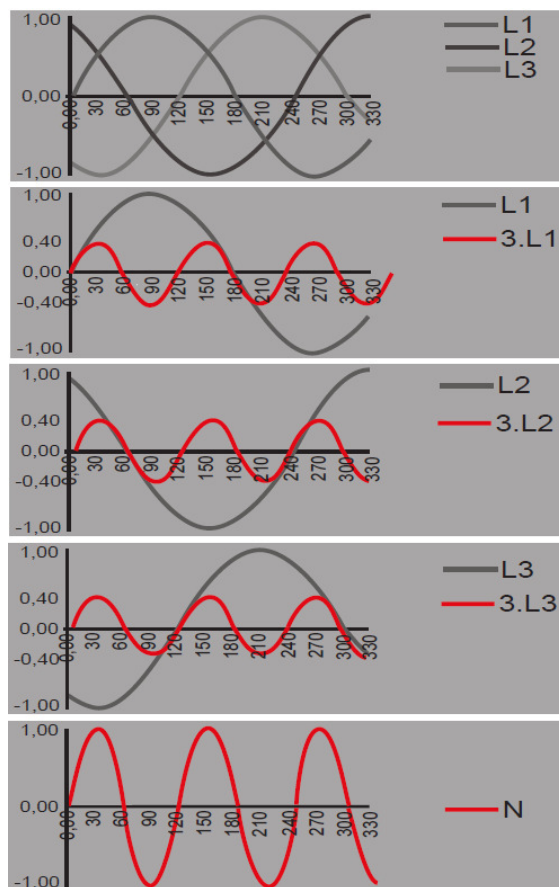
Yliaalloilla on monia haittavaikutuksia verkon eri komponentteihin. Yliaallot kasvattavat tehohäviöitä voimansiirrossa ja verkon komponenteissa aiheuttaen ylimääräistä lämpenemistä sekä nopeuttaen eristeiden vanhenemista. Jännitteen käyrämuodon säröytyminen aiheuttaa virhetoimintoja laitteissa. Yliaallot häiritsevät myös puhe- ja radio- taajuudella tapahtuvaa viestiliikennettä. (Korpinen ym., 22)

Yliaallot aiheuttavat myös resonanssitilanteita verkon kapasitanssien ja induktanssien välille. Resonanssi syntyy silloin, kun jonkin yliaallon taajuus on lähellä verkon resonanssitaajuutta, jolloin yliaaltovirrat ja jännitteet usein moninkertaistuvat normaalitilanteeseen verrattuna. Resonanssitilanteet aiheuttavat esimerkiksi loistehon kompensointiparistoissa ylimääräisiä lämpöhäviöitä sekä vaikeuttavat kompensointilaitteen toimintaa. (Korpinen ym., 22, 25)

Suuntaajalaitteissa yliaaltojen myötä syntyvät jännitesäröt aiheuttavat ongelmia komutoinnissa, jotka voivat johtaa ohjaukskulmavirheisiin tai suuntaajasillan epästabiiliuteen. Lisäksi suuntaajan komponentteihin kohdistuu ylimääräistä rasitusta ja hyötysuhde laskee. (Korpinen ym., 24)

Muuntajissa yliaallot kasvattavat tyhjäkäynti- sekä kuormitushäviöitä, jolloin muuntaajaan syntyy lisälämpenemistä, joka lyhentää muuntajan käyttöikää, varsinkin jos yliaaltopitoisuus on suuri. Yliaallot kasvattavat myös moottoreiden virtalämpöhäviöitä, heilurimomentteja sekä värinä- ja ääni-ilmiöitä. Näiden seurauksena moottorin käyttöikä lyhenee, ja niissä voi syntyä mekaanisia vahinkoja sekä häiriöitä moottorikäytössä (Korpinen ym., 27)

Yliaallot voivat aiheuttaa ongelmia myös pienjänniteverkoissa ellei niihin ole varauduttu. Yleensä nollajohtimet mitoitetetaan vaihejohtimien suuruiseksi tai pienemmiksi, sillä symmetrisessä lineaarisessa kolmivaihekuormituksessa nollajohtimessa ei kulje virtaa, koska kuormien tähtipisteessä vaihevirtojen summa on nolla. Jos kolmivaiheisessa nelijohdinjärjestelmässä on paljon yksivaiheisia epälineaarisia kuormia, kuten tietokoneita tai elektronisilla liitäntälaitteilla varustettuja purkauslamppuja, kolmannella (150 Hz) yliaallolla on taipumuksena summautua nollajohtimeen. Summautuminen johtuu siitä, että kolmas yliaalto on kaikissa vaiheissa samanvaiheinen, jolloin ne summautuvat nollajohtimeen vaikka kuorma olisikin symmetrinen. (Korpinen ym., 29; ABB Control 1999, 10)



KUVA 26. Kolmannet yliaallot summautuvat nollajohtimeen (Kolmannen yliaallon opas, 11)

Nollajohtimessa voi tällöin kulkea 2–3-kertainen virta vaihejohtimen kuormitusvirtaan nähden, vaikka yleensä nollajohtimen poikkipinta-ala on yhtä suuri kuin vaihejohtimessa tai vanhoissa asennuksissa vain puolet. Tästä aiheutuu ylikuumenemis- ja tulipalo-

vaara. Nollajohtimen suuri virta aiheuttaa lisäksi normaalia suuremman jännitehäviön maadoitusnavan ja nollajohtimen välille. (ABB Control 1996, 3; Korpinen ym., 29)

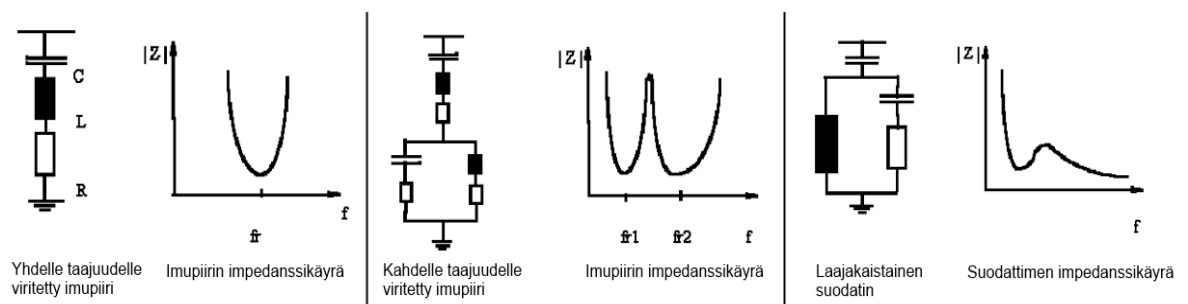
5.2.7 Yliaaltojen torjuminen

Yliaaltojen vaikutusta voidaan pienentää useilla eri tavoilla. Perinteisesti tämä on toteutettu ylilimitoittamalla sähköverkkoa. Tämä ei ole kuitenkaan taloudellisesti mielekäästä. (ABB 2000, 8)

Toinen tapa on minimoida yliaaltojen synty esimerkiksi hyödyntämällä puolijohdetekniikkaa laitteissa (ABB 2000, 7), kuten käyttämällä taajuusmuuttajia, joiden tasasuuntaussillat on toteutettu IGBT-tekniikalla.

Jos muut keinot eivät ole riittävän tehokkaita, yliaaltoja voidaan minimoida yliaaltosuodattimilla. Yliaaltosuodattimet voidaan jakaa passiivi- ja aktiivisuodattimiin. Passiivisuodattimet tai ns. imupiirit ovat sarjaresonanssiipiirejä, jotka muodostavat tietyn taajuiselle yliaaltovirrälle pieni-impedanssisen sulkeutumistien. Suodatus voidaan toteuttaa keskitetysti tai hajautetusti lähelle yliaaltoja tuottavia kuormia. Yliaaltosuodattimet toimivat myös loistehon kompensoijina, sillä niiden impedanssi on perustaajuudella kapasitiivinen. (Korpinen ym., 32, ABB 2000, 9)

Passiivisuodatin voi olla viritetty yhdelle taajuudelle, jolloin se poistaa yhden yliaalto-taajuuden. Vaihtoehtoisesti imupiiri voidaan toteuttaa suodattamaan kaksi tai kolme yliaaltotaajuutta, jolloin perustaajuiset häviöt ovat pienemmät kuin erillisiä suodattimia käytettäessä. (Korpinen ym., 32–33)



KUVA 27. Yksi- ja kaksitaajuiset suodattimet sekä laajakaistainen suodatin (Korpinen ym., 32–33)

Jos halutaan suodattaa vielä useampia yliaaltoja, täytyy käyttää laajakaistaista suodatinta. Laajakaistainen suodatin on toimintaperiaatteeltaan ylipäästösuodatin, joka vähentää kaikkia tiettyä taajuutta suurempia yliaaltotaajuuksia. (Korpinen ym., 33)

Käytettäessä passiivisuodattimia, taloudellisinta on virittää omat suodattimet taajuuksille 250–550 Hz ja niitä suuremmille taajuuksille laajakaistainen suodatin. (Korpinen ym., 33)

Imupiireillä ei voida toteuttaa ongelmallisen 3. yliaaltovirran (150 Hz) suodatusta, koska se summautuu nollajohtimeen. Kolmannen yliaaltovirran suodatus voidaan toteuttaa THF-suodattimella (Third Harmonic Filter), joka voidaan asentaa viisijohdinjärjestelmässä nollajohtimeen tai nelijohdinjärjestelmässä muuntajan tähtipisteeseen. THF-suodatin on rinnakkaisresonanssiipiiri, joka estää 3. yliaaltovirran kulun nollajohtimessa ja vaihejohtimissa. (ABB 2000, 9; ABB Control 1996, 3)

Aktiivisuodatin on tehopuolijohdekomponenteilla toteutettu säädettävä yliaaltovirtalähde. Aktiivisuodatin syöttää verkkoon yliaaltoja, jotka ovat saman taajuisia, mutta vastakkaisessa vaiheessa yliaaltokomponentteihin nähden, jolloin ne summautuessaan kumoavat toisensa. Aktiivisuodatin voi suodattaa useita yliaaltoja kerrallaan ja se kykenee reagoimaan yliaaltojen suuruuden ja taajuuden muutoksiin. Aktiivisuodattimien huonona puolena passiivisuodattimiin verrattuna on niiden korkeampi hinta. (Korpinen ym., 34–35)

6 VALAISTUSKUORMAMITTAUKSET

6.1 Mittausten tavoitteet

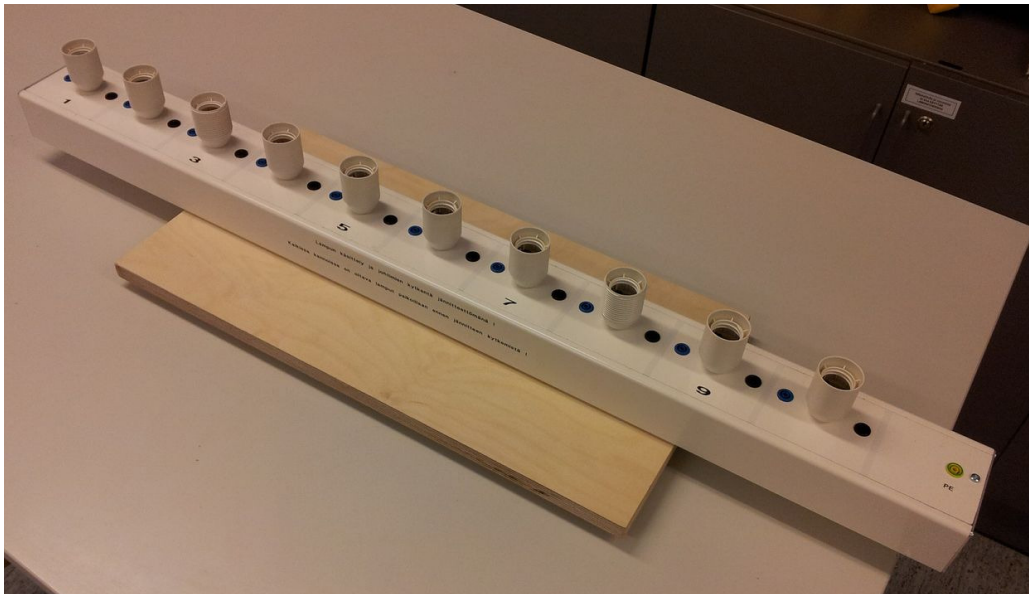
Mittauksissa tutkittiin pienloiste- ja LED-lamppukuormien verkkovaikutuksia. Lisäksi tutkittiin lamppujen todellista tehon kulutusta ja vertailla saatuja tuloksia valmistajien ilmoittamiin arvoihin. Tarkastelun alla oli erityisesti lamppujen loistehon kulutus.

Lisäksi mittauksissa tutkittiin tavanomaisen valonsäätimen vaikutusta lamppukuormien aiheuttamiin yliaaltoihin.

6.2 Mittausjärjestelyt

Mittaukset tehtiin TAMKIn sähkölaboratoriossa. Lamppukuormien syöttämiseen käytettiin säädettävää jännitelähdevaunua, jolla lamppujen käyttöjännite saatiin tarkalleen 230 V:iin. Lamppuja pidettiin päällä 4-5 minuuttia ennen mittauksia, jotta niiden valovirta saavuttaisi huippuarvonsa.

Mittauksia varten rakennettiin valaisinkuormapenkki, johon oli asennettu kymmenen E27-kantaista lampunpidintä. Kuormapenkillä voitiin simuloida yhteen vaiheeseen kytettyä valaistuskuormaa.



KUVA 28. Mittauksissa käytetty valaisinkuormapenkki

Jokaisen lampunpitimen vaihe- ja nollaliittimet oli kuvan 29 mukaisesti tuotu penkin kanteen, jotta yksittäisen lampun suuret olivat helposti mitattavissa. Koska mittauksessa oli mukana lämmölle herkkiä LED-lamppuja, tuli penkin ympärillä olla riittävästi tilaa liiallisen lämpiämisen estämiseksi.



KUVA 29. Valaisinkuormapenkin liittimet

Mittauksissa lamput kytkettiin penkkiin rinnan ja johdotus tehtiin siten, että lampuilla oli yhteinen nollapiste.

Mittalaitteena käytettiin Fluke 43B Power Quality Analyzeria, joka on ns. True-RMS-mittari eli sillä saadaan mitattua tarkat arvot myös epäsinimuotoisesta jännitteestä tai virrasta. Fluke 43B:llä saatiin otettua tavanomaisten sähkösuureiden lisäksi myös jännit-

teiden ja virtojen THD-arvot ja spektrikuvat yliaaltovirroista ja -jännitteistä. Kuvat voitiin siirtää mittarista tietokoneelle yksityiskohtaisempaa tarkastelua varten.

6.3 Tutkitut laitteet

6.3.1 Lamput

Mittauksiin valikoitui valikoima erilaisia E27-kannalla varustettuja halogeeni- pienloiste- ja LED-lamppuja, joiden tiedot ovat listattuna taulukoissa 2-4. Lamppujen tehot olivat väliltä 3–77 W. Kaikki pienloiste- ja LED-lamput olivat energialuokan A lamppuja, ja halogeenit luokan C lamppuja.

TAULUKKO 2. Mittauksessa käytetyt halogeenilamput

nro	Malli	Pätöteho (W)	Valovirta (lm)	Väriämpötila (K)	Säädettävyys	Värintoistokyky (Ra-indeksi)	Valotehokkuus (lm/W)
1	Osram Classic Eco Superstar	30	405	2700	x	100	13,5
2	Osram Classic Eco Superstar	57	915	2800	x	100	16,1
3	Osram Halogen Eco Classic A	42	630	2700	x	100	15,0
4	Osram Classic Eco Superstar	57	915	2800	x	100	16,1
5	Osram Classic Eco Superstar	77	1320	2800	x	100	17,1
6	Osram Classic Eco Superstar	30	405	2700	x	100	13,5

TAULUKKO 3. Mittauksessa käytetyt pienloistelamput

nro	Malli	Pätöteho (W)	Valovirta (lm)	Väriämpötila (K)	Värintoistokyky (Ra-indeksi)	Valotehokkuus (lm/W)
7	Osram Duluxstar Mini Twist	18	1150	2700	≥80	63,9
8	Osram Duluxstar Mini Twist	11	660	2700	≥80	60,0
9	Osram Duluxstar Mini Ball	15	850	2500	≥80	56,7
10	Osram Duluxstar Mini Ball	11	630	2500	≥80	57,3
11	Osram Dulux Intelligent Longlife	14	820	4000	≥80	58,6

Mikään mittauksessa käytetyistä pienloistelampuista ei ollut säädettävä.

TAULUKKO 4. Mittauksessa käytetyt LED-lamput

nro	Malli	Päätöteho (W)	Valovirta (lm)	Väriämpötila (K)	Säädettävyys	Värintoistokyky (Ra-indeksi)	Valovoima(cd)	Valotehokkuus (lm/W)
12	Philips MyAmbiance	3	136	2700	x	-		45,3
13	Philips Econic	5	250	2700		-		50,0
14	Philips LED	4	250	2700		-		62,5
15	Philips LED	11	806	2700		-		73,3
16	Philips LED	7	-	-	x	-	1000	-

Kaikki mittauksen lamput olivat tunnetuilta valmistajilta, joten niiden laadun voidaan olettaa olleen ainakin keskimääräistä parempaa. Vertailun vuoksi mittauksiin olisi ollut mielekästä valita hieman tuntemattomampienkin valmistajien tai halvemmän hintaluokan energiansäästö- tai LED-lamppuja. Näin olisi myös mahdollisesti nähty kuinka paljon yliaaltoja nämä lamputyypit pahimmillaan voivat tuottaa.

6.3.2 Valonsäädin

Mittauksissa valonsäätöön käytettiin Ensto 2250 UJGL-214-510 himmennintä, jonka tiedot on esitettyä kuvassa 30.



Tekniset tiedot



Nimellisjännite:	230 V ~ ± 10 %, 50 Hz
Nimellisteho:	600 W (käyttölämpötilasta riippuen)
Vähimmäiskuorma:	60 W
Oikosulkusuojaus:	T 3.15 H
Ylikuormitussuoja:	lämpötilan rajoitin
Käyttölämpötila:	0 ... +35 °C

KUVA 30. Ensto 2250 UJGL himmennin ja tekniset tiedot (Ensto)

Kyseinen himmennin on tarkoitettu hehku- ja halogeenilamppujen säätämiseen, ja sen toiminta perustuu todennäköisimmin jännitteen leikkaamiseen tyristoreilla. Himmentimen vaihe- ja nollaliittimet johdotettiin kuvan 30 mukaisesti sen päätyihin kytkentöjen helpottamiseksi.

6.4 Mittaustilanteet

Mittauksia suoritettiin neljässä eri kuormatilanteessa:

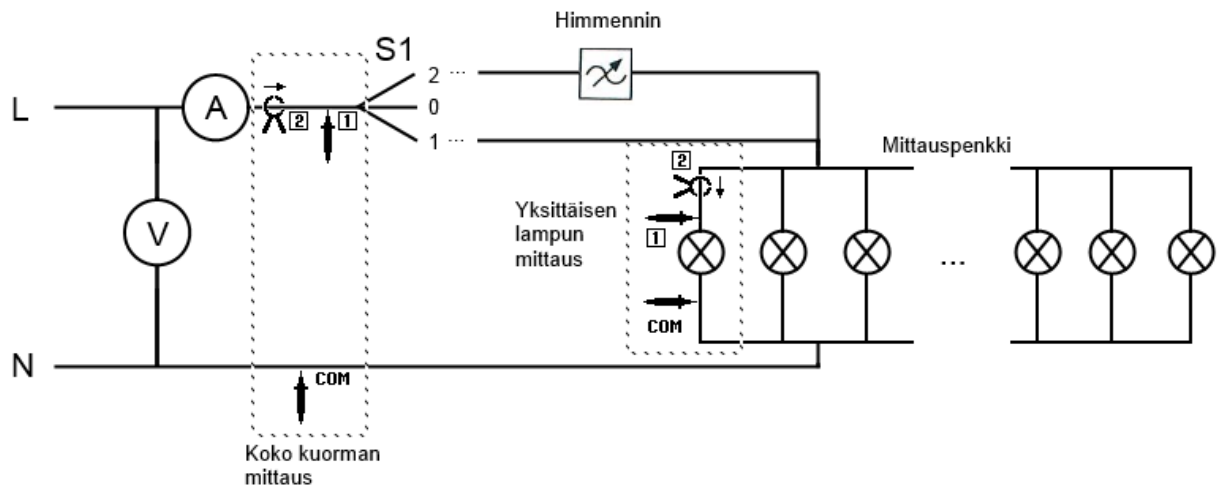
- Halogeenilamppukuorma valonsäätimellä ja ilman
- Pienloistelamppukuorma
- LED-lamppukuorma

Mitatut suureet olivat:

- pätöteho P_1
- kokonaisloisteho Q
- kokonaisnäennäisteho S
- virta
- perustajuinen tehokerroin DPF
- tehokerroin PF
- virran kokonaissärö THD_I
- jännitteen kokonaissärö THD_U

Mitatut THD-arvot olivat THD-F -määritelmän mukaiset. Näiden lisäksi otettiin virtojen ja jännitteiden spektrikuvat. Pienloiste- ja LED-lamppumittauksissa mitattiin koko kuorman suureiden lisäksi myös lamppukohtaiset arvot.

Mittauksia varten tehtiin kuvan 31 mukainen kytkentä. Fluke 43B:n mittapäät ja virtapihti aseteltiin mittauksesta riippuen kuvan 31 mukaisesti.



KUVA 31. Mittauskytkentä

Vaihtokytkimellä S1 voitiin valita käytetäänkö himmennintä vai ei.

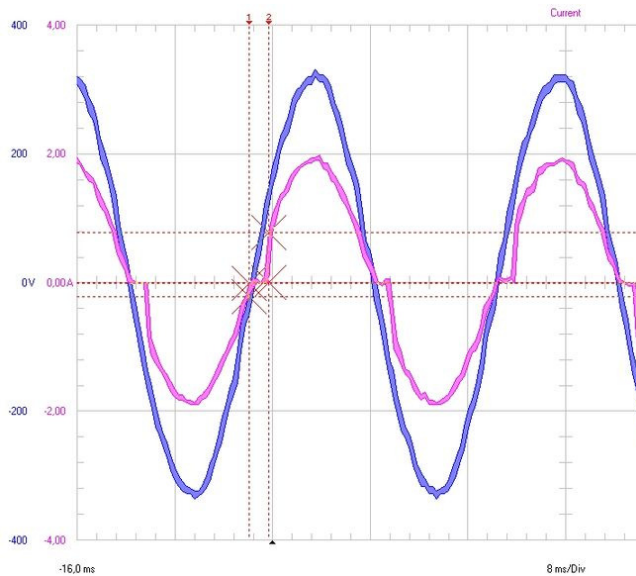
6.5 Tulosten tarkastelu

Tässä luvussa käydään läpi mittausten tuloksia. Tarkasteluissa vain osa tuloksista on esitetty tekstissä. Kaikki mittausten tulokset ovat näkyvillä liitteissä 1, 2 ja 3.

6.5.1 Valonsäädin ja halogeenilamppukuorma

Tässä mittauksessa oli mukana 6 halogeenilamppua, joiden nimellisteho oli yhteensä 293 W. Halogeenilamppukuorma kytkettiin ensin myöhempää vertailua varten suoraan verkkojännitteeseen. Mittaustulokset olivat odotetunlaiset: verkkojännite sekä virran käyrämuoto olivat sinimuotoiset. Jännitteen ja virran särökertoimet olivat molemmat alle 2 %.

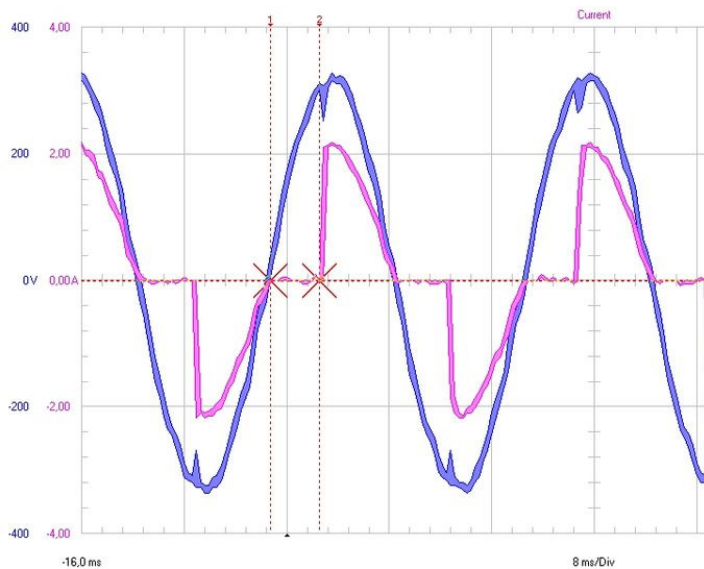
Himentimen kytkeminen piiriin näkyi heti mittaustuloksissa. Vaikka himmennin oli säädetty maksimiin, kuormavirta leikkautui kuvan 32 mukaisesti. Samaten virran säröprosentti nousi 11,5 %:iin. Kuvissa sininen käyrä on verkkojännite ja punainen kuorman virta.



KUVA 32. Himmennin 100 %.

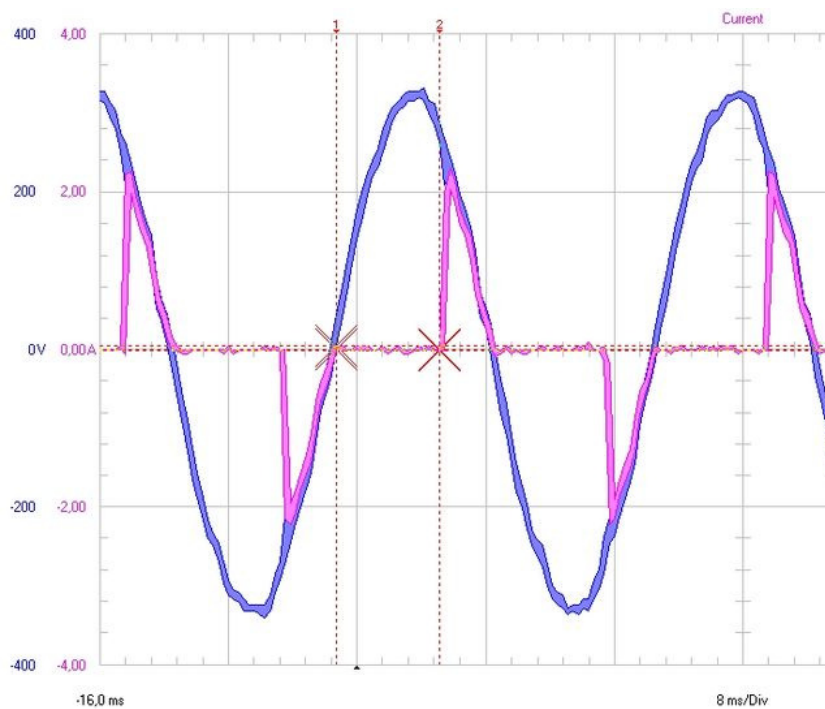
Seuraavaksi himmennin säädettiin noin puoleen säätövälistä. Virran säröprosentti nousi 54,4 %:iin ja kuorman kokonaistehokerroin putosi 0,79:ään. Vaikka tässä vaiheessa koko kuorman pätötehon kulutus laski noin kolmasosan lähtötilanteeseen verrattuna, kuorman kuluttama näennäisteho laski kuitenkin vain 13 %.

Kuvasta 33 nähdään, että vaikka jännitteen THD pysyi vain 2,3 %:issa, verkkojännitteessä syntyy selvä alenema (64 V) himmentimen ohjaukskulman kohdalla, vaikka kuorma oli suhteellisen pieni verkon tehokapasiteettiin nähden. Ehkä himmenninkäytössä syntyvä virtapiikki on sen verran suuri, että vaihejännitteeseen syntyy kuoppa. Toisaalta syy voi olla siinä, että jännitekuoppa syntyy jännitelähdevaunun nimellistehon rajallisuuden takia.



KUVA 33. Himmennin n. 50 %

Lopuksi himmennin oli säädettyä minimiin. Koska kuorman ottama virta oli epäsinimuotoista suurimman osan puolijaksoista, virran säröprosentti ampaisi 115 %:iin, jolloin siis yliaaltovirtoja oli enemmän kuin perustajuista virtakomponenttia. Kokonaistehokerroin romahti 0,36:een. Samalla päätötehon kulutus laski 21 %:iin ja näennäisteho 57 %:iin alkuperäisestä. Verkon kannalta hankalan kolmannen yliaallon osuus oli jopa 84 % perusaallosta.



KUVA 34. Himmennin minimissä

Himentimen ollessa minimissä syntyy siis runsaasti verkkovaikutuksia. Ongelmia tyristorisäädintä käytettäessä voisi syntyä esimerkiksi teattereissa, joissa himmennetään suuria valaistuskuormia.

Mittauksista kävi myös ilmi, että taulukon 5 mukaisesti myös perustaajuinen tehokeroin heikkenee kokonaistehokertoimen myötä himmennintä säädettäessä pienemmälle.

TAULUKKO 5. Kuorman tehokertoimet eri kuormatilanteissa

Tilanne	DPF	PF
Ei himmennintä	1	1
Himmennin 100 %	1	0,99
Himmennin 50 %	0,9	0,79
Himmennin min.	0,57	0,36

Kaavojen 6 ja 13 mukaisesti voidaan laskea koko kuorman kuluttaman perustaajuinen loisteho sekä säröteho himmentimen eri asetuksilla. Tulokset ovat esitettynä taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Kuorman ottamat loistehot eri kuormatilanteissa

Tilanne	$Q_1(VAr)$	$D(VAr)$
Ei himmennintä	0,0	0,0
Himmennin 100 %	0,0	42,6
Himmennin 50 %	116,8	116,9
Himmennin min.	143,0	76,6

Perustaajuisen loistehon kulutus siis kasvaa himmennintä säädettäessä pienemmälle. Tämä johtuu ns. ohjausloistehosta, joka syntyy kun virta jää kuvan 34 mukaisesti säädön takia jännitettä jälkeen.

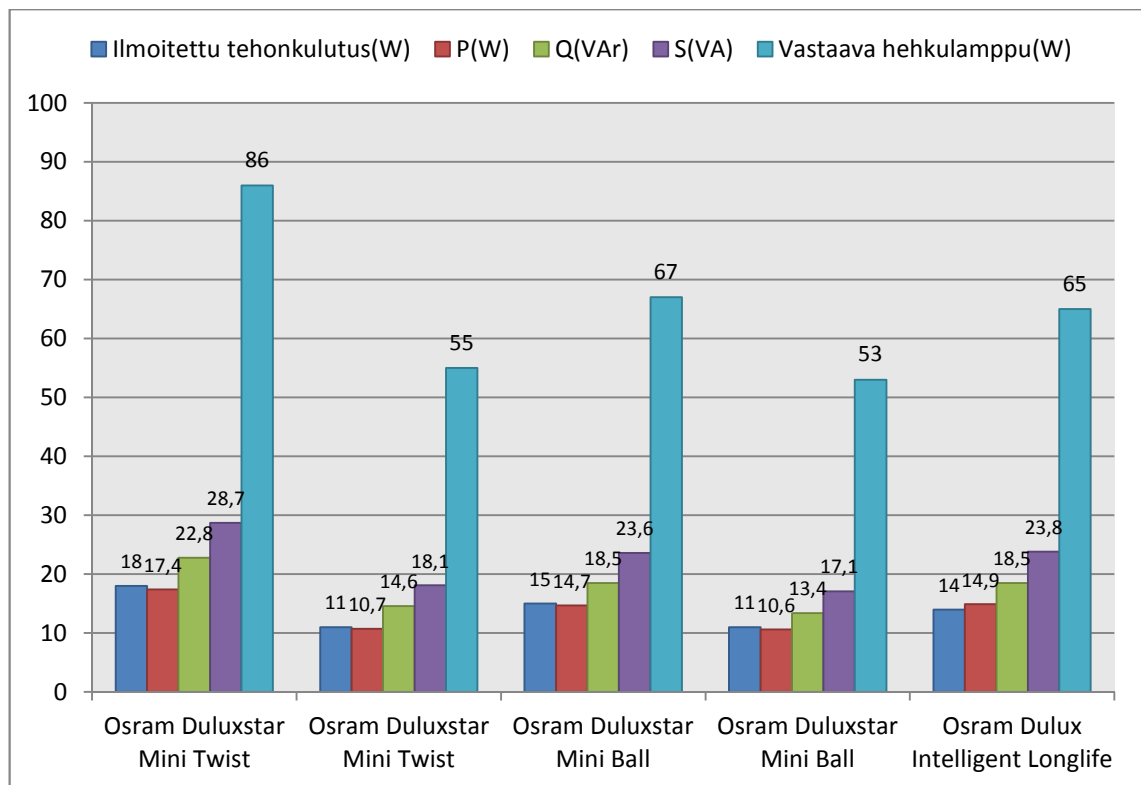
6.5.2 Pienloistelamppukuorma

Tässä mittauksessa mukana oli 5 pienloistelamppua, joiden nimellistehojen summa oli 69 W. Aloitetaan pienloistelamppujen tarkastelu tehonkulutuksista. Mitattujen pienloistelamppujen todellinen pätötehon kulutus vastasi pääosin valmistajien ilmoittamia arvoja. Yhtä lamppua lukuun ottamatta testatut lamput kuluttivat pätötehoa jopa hieman ilmoitettua vähemmän, mutta ei merkittävästi. Osram Dulux Intelligent Long Life kulut-

tekin ilmoitetun 14 W:n sijaan 14,9 W. Ylitys ei ole kuitenkaan yksittäisen lampun kohdalla merkittävä.

Mittausten perusteella pienloistelamput kuluttavat pätötehoon nähden huomattavasti loistehoa, jonka myötä myös näennäistehon kulutus nousee. Mittauksen 69 W lamppukuorma kulutti jopa 112 VA näennäistehoa, josta kapasitiivista loistehoa oli 88 VAR. Koko kuorman tehokerroin oli vain 0,62.

Yksittäisten lamppujen mittausten tulokset vastasivat odotetusti koko kuorman mittaus-tuloksia (kuva 35). Lamput kuluttivat keskimäärin 1,6-kertaisesti näennäistehoa ilmoitettuun pätötehoon nähden. Kuitenkin energiansäästön kannalta pienloistelamppujen tehon kulutus on huomattavasti pienempi vastaaviin hehkulamppuihin verrattuna.



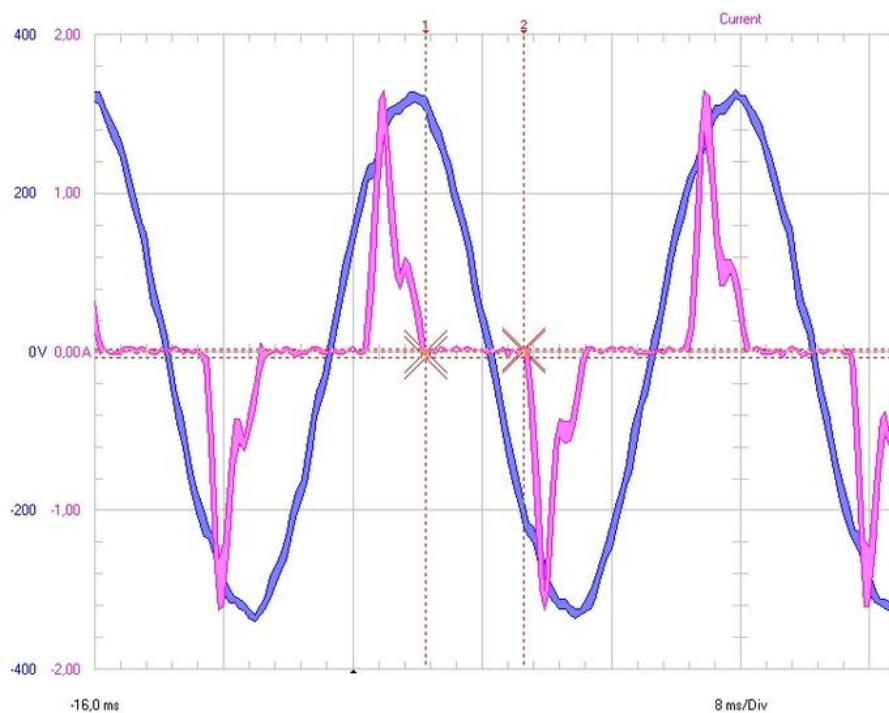
KUVA 35. Yksittäisten pienloistelamppujen tehonkulutukset sekä valovirraltaan vastaavien hehkulamppujen teho.

Kokonaistehokertoimet olivat 0,59–0,63 lampusta riippuen. Lamput olivat kuitenkin melko hyvin kompensoituja perustajuisen loistehon suhteen, sillä niiden perustajuiset tehokerroimet olivat 0,93–0,95. Tästä huolimatta lamput kuluttivat suhteellisen paljon

näennäisteho. Suurehko näennäistehon kulutus johtuukin siis yliaaltojen aiheuttamasta säröloistehon kulutuksesta.

Ongelmallista on se, että kulutettu loisteho on kapasitiivisella puolella, jota sähköverkko-yhtiöt eivät halua siirtää, joten siitä laskutetaan sen mukaisesti. Särötehoa ei myöskään voida kompensoida tavanomaisilla kompensointilaitteistoilla, vaan sen eliminointi täytyy tehdä yliaaltosuodattimilla. Näistä kahdesta seikasta ei kuitenkaan synny yksittäiselle kuluttajalle suurta ongelmaa, sillä tehot ovat pieniä ja loistehosta pienkuluttajan ei tarvitse maksaa.

Kuten kuvasta 36 nähdään, kuorman ottama virta oli hyvin kaukana sinisignaalista.

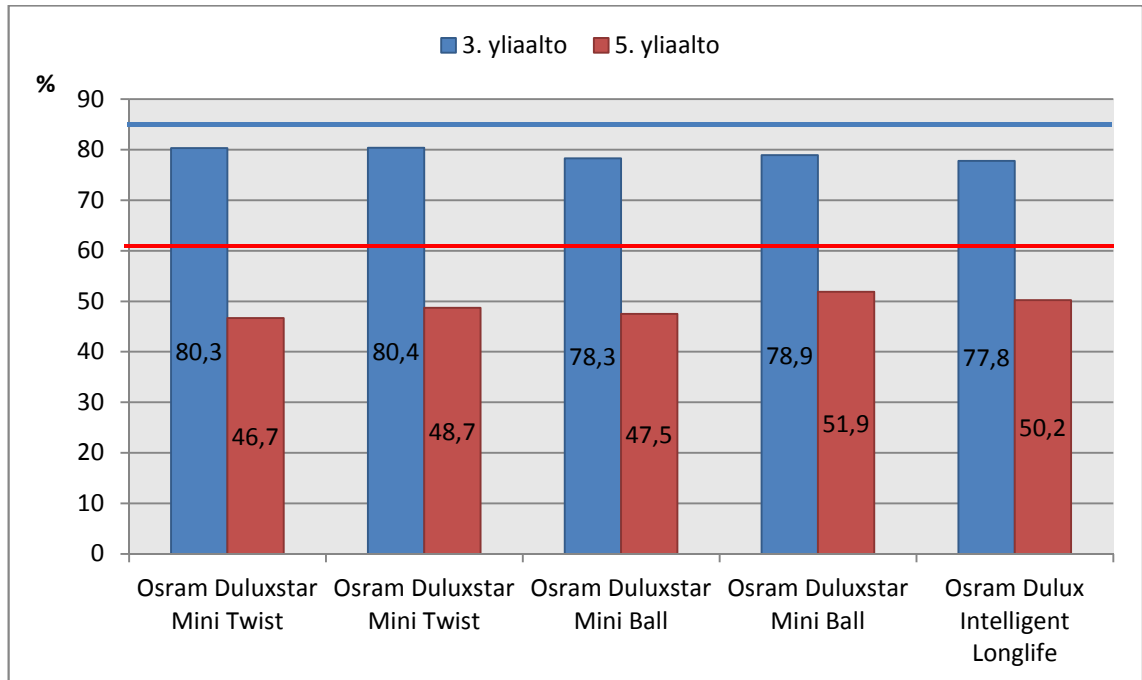


KUVA 36. Mitatun pienloistelamppukuorman ottama virta sekä verkkojännite

Kuorma otti piikikästä virtaa, ja virta oli suuren osan puolijaksosta lähellä nollaa. Koko kuorman virtasärökerroin oli 110 %. Vaikka yliaaltoja oli paljon, virran tehollisarvo oli niin pieni, että yliaaltokomponenttien aiheuttama jännitesärö oli vain 2,2 %, eli vain 0,4 prosenttiyksikön kasvu verkon normaalitilanteeseen verrattuna.

Yksittäisten lamppujen virtasärökertoimet olivat väliltä 108–119 %, eli melko suuria. Eurooppalainen EN 61000-3-2 -standardi määrittelee ylärajat nimellisvirraltaan alle 16 A pienjännitteellä toimivien laitteiden tuottamille yliaalloille. Sen mukaan nimellis-

teholtaan alle 25 W valaistukseen käytetyt laitteet saavat tuottaa maksimissaan 86 % 3:ttä yliaaltoa ja 61 % 5:ttä yliaaltoa (EPSMA 2010, 6) suhteessa perustaajuiseen komponenttiin. Kuvassa 37 on vertailtu lamppujen tuottamia virran 3. ja 5. yliaaltoja suhteessa perustaajuiseen komponenttiin ja standardin asettamia rajoja.



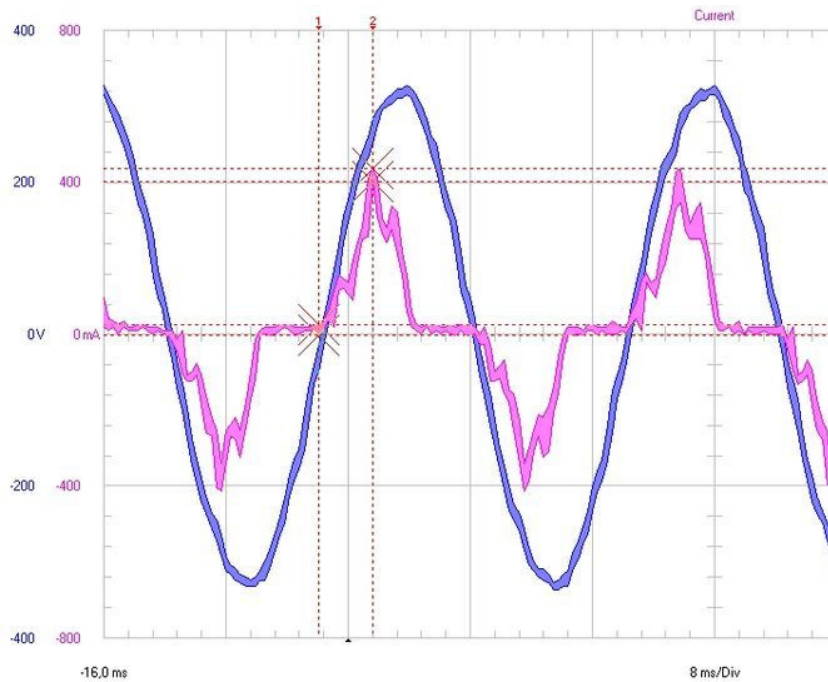
KUVA 37. Lamppujen tuottamat 3:nnet ja 5:nnet yliaallot sekä standardin asettamat rajat

Kuvasta 37 nähdään, että kaikki lamput ovat standardin asettamien vaatimusten mukaisia. Tämä oli sikäli odotettua, koska lamput olivat tunnetulta valmistajalta. Tosin 3. yliaallon kohdalla raja ei alitu mitenkään erityisen suurella marginaalilla. Jos tilanne on tämä keskivertoa laadukkaammissa lamputissa, mitenkähän saattaa olla asian laita halvemmissä (ja todennäköisesti heikkolaatuisemmissa) lamputissa, joita kuluttajat varmasti suosivat.

6.5.3 LED-lamppukuorma

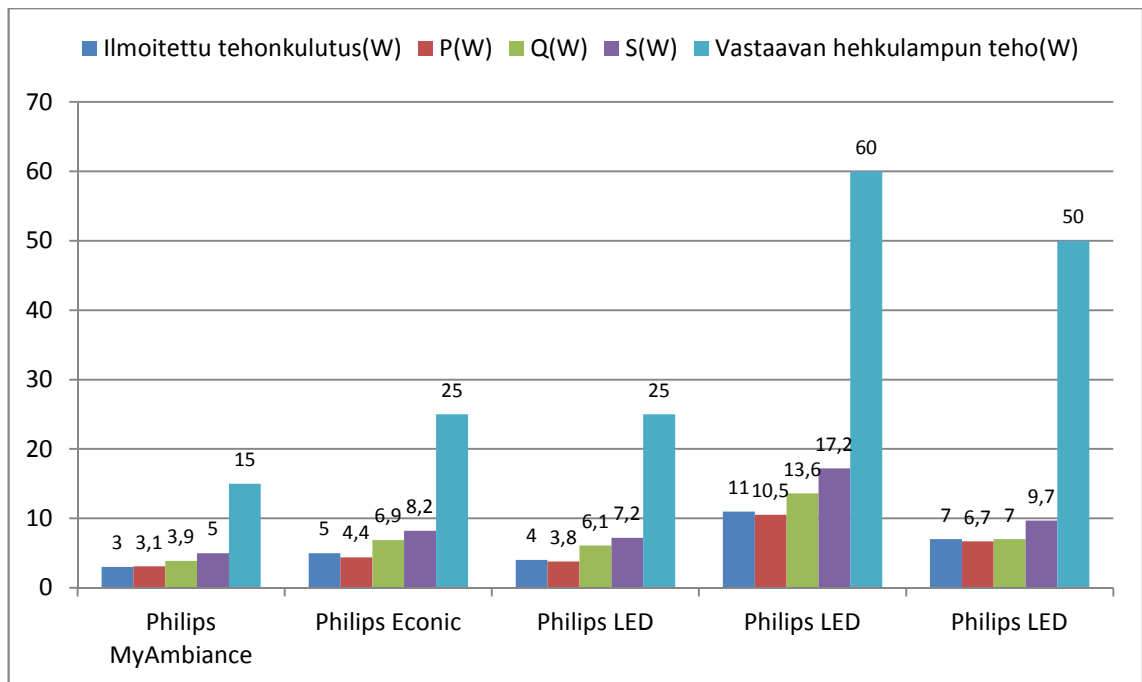
Tässä mittauksessa mukana oli 5 LED-lamppua, joiden nimellistehojen summa oli 30 W.

Odotetusti LED-lamput ottivat hakkuriteholähteidensä takia verkosta hyvin epäsinimuo-
toista virtaa (kuva 38).



KUVA 38. LED-lamppukuorman ottama virta sekä verkkojännite

LED-lamppukuorman tehonkulutus vastasi ilmoitettuja arvoja. Koko kuorma kulutti pätötehoa 28,8 W, kapasitiivista loistehoa 25,9 VAR ja näennäistehoa 38,8 VA. Yksi lamputa tosin kulutti pätötehoa 3 % ylimääräistä, mutta näin pienitehoisessa lampussa ylitys ei juuri sähkölaskussa paina. Yksittäisten lamppujen tehonkulutukset sekä vertailu vastaaviin hehkulamppuihin ovat esitettyinä kuvassa 39.



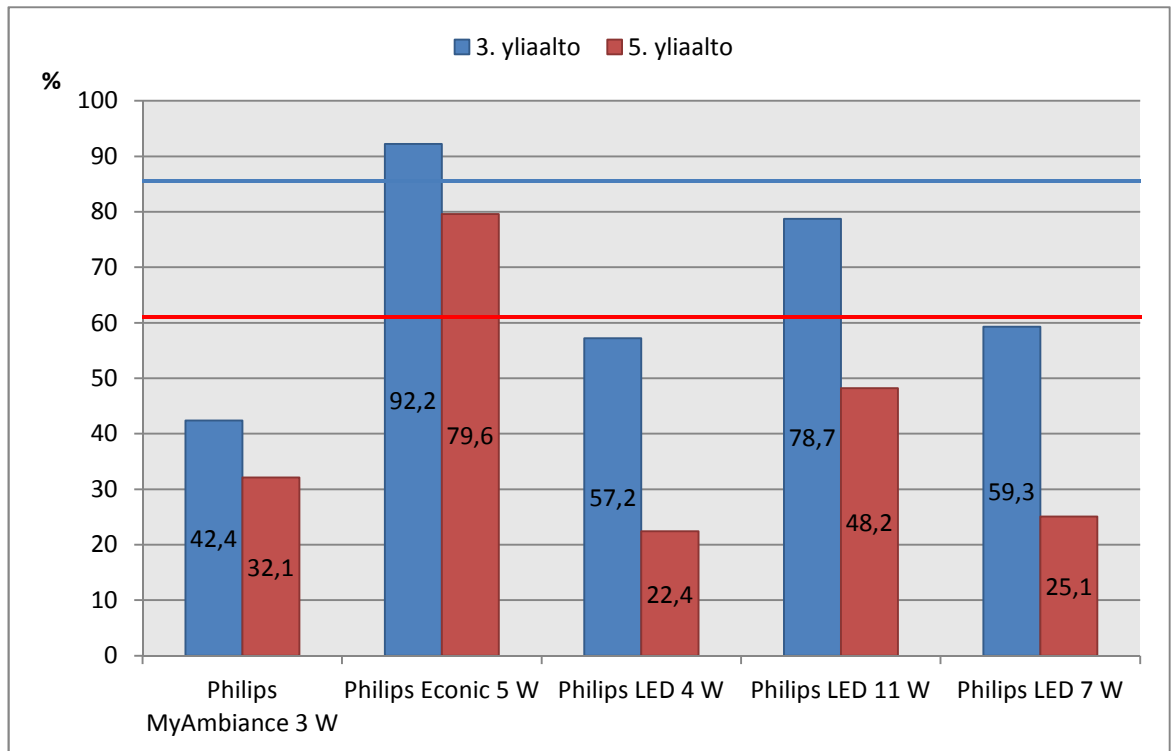
KUVA 39. Yksittäisten LED-lamppujen tehonkulutukset sekä valovirrallaan vastaavien hehkulamppujen teho

Lamppujen näennäistehon kulutus oli mallista riippuen 1,4–1,8-kertainen ilmoitettuun pätötehoon nähden. Tämän merkitys on kuitenkin pieni, sillä tehot ovat niin alhaisia.

Lamppujen perustajuisen loistehon kompensoinnin sekä yliaaltojen suodatuksen taso oli hyvin kirjavaa. Lamppujen perustajuisen tehokertoimen arvot olivat väliltä 0,69–1,00, eli vaihtelua on paljon. Kokonaistehokertoimet taas olivat 0,53–0,69. Osassa lamppuissa suurin osa kulutetusta loistehosta on siis perustajuisesta loistehosta, ja joissakin taas säröloistehosta. Lampun nimellisteholla ei näytä olevan tähän mitään vaikutusta. Lamppujen virtasärökertoimet vaihtelivat myös hurjasti ja ne olivat väliltä 61,3–150,5 %. Tämä viittaisi siihen, että eri lamppuissa on käytetty erilaisia suodatusmenetelmiä, ja joissakin lamppuissa ei näyttäisi suodatusta olevan lainkaan. Tämän huomaa myös virran kuvaajista, jotka ovat kaikilla lamppuilla hieman erilaiset.

Erikoisesti koko kuorman virtasärökerroin oli 57,8 %, eli vähemmän kuin minkään yksittäisen lampun kerroin. Tämä viittaisi siihen, että kuorman lamppujen tuottamat yliaallot summautuivat siten, että ne osittain kumosivat toinen toisensa.

LED-lamppujen välillä oli eroa myös siinä, kuinka paljon ne tuottivat 3:tta ja 5:tta yliaaltoa. Mittaustulokset sekä standardin EN 61000-3-2 asettamat ylärajat ovat esitettynä kuvassa 40.



KUVA 40. Lamppujen tuottamat 3:nnet ja 5:nnet yliaallot suhteessa perustaajuiseen komponenttiin sekä standardin asettamat rajat

LED-lamput tuottivat 3:tta ja 5:tta yliaaltoa keskimäärin pienloistelamppuja vähemmän, mutta yksi lampuista jopa ylitti standardin asettamat ylärajat. 5 W:n Philips Econic lamppu ylitti 3. yliaallon rajan 6,2 prosenttiyksiköllä ja 5. yliaallon rajan jopa 18,6 prosenttiyksiköllä.

Suodatusten tason vaihtelu on sinänsä erikoista, sillä kaikki mittauksen LED-lamput olivat samalta valmistajalta. Tämä kieli siitä, että koska LED-lampputeknologia on vielä verrattain uutta ja nopeasti kehittyvää, valmistajien käytännöt vaihtelevat vielä tai hinta/tehokkuus-suhteeltaan sopivia suodatusratkaisuja ei vielä ole löytynyt. Toisaalta voi olla niinkin, että ehkä suodatusta ei LED-lamppujen kohdalla koeta niin tarpeelliseksi, että siihen kannattaisi suuresti panostaa. Tehot ja virrat kun ovat niin pieniä.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työssä tutkittiin eri lampputyypin ominaisuuksia ja tarkastelujen perusteella voidaan todeta, että vanhoista lampputyypeistä siirtyminen pienloiste- ja LED-lamppuihin on energiakustannussyistä hyvin perusteltua pienemmän energiankulutuksensa vuoksi. Tämä johtaa kuitenkin epälineaaristen kuormien lisääntymiseen, jotka jo nyt aiheuttavat ongelmia sähköverkossa.

Mittausten perusteella voidaan todeta, että sekä energiansäästölamput että LED-lamput ottavat verkosta hyvin säröytyntä virtaa, joka johtaa virran yliaaltojen syntymiseen. Tämä ei kuitenkaan vielä mittausympäristössä aiheuttanut huomattavaa jännitteen säröytymistä kuormien pienten tehojen takia. Suuremmissa mittakaavassa käytettynä ja tehotasojen noustessa, näillä lampputyypeillä voidaan odottaa olevan suuriakin vaikutuksia sähkön laatuun, jos niihin ei ole riittävästi varauduttu. Jännitesärön lisäksi ongelmia voivat tuottaa myös nollajohtimien kuormittuminen lamppujen ja muun elektronikkakuorman tuottaman 3. yliaallon vaikutuksesta.

Mittauksissa kävi myös ilmi, että LED-lamput ovat arvaamattomia niiden laadun ja käyttöiän lisäksi myös niiden yliaaltojen tuoton sekä niiden suodatuksen suhteen. Vaihtelu oli suurta jopa saman valmistajan eri tuotteiden välillä. Tästäkin huolimatta verkko-vaikutusten kannalta LED-lamput ovat parempi valinta, sillä ne tuottavat vähemmän yliaaltoja sekä kuluttavat vähemmän loistehoa vastaavaan pienloistelamppuun verrattuna.

Mittaustuloksista voidaan myös päätellä, että energiansäästö- ja LED-lamput kuluttavat nimellistehoihinsa nähden suhteellisen paljon loistehoa. Tästä loistehosta suurin osa on yliaaltojen aiheuttamaa särötehoa, jota ei perinteisillä loistehon kompensointilaitteistoilla pystytä tuottamaan. Tämä johtaa siihen, että siirryttäessä pois hehkulamppujen käytöstä, sähköverkkoyhtiöt joutuvat siirtämään entistä enemmän loistehoa, ja samalla kuitenkin laskutettavan pätötehon määrä laskee. Lisääntyvistä yliaaltopitoisuuksista sähköverkossa aiheutuu myös lisää komponentti- ja huoltokustannuksia. Kuitenkaan pienkuluttajille lisääntyneestä loistehon kulutuksesta ei ainakaan vielä ole haittaa, sillä heiltä loistehomaksua ei toistaiseksi peritä. Jatkossa sähköverkkoyhtiöt saattavatkin alkaa periä loistehomaksuja myös pienkuluttajilta, jos niistä saatava hyöty ylittää mahdollisesta sähkömittarikkannan uusimisesta koituvat kustannukset.

Uudempien lampputyyppeiden lopulliset vaikutukset sähköverkkoon tulevat näkymään vasta tulevaisuudessa, kun kuluttajien hamstraamat hehkulamppuvarastot tyhjenevät ja ne joutuvat vaihtamaan vanhat lamput uusiin.

Valaistuskormamittausten toteutus onnistui vähintäänkin tyydyttävästi. Mittaustulokset olivat mielestäni riittävän uskottavia, jotta niiden perusteella ylipäätään voidaan tehdä johtopäätöksiä. Mittauksiin olisi voinut ehkä valita lamppuja hieman laajemmaltakin skaalalta, sillä mitatut lamput olivat kaikki tunnetuilta valmistajilta. Halvemman hintaluokan lampuissa verkkovaikutukset olisivat voineet tulla vielä selvemmin esille.

LÄHTEET

- ABB Oy. 2000. ABB TTT-käsikirja 2000-7. Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus.
- ABB Control Oy. 1996. Kummitteleeko sähköverkossa? Esite. Luettu 12.4.2013.
<http://abb.com>
- ABB Control Oy. 1999. Kolmannen yliaallon opas. Luettu 12.4.2013.
<http://abb.com>
- Ad-lux Oy. Mikä on elektroninen liitántälaite?. Luettu 29.3.2013.
<http://www.adlux.fi/public/tyo/liitantaite.html>
- Columbia College. Introduction to Psychoacoustics and Sound Perception. Kuva. Luettu 12.4.2013. <http://acousticlab.org/psychoacoustics/PMFiles/PMImages/fourier1.jpg>
- Dilouie, Craig. 2006. Controlling LED lighting systems: introducing the LED driver. LEDs Magazine. Luettu 3.3. 2013.
<http://ledsmagazine.com/features/1/12/6>
- Ensto. 2250 UJGL-214-510 –himmennin. Käyttöohjeet.
- EPSMA. 2010. Harmonic Current Emissions. Guidelines to the standard EN 61000-3-2. Luettu 7.5.2013. http://www.epsma.org/pdf/PFC%20Guide_November%202010.pdf
- Euroopan komissio. Light bulb selector. Kuva. Luettu 1.3.2013.
http://ec.europa.eu/energy/lumen/wizard/index_en.htm
- Fagerhult. 2012. Indoor lighting solutions. Luettelo 2013-2013. Fagerhults Belysning AB.
- FarmLED, 2012. LED-teknologia. Luettu 2.5.2013.
<http://www.farmled.fi/ratkaisut/led-teknologia.html>
- Halonen, L. & Lehtovaara, J. 1992. Valaistustekniikka. Espoo: Otatieto Oy.
- Helsingin Energia. Kodin lamppuopas. Luettu 28.3.2013.
http://www.helen.fi/pdf/kodin_lamppuopas.pdf
- Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T. & Falck, E. Yliaalto-opus. Luettu 30.3.2013.
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>
- Lampputieto. 2009. Motiva.
<http://www.lampputieto.fi/>
- Niskanen, H & Savela, K. 2008. LED-valaistusjärjestelmät. ST-kortti 57.52. Espoo: Sähkötieto ry.
- Oversol. Usein kysytyt kysymykset. Luettu 26.3.2013.
http://www.oversol.fi/usein_kysytyt_kysymykset

Riikkula, J. 2004. Valonlähteiden säätö. ST-kortti 58.31. Espoo: Sähkötieto ry.

Ruppa, Erkki. 2001. Yliaallot. Luettu 19.2.2013.
<http://salabra.tp.samk.fi/er/siirto/yliaallot.doc>

Shmilovitz, D. 2005. On the Definition of Total Harmonic Distortion and its Effect on Measurement Interpretation. Luettu 4.4.2013.
<http://www.eng.tau.ac.il/~shmilo/publications.html>

Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry & Suomen Valoteknillinen Seura ry. 1999. Valaistustekniikka 2. Espoo: Sähköinfo Oy.

Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo Oy.

Sähköturvallisuuden edistämiskeskus. Halogeenilamput. Sähkön käyttö kotona. Luettu 20.3.2013.
http://www.stek.fi/sahkon_kaytto_kotona/valonlahteet_lamput/fi_FI/halogeenilamput/

Sähköturvallisuuden edistämiskeskus ry. 2012. Kodin Valaistus. Luettu 4.4.2013.
<http://www.kodinvalaistus.fi/valon-laatu/>

Sähköturvallisuuden edistämiskeskus. LED-lamput. Sähkön käyttö kotona. Luettu 20.3.2013.
http://www.stek.fi/sahkon_kaytto_kotona/valonlahteet_lamput/fi_FI/led_lamput/

Taloon. Valaisininfo. Luettu 26.3.2013.
http://www.taloon.com/info/tietoa_rakentajalle/valaisininfo

Taloon. Kuva. Luettu 6.3.2013.
http://www.taloon.com/kuvat/k/valaisimet/highline_dim.jpg

Taloon. Kuva. Luettu 6.3.2013.
http://www.taloon.com/kuvat/k/star_trading/led-lamppu_decoration_led_336-36_halk_45x70_mm_e27_kirkas.jpg

Tetri, E., Raunio, J. & Halonen, L. 2011. Lamppuopas. Opas hehkulamppujen korvaamiseksi. Aalto-yliopisto. Luettu 26.3.2013.
<http://lightinglab.fi/ekovalo/News/lamppuopas.pdf>

Uddin, S., Shareef, H., Mohamed, A. & Hannan, M.A. 2012. An Analysis of Harmonics from LED Lamps. Universiti Kebangsaan Malaysia. Luettu 22.4. 2013.
<http://ieeexplore.ieee.org/>

Uusimäki, J. 2004. Loistehon kompensointi pienjänniteverkossa ($U_n < 1000$ V). ST-kortti 52.15. Espoo: Sähkötieto ry.

Whitaker, Tim. 2005. Fact or Fiction – LEDs don't produce heat. LEDs Magazine. Luettu 3.3.2013.
<http://ledsmagazine.com/features/2/5/8>

Wikipedia. LED. Luettu 3.3.2013. <http://fi.wikipedia.org/wiki/LED>

Wikipedia. Hehkulamppu. Luettu 28.2.2013. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Hehkulamppu>

Wikipedia. Loistelamppu. Luettu 2.3.2013. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Loistelamppu>

LIITTEET

Liite 1. Himmenninmittausten tulokset

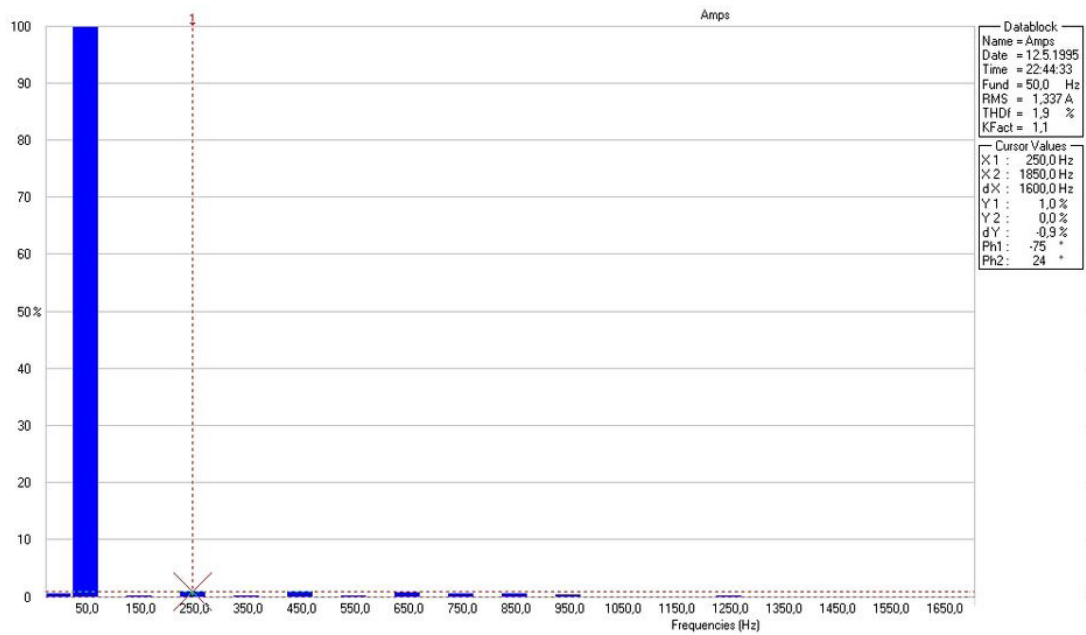
1 (9)

Mitattujen suureiden arvot taulukoituna

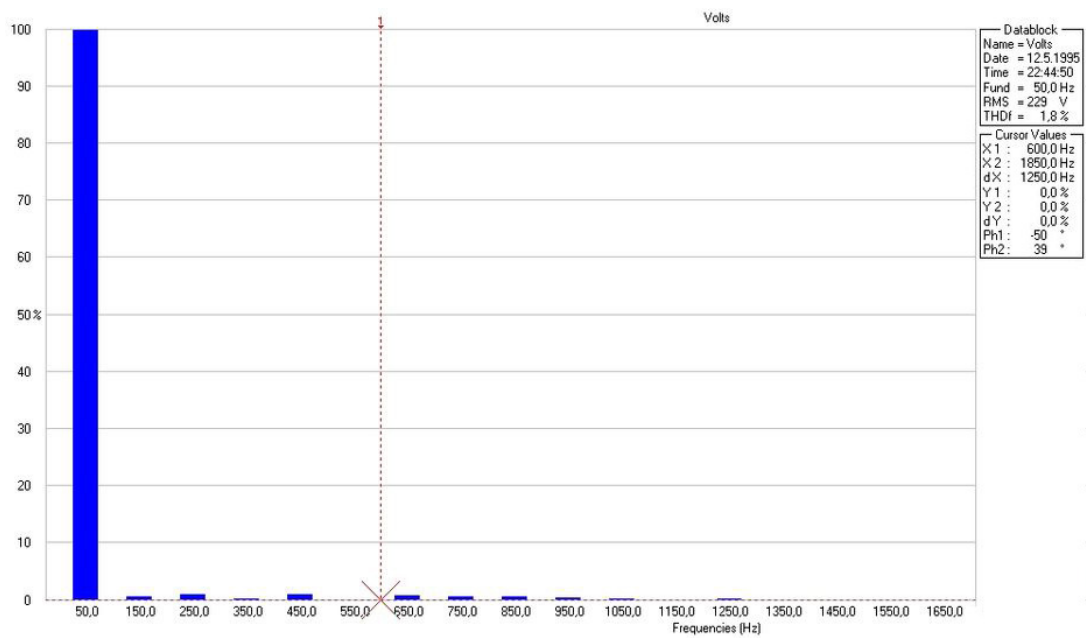
Mittaus	$U_v(V)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	DPF	PF	$I_{rms}(A)$	$THD_u(\%)$	$THD_i(\%)$
Ilman himmennintä	230	306	3	306	1,00	1,00	1,337	1,8	1,9
Himmennin 100 %	230	301	41	304	1,00	0,99	1,317	2,0	11,5
Himmennin 50 %	230	211	166	268	0,90	0,79	1,165	2,3	54,4
Himmennin minimissä	230	63	163	174	0,57	0,36	0,751	2,3	115,0

Ilman happennintä

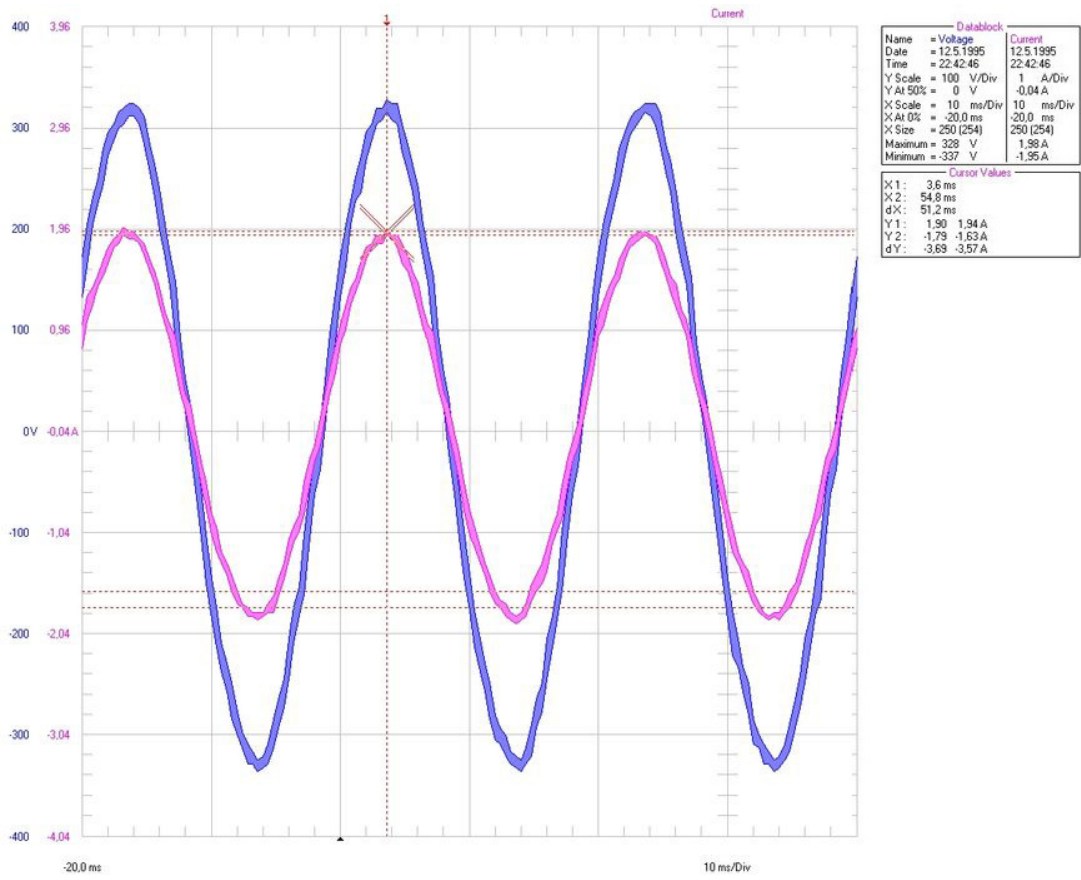
Virran spektri



Jännitteen spektri

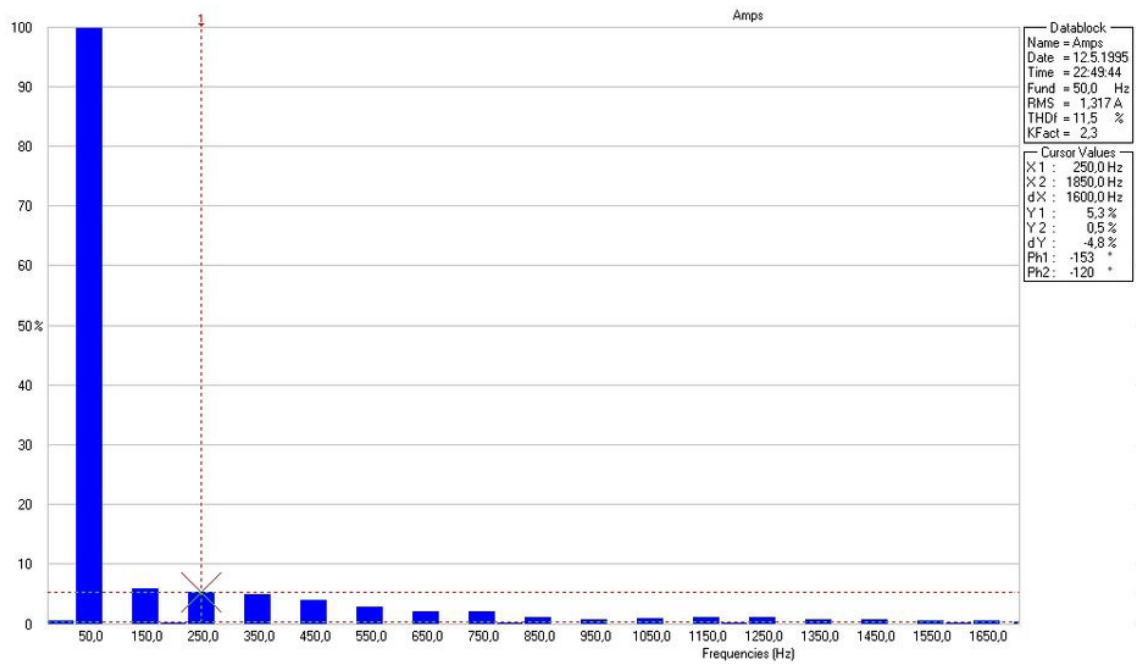


Virran ja jännitteen kuvaajat

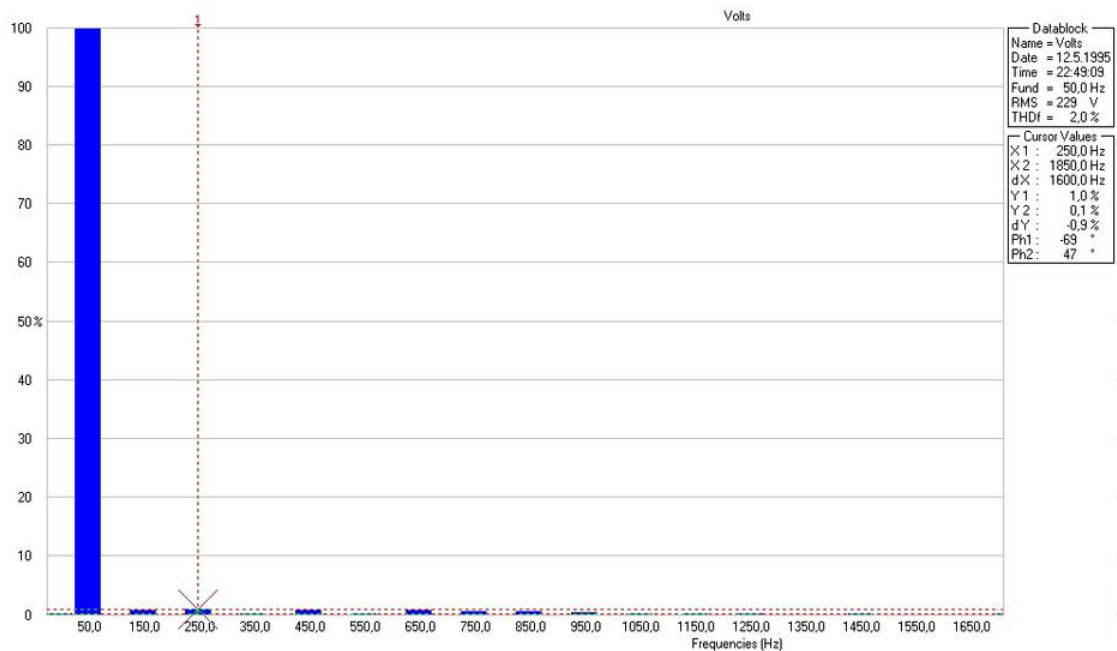


Himmennin 100 %

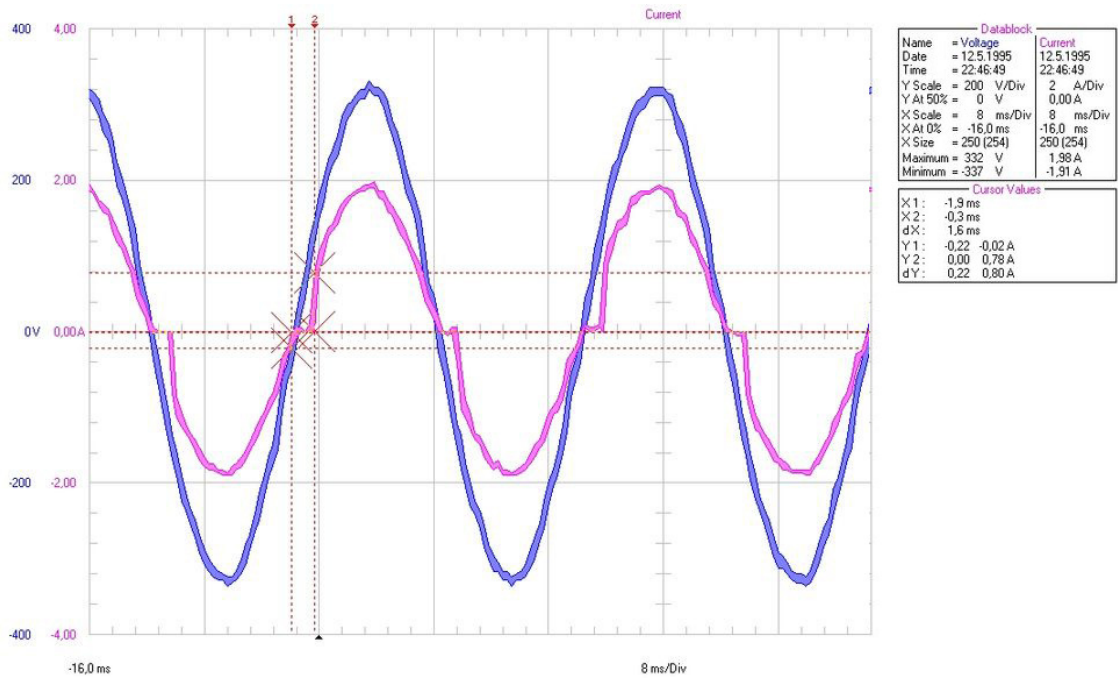
Virran spektri



Jännitteen spektri

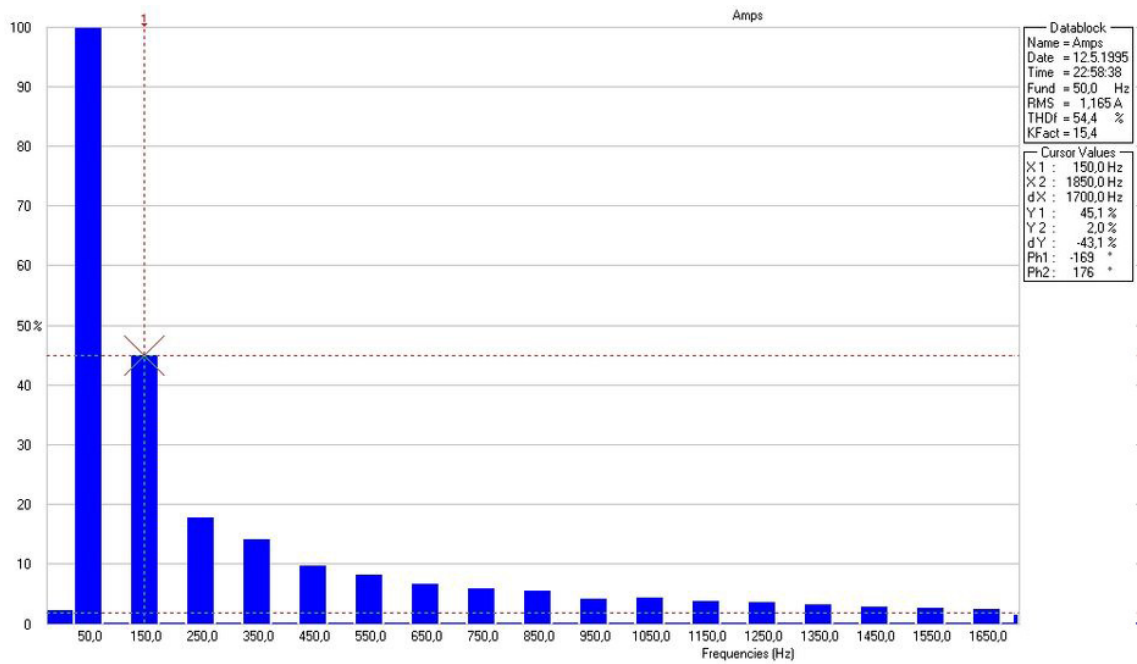


Virran ja jännitteen kuvaajat

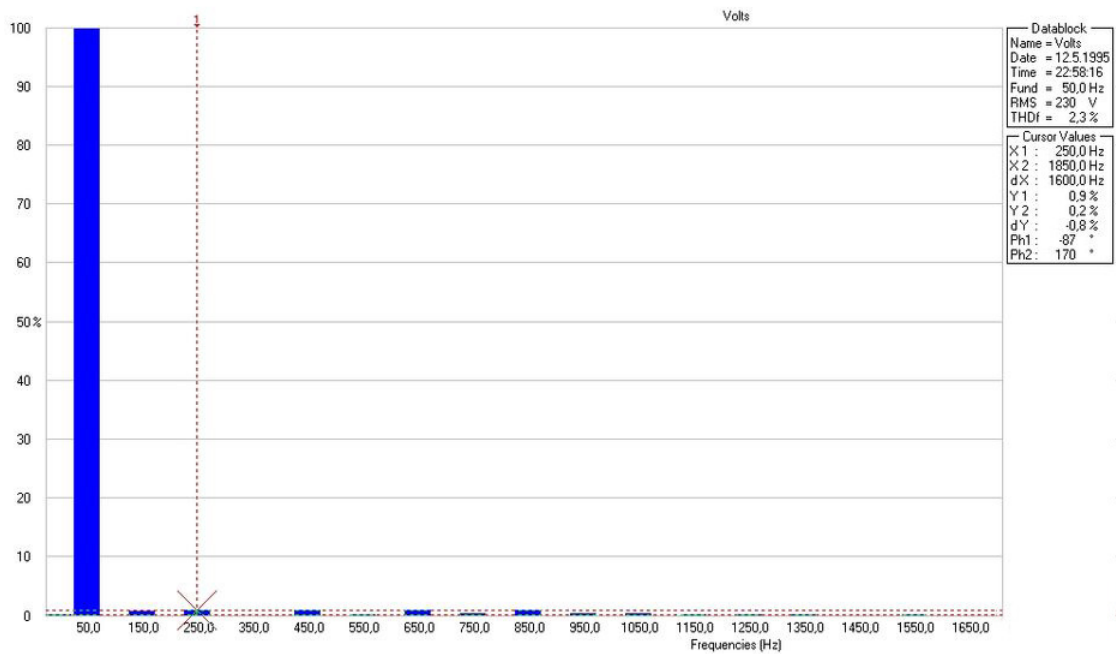


Himmennin 50 %

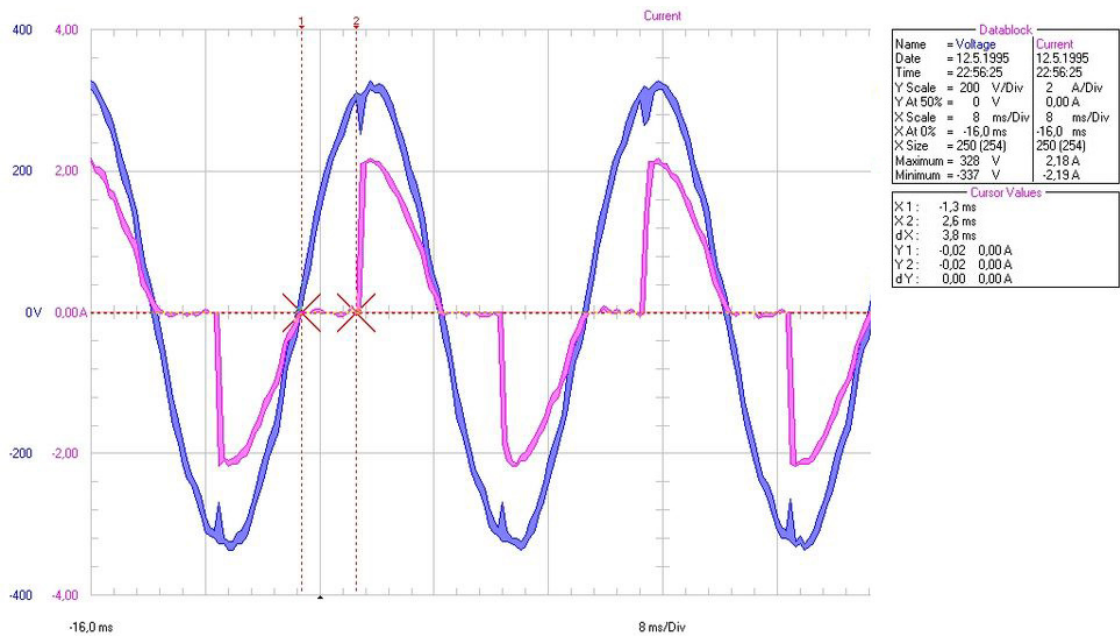
Virran spektri



Jännitteen spektri

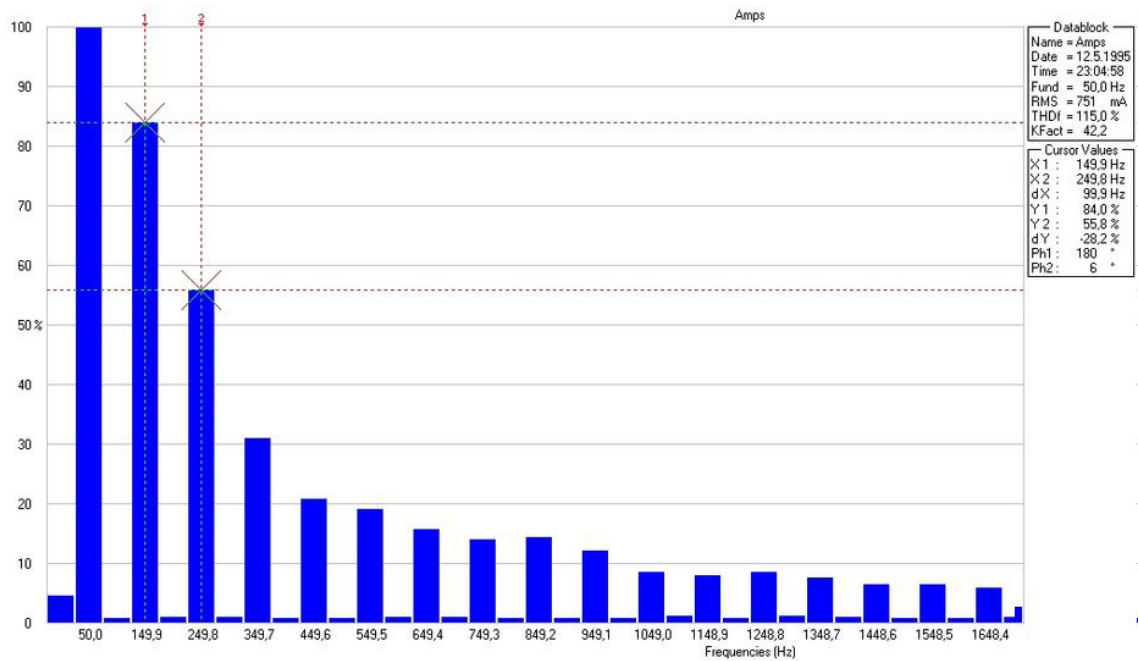


Virran ja jännitteen kuvaajat

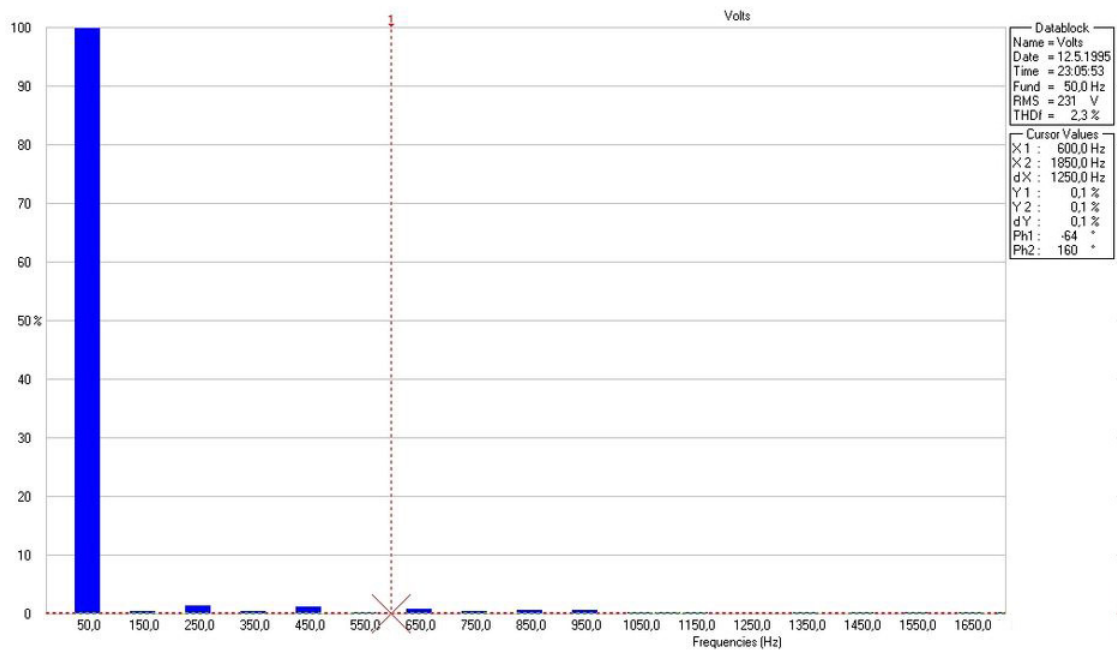


Himmennin minimissä

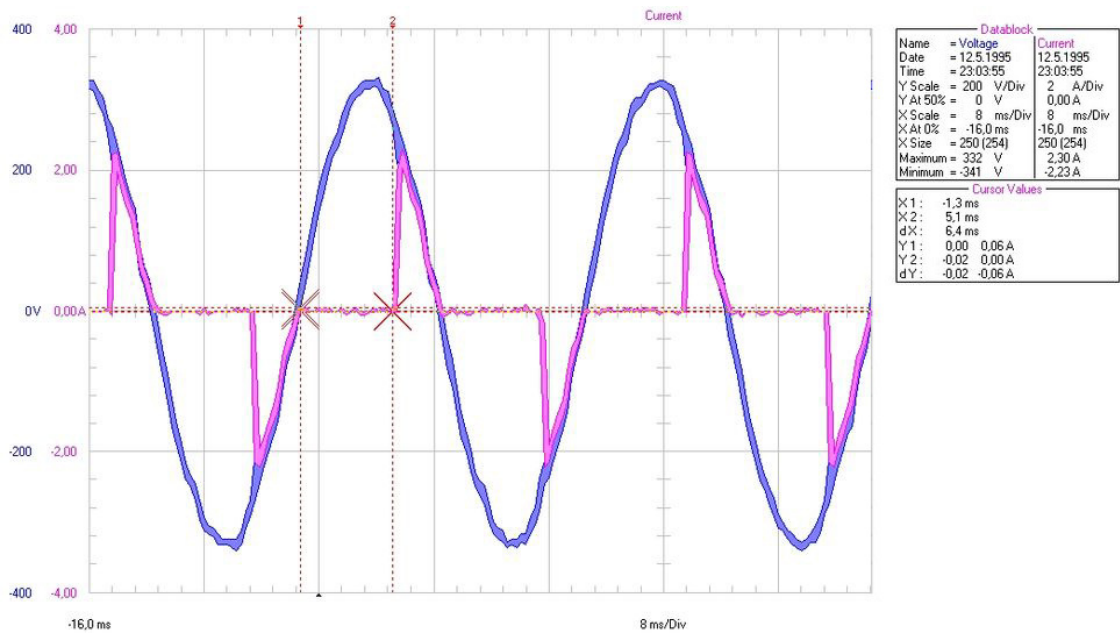
Virran spektri



Jännitteen spektri



Virran ja jännitteen kuvaajat



Liite 2. Pienloistelamppumittausten tulokset

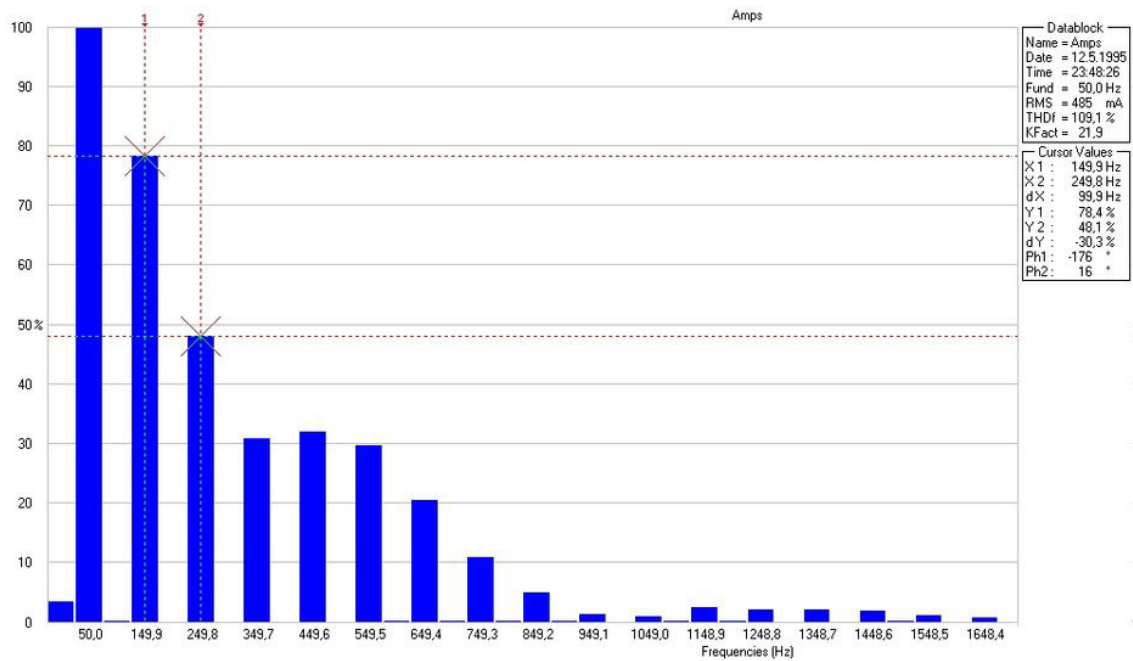
1 (13)

Mitattujen suureiden arvot taulukoituna

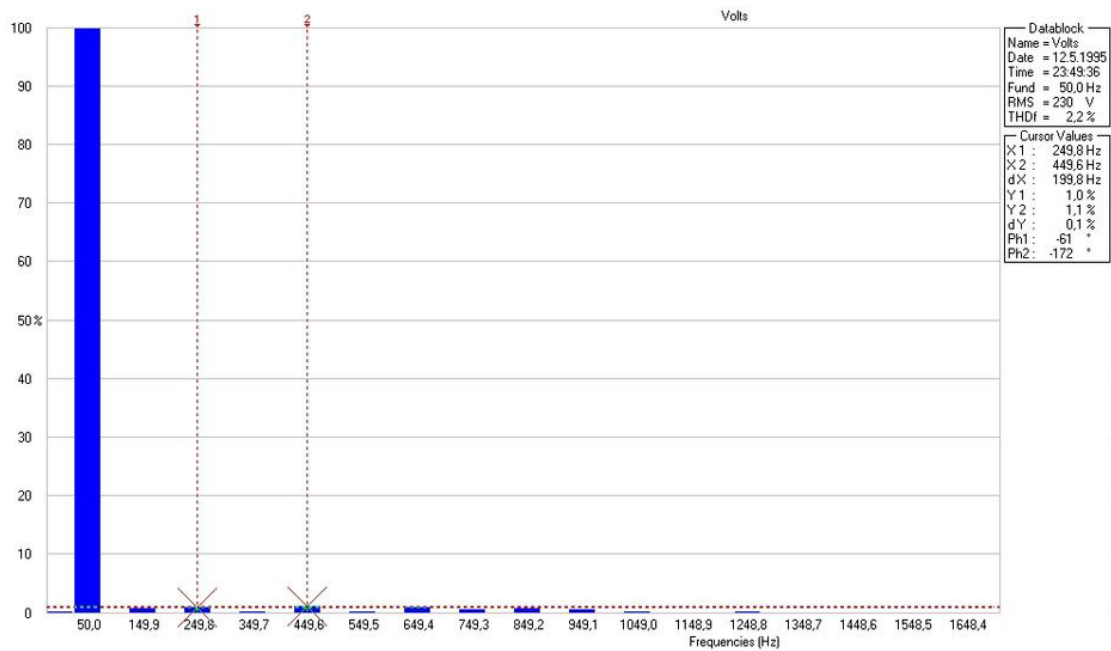
Mittaus	$U_V(V)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	DPF	PF	$I_{rms}(mA)$	$THD_U(\%)$	$THD_I(\%)$
Kaikki lamput	230	69,0	-88,0	112,0	0,93	0,62	485,0	2,2	109,1
Osram Duluxstar Mini Twist 18 W	230	17,4	-22,8	28,7	0,95	0,61	123,0	2,3	114,7
Osram Duluxstar Mini Twist 11 W	230	10,7	-14,6	18,1	0,95	0,59	77,4	2,3	118,8
Osram Duluxstar Mini Ball 15 W	230	14,7	-18,5	23,6	0,94	0,62	102,1	2,3	107,7
Osram Duluxstar Mini Ball 11 W	230	10,6	-13,4	17,1	0,94	0,62	73,4	2,4	110,1
Osram Dulux Intelligent Longlife 14 W	230	14,9	-18,5	23,8	0,94	0,63	102,3	2,3	105,7

Kaikki pienloistelamput

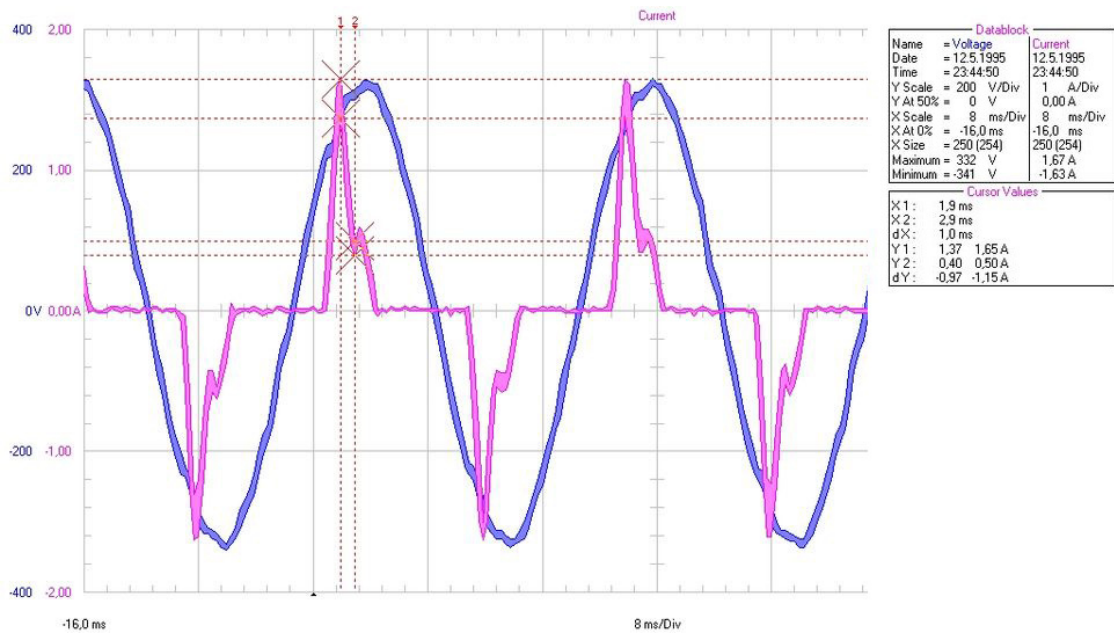
Virran spektri



Jännitteen spektri

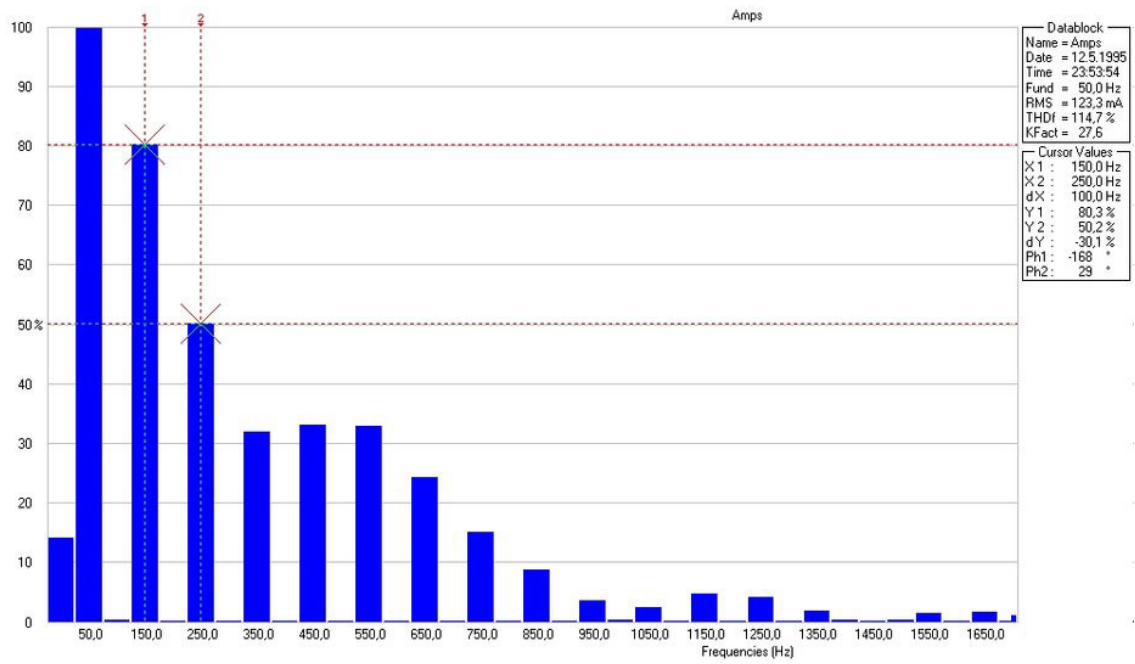


Virran ja jännitteen kuvaajat

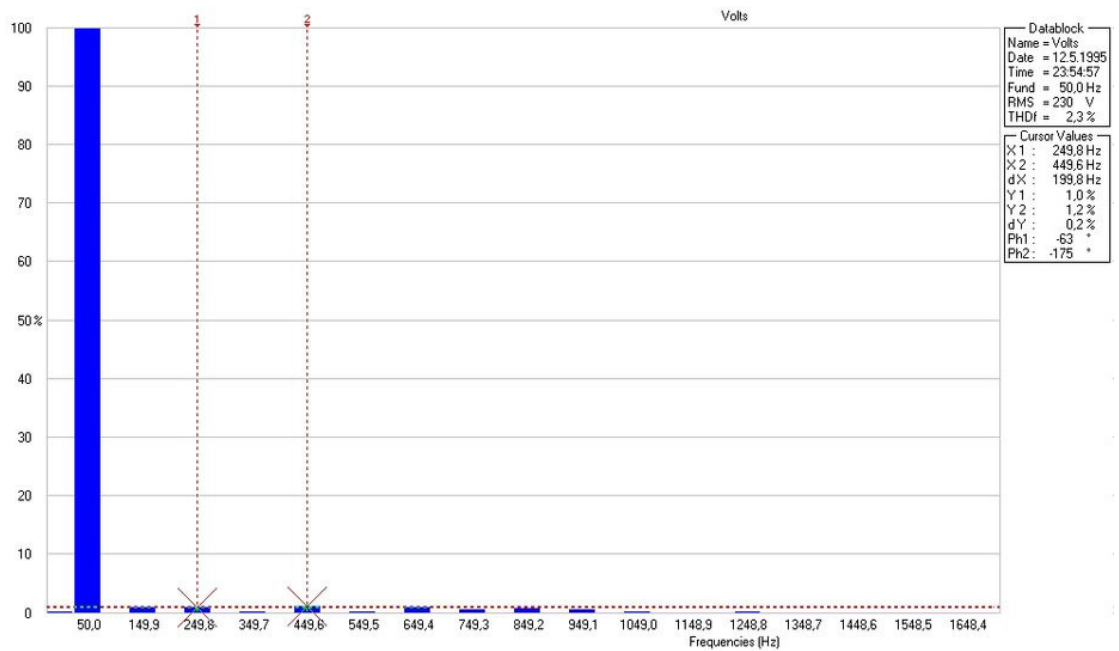


Osram Duluxstar Mini Twist 18 W

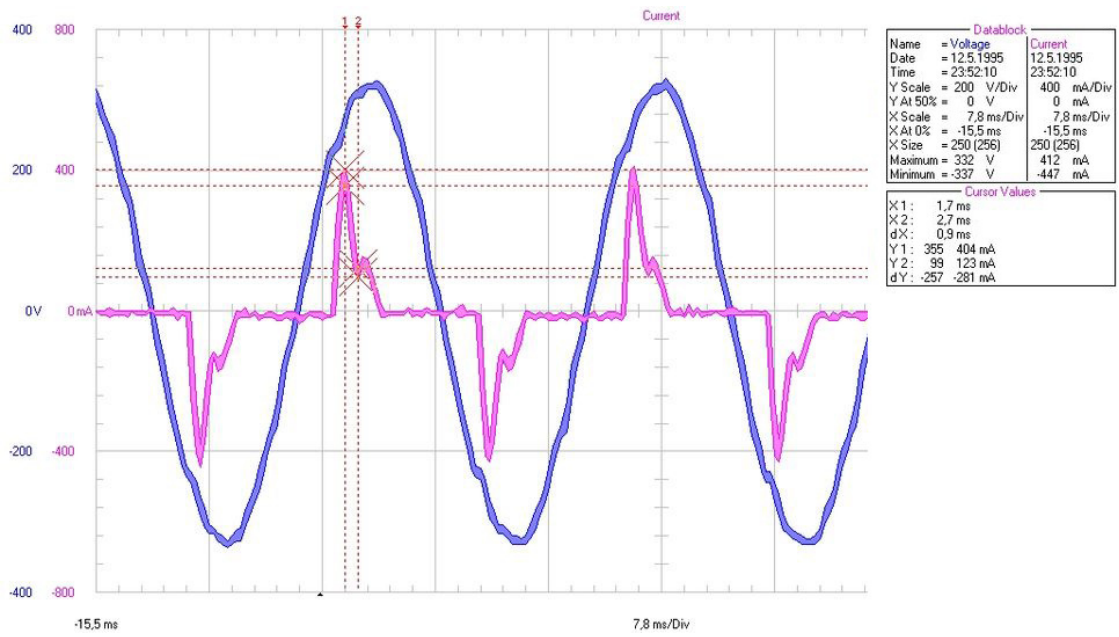
Virran spektri



Jännitteen spektri

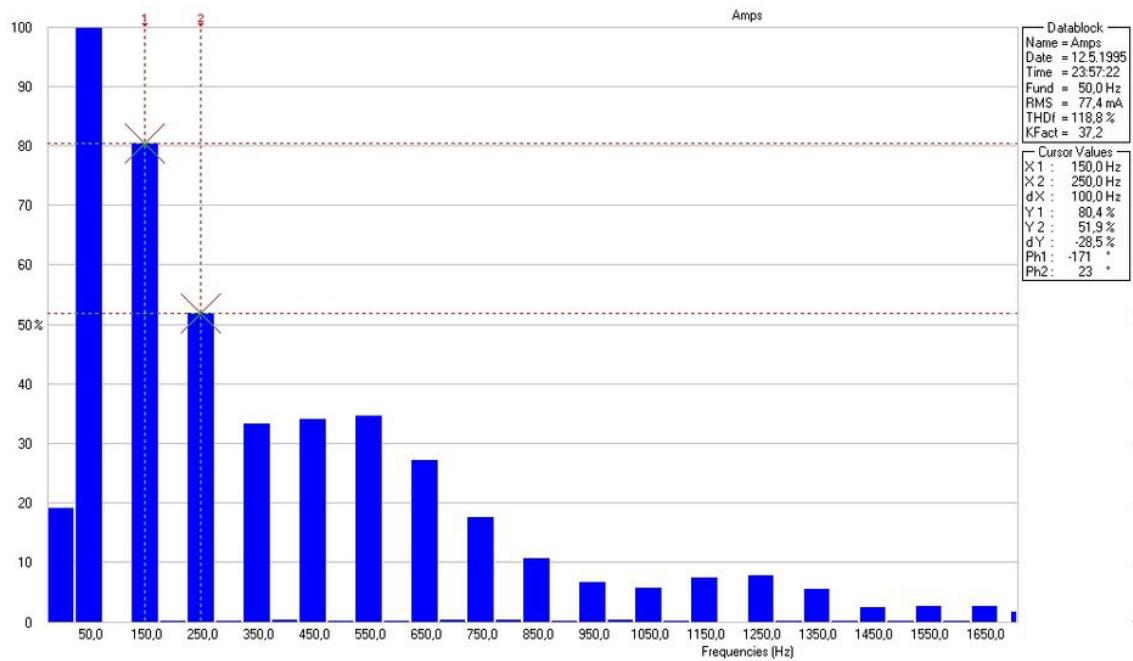


Virran ja jännitteen kuvaajat

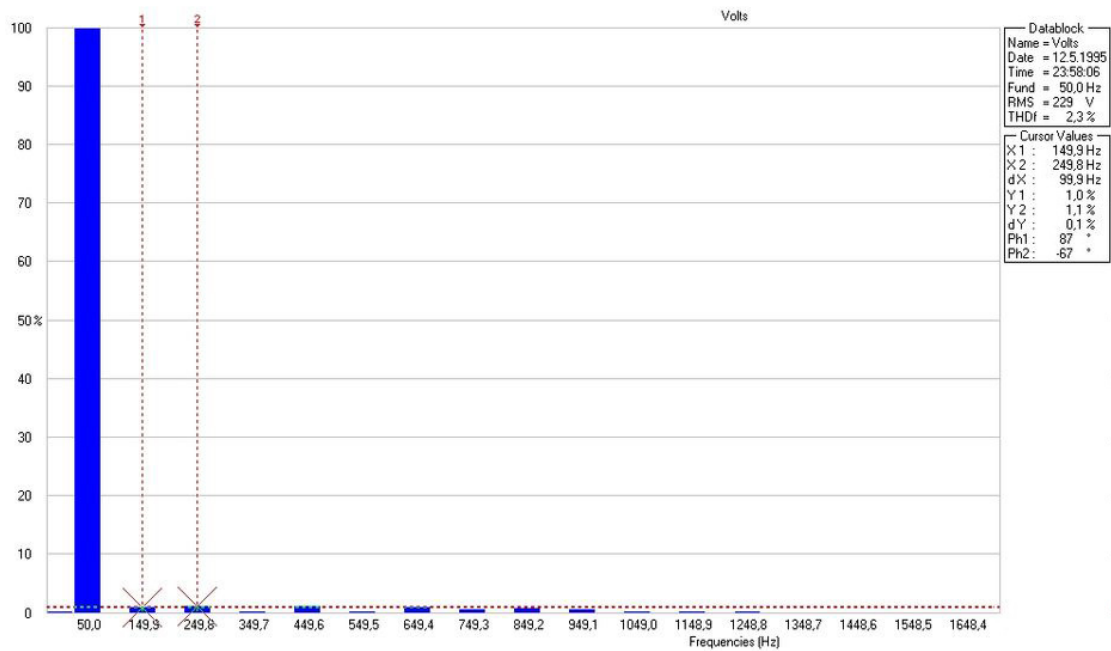


Osram Duluxstar Mini Twist 11 W

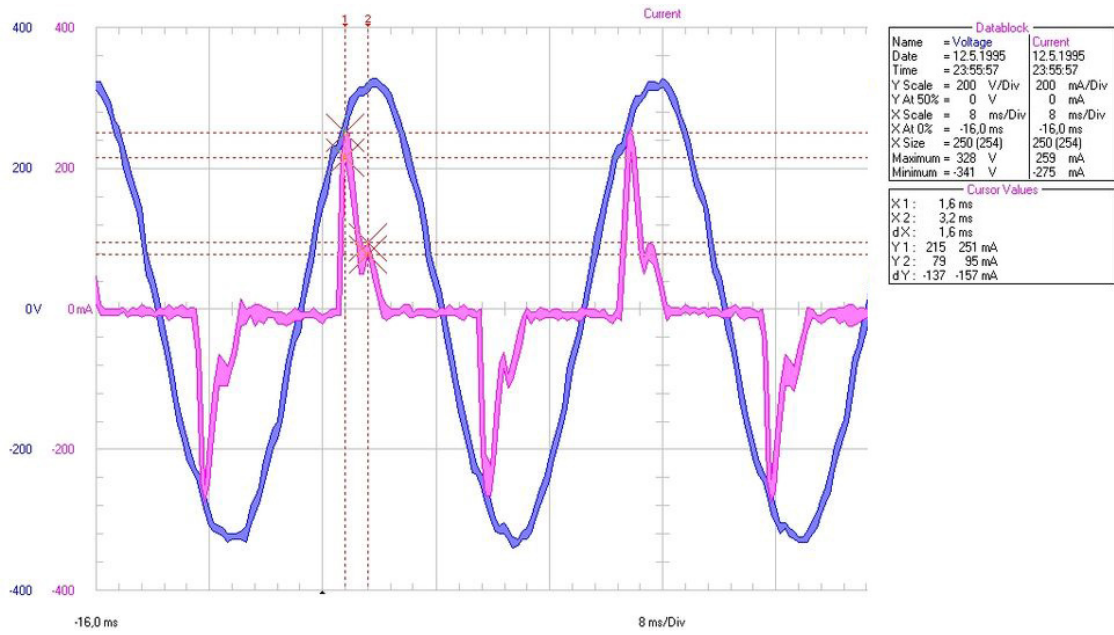
Virran spektri



Jännitteen spektri

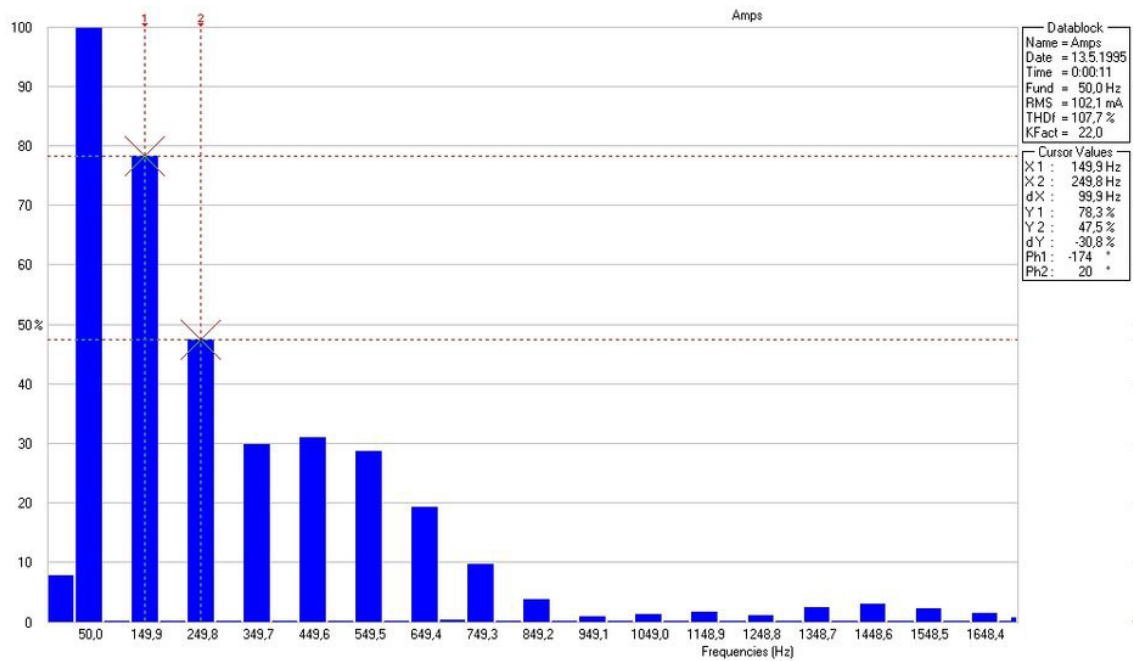


Virran ja jännitteen kuvaajat

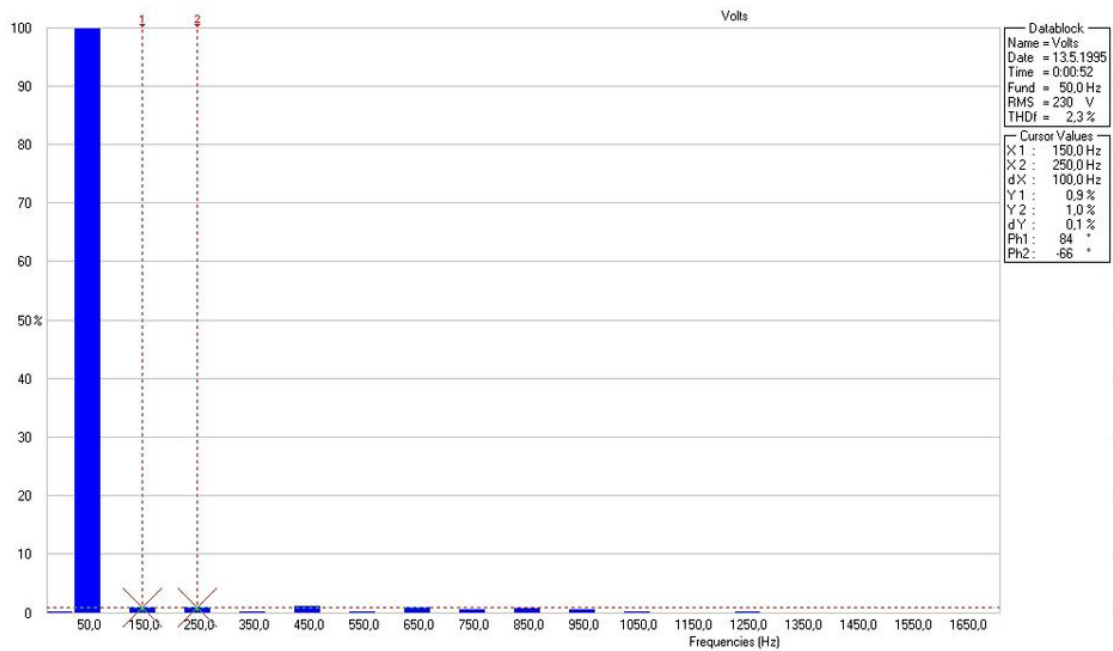


Osram Duluxstar Mini Ball 15 W

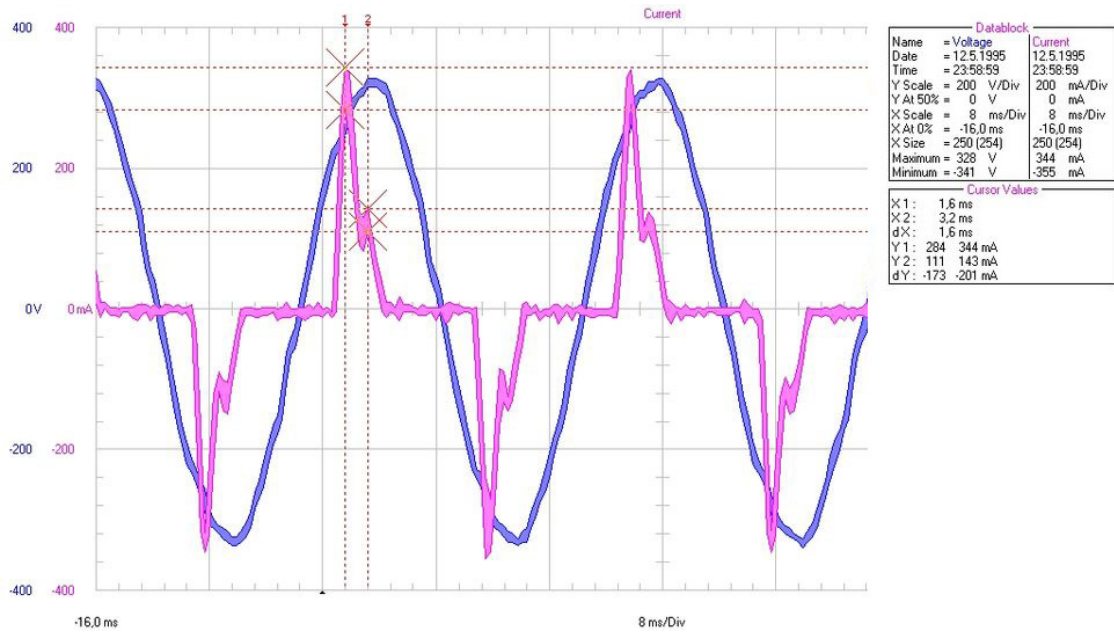
Virran spektri



Jännitteen spektri

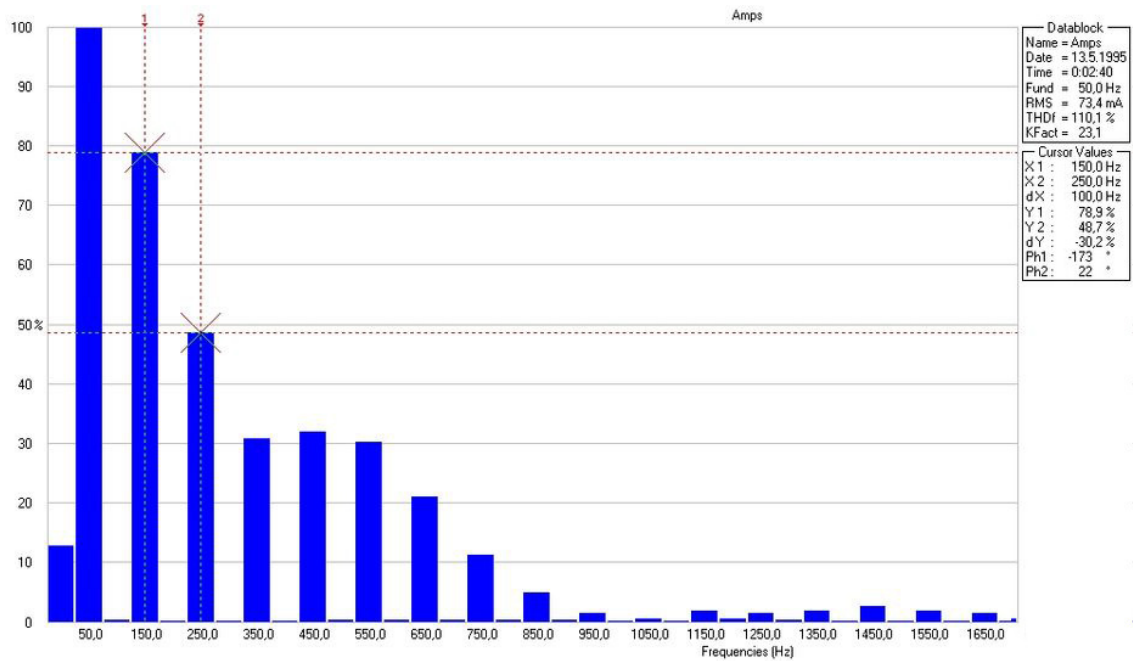


Virran ja jännitteen kuvaajat

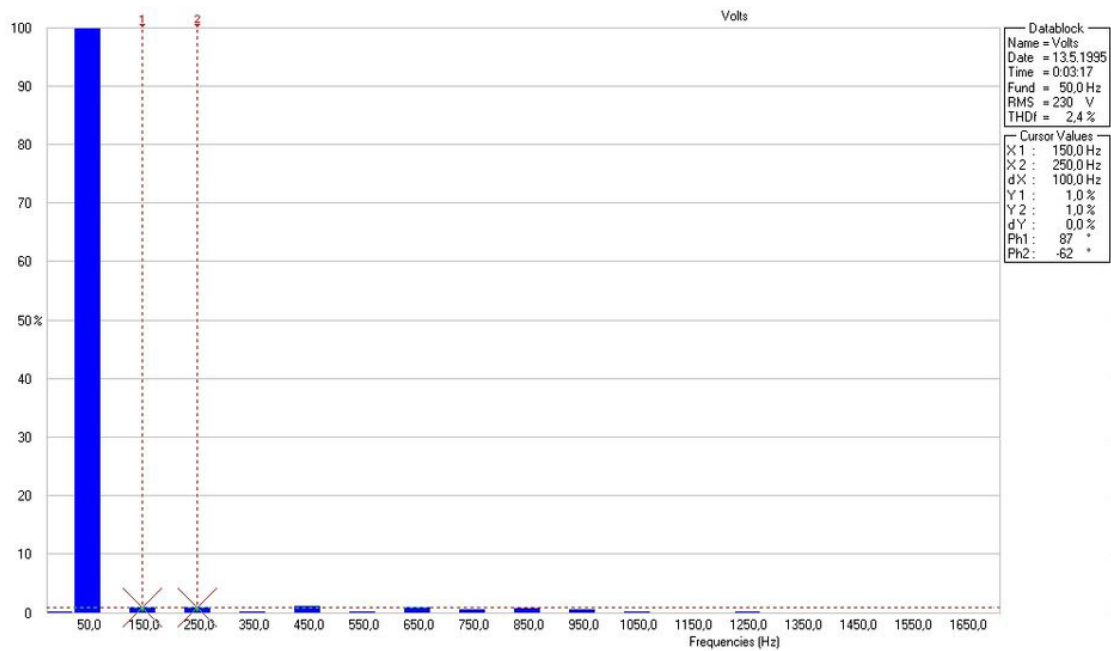


Osram Duluxstar Mini Twist 11 W

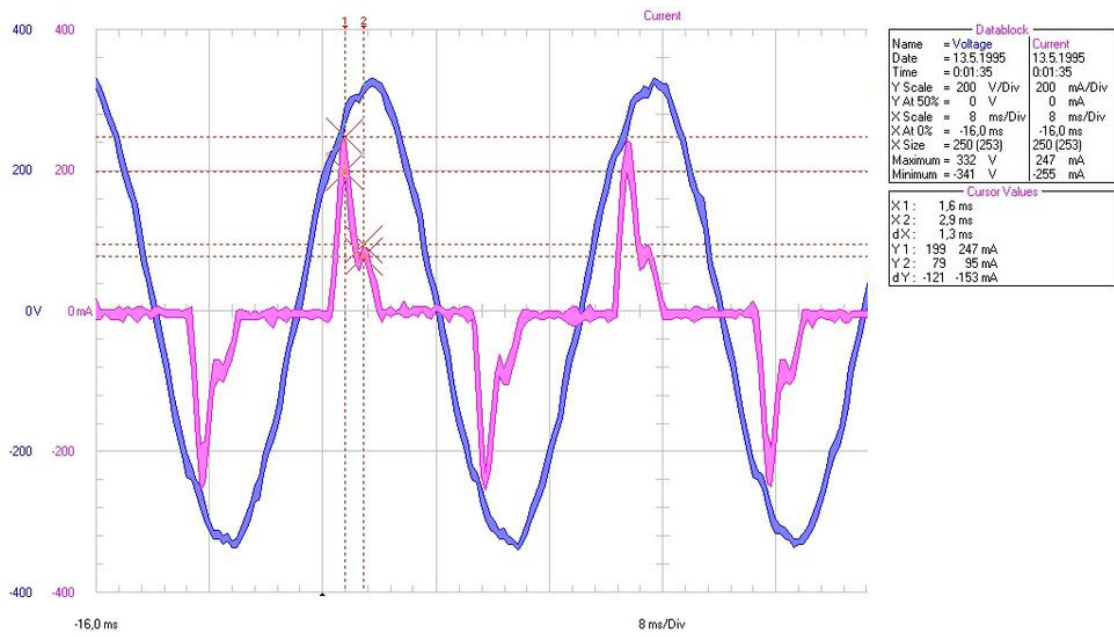
Virran spektri



Jännitteen spektri

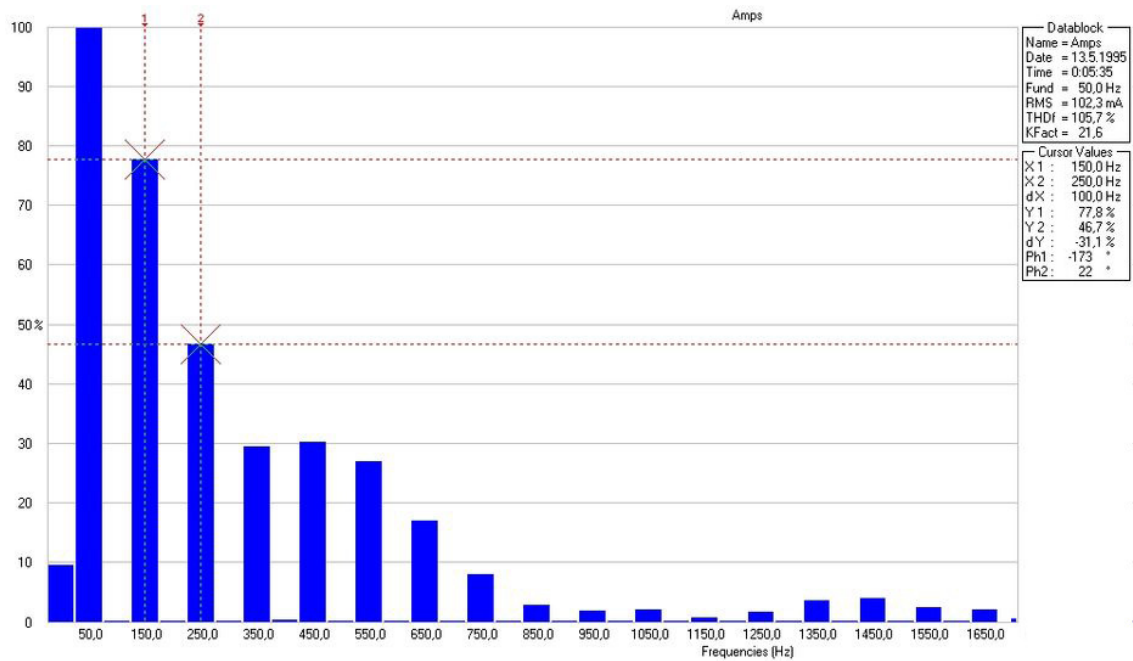


Virran ja jännitteen kuvaajat

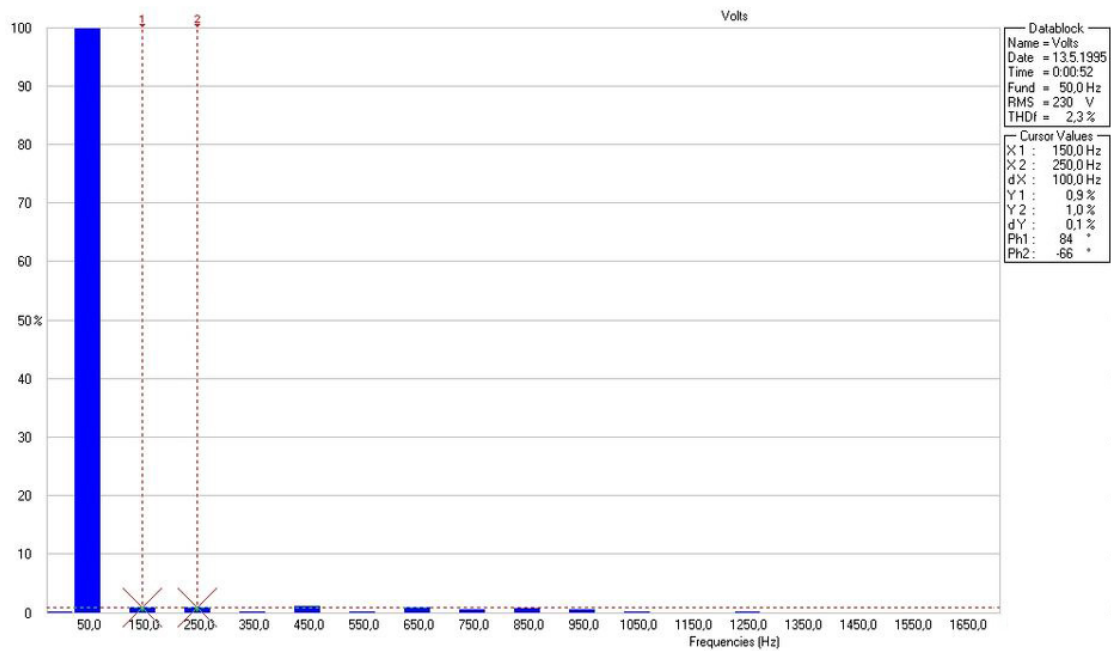


Osram Dulux Intelligent Longlife 14 W

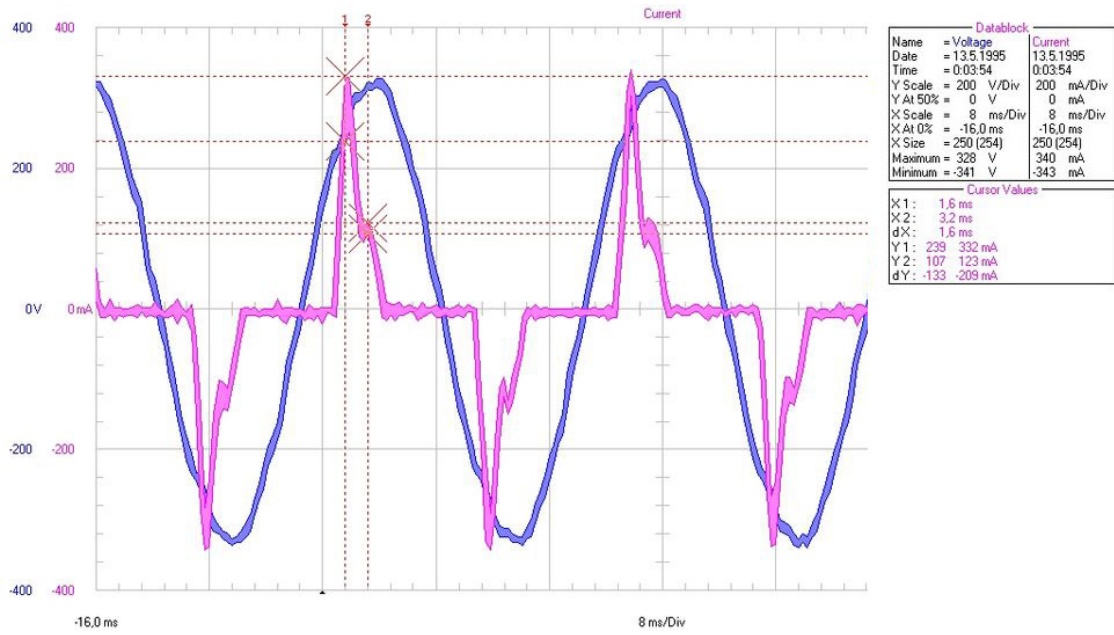
Virran spektri



Jännitteen spektri



Virran ja jännitteen kuvaajat



Liite 3. LED-lamppumittausten tulokset

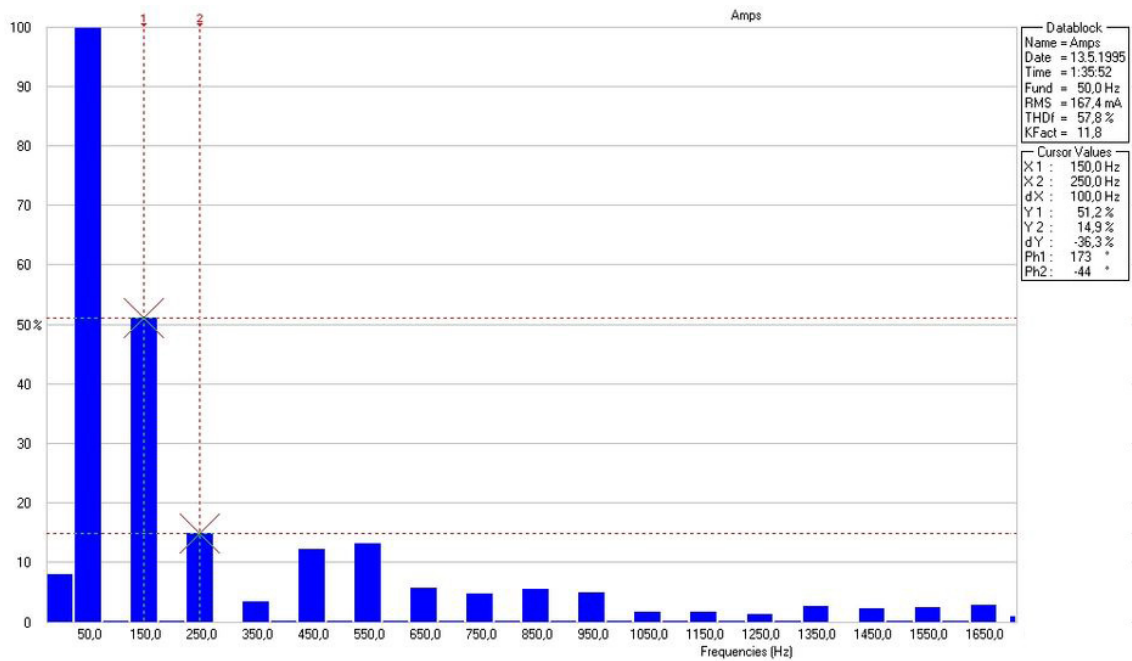
1 (13)

Mitattujen suureiden arvot taulukoituna

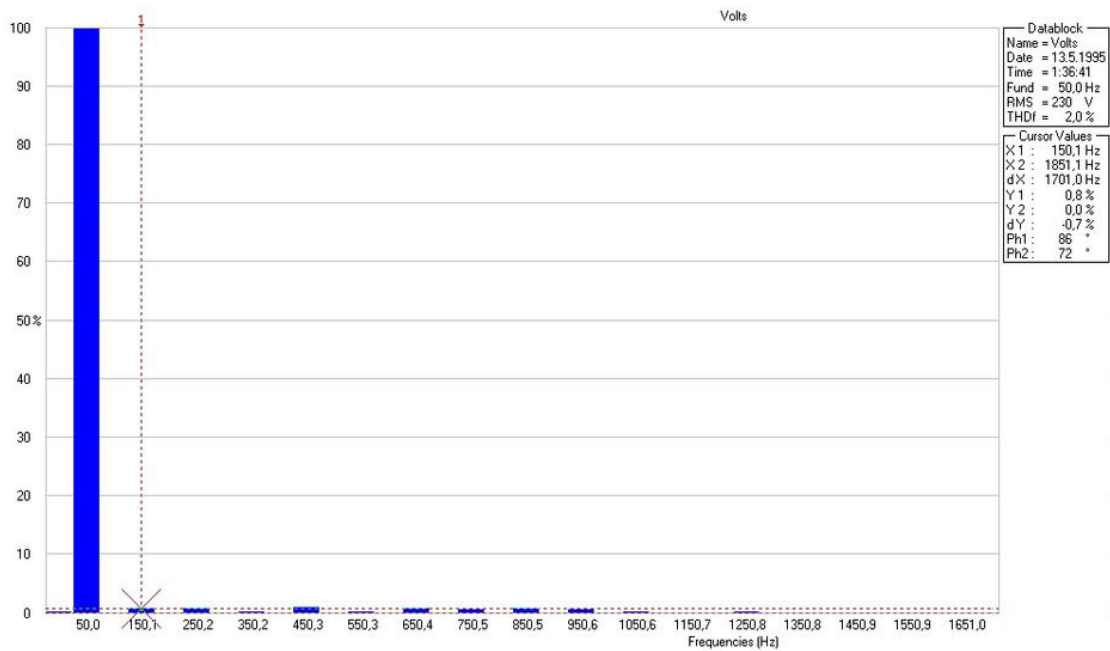
Mittaus	$U_v(V)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	DPF	PF	$I_{rms}(mA)$	$THD_u(\%)$	$THD_i(\%)$
Kaikki lamput	230	28,8	-25,9	38,8	0,88	0,74	167,4	2,0	57,8
Philips MyAmbiance 3 W	230	3,1	-3,9	5,0	0,79	0,62	20,2	1,9	61,3
Philips Econic 5 W	230	4,4	-6,9	8,2	1,00	0,53	34,1	1,9	150,5
Philips LED 4 W	230	3,8	-6,1	7,2	0,69	0,53	30,8	2,0	76,0
Philips LED 11 W	230	10,5	-13,6	17,2	0,92	0,61	74,0	1,8	108,8
Philips LED 7 W	230	6,7	-7,0	9,7	0,87	0,69	41,8	2,0	72,7

Kaikki LED-lamput

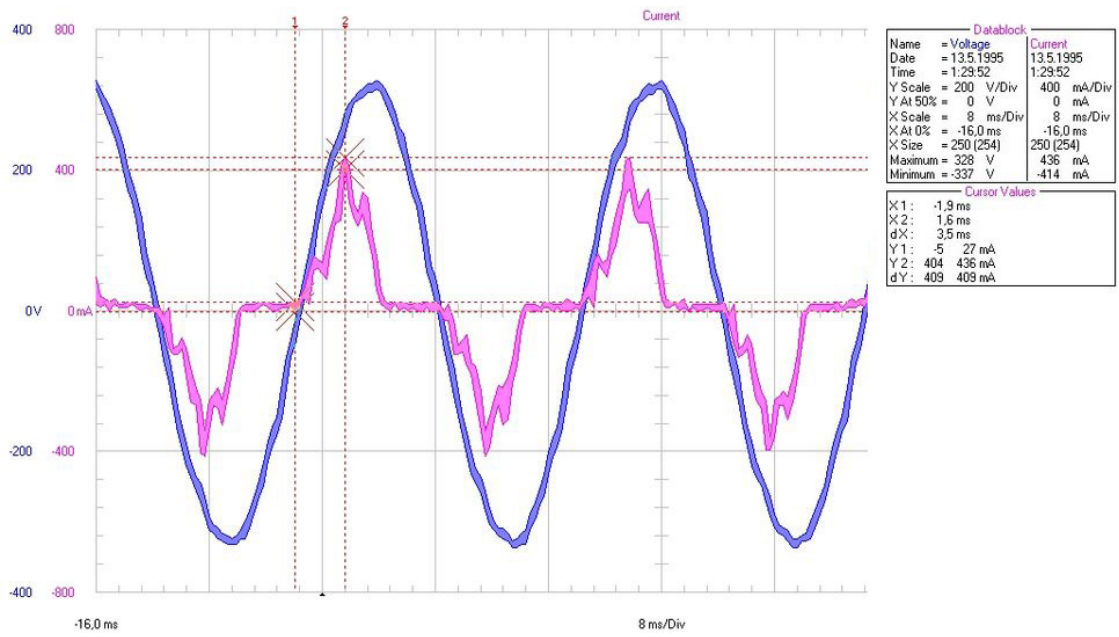
Virran spektri



Jännitteen spektri

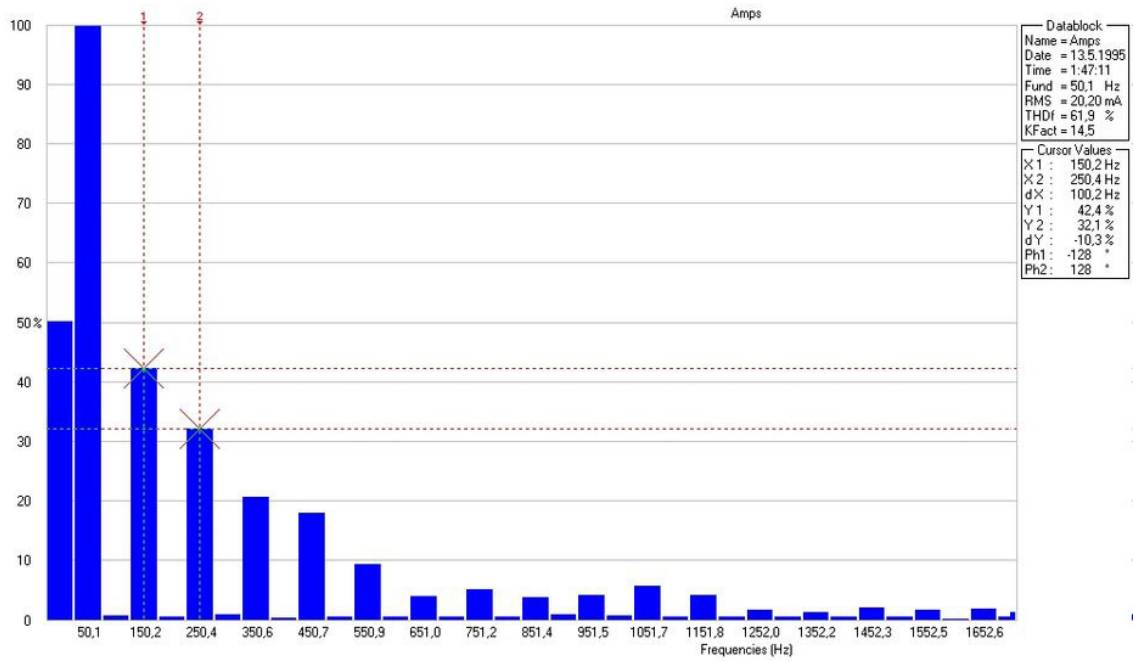


Virran ja jännitteen kuvaajat

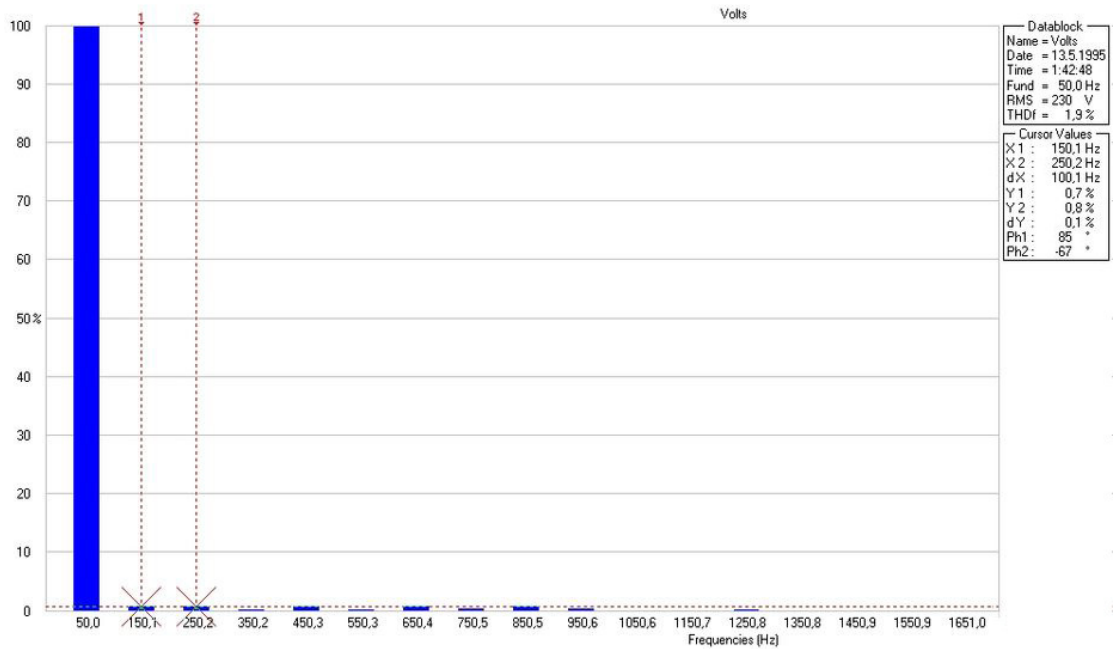


Philips MyAmbiance 3 W

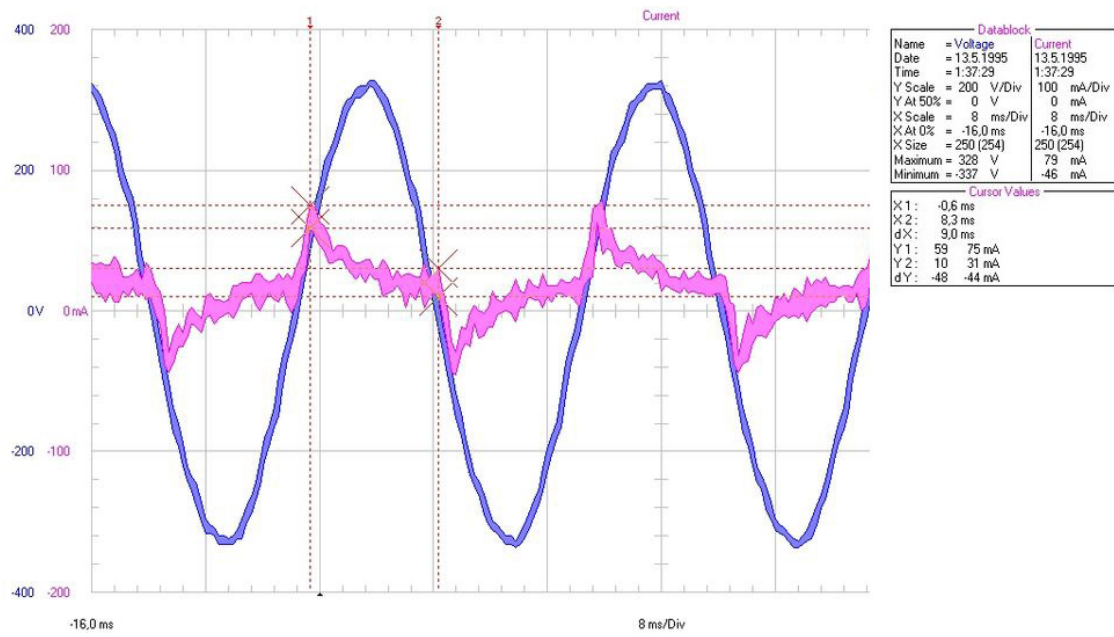
Virran spektri



Jännitteen spektri

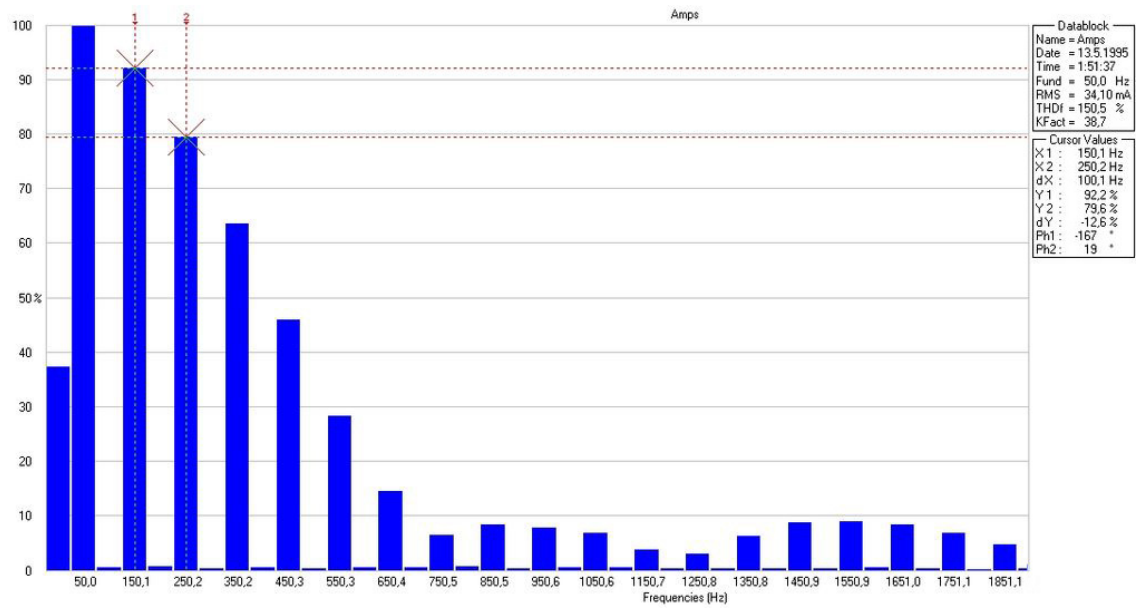


Virran ja jännitteen kuvaajat

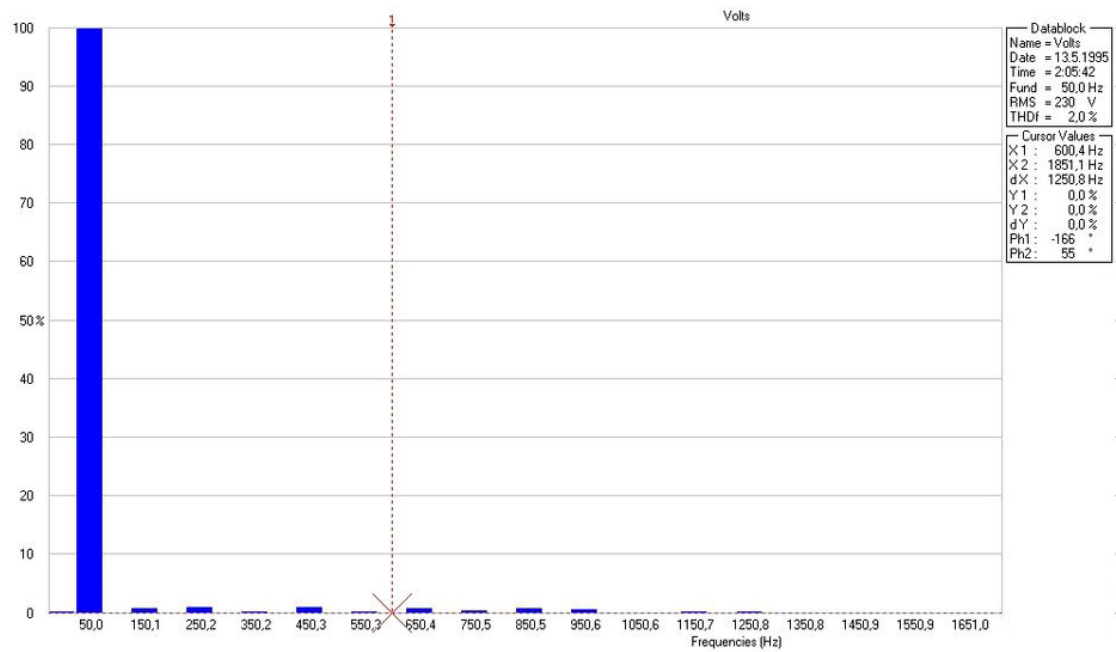


Philips Econic 5 W

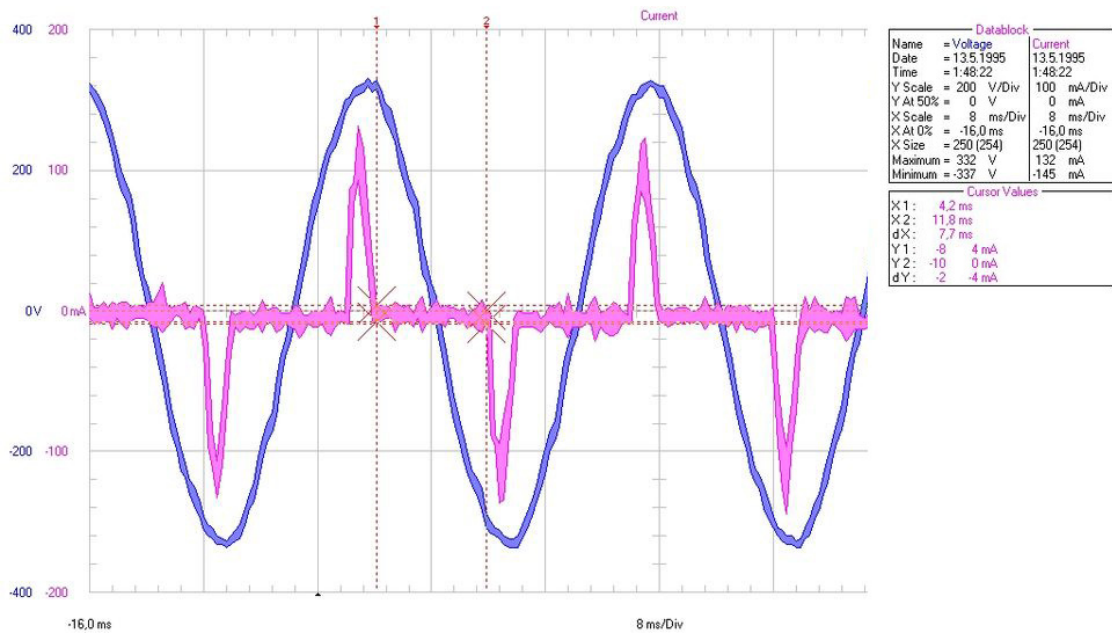
Virran spektri



Jännitteen spektri

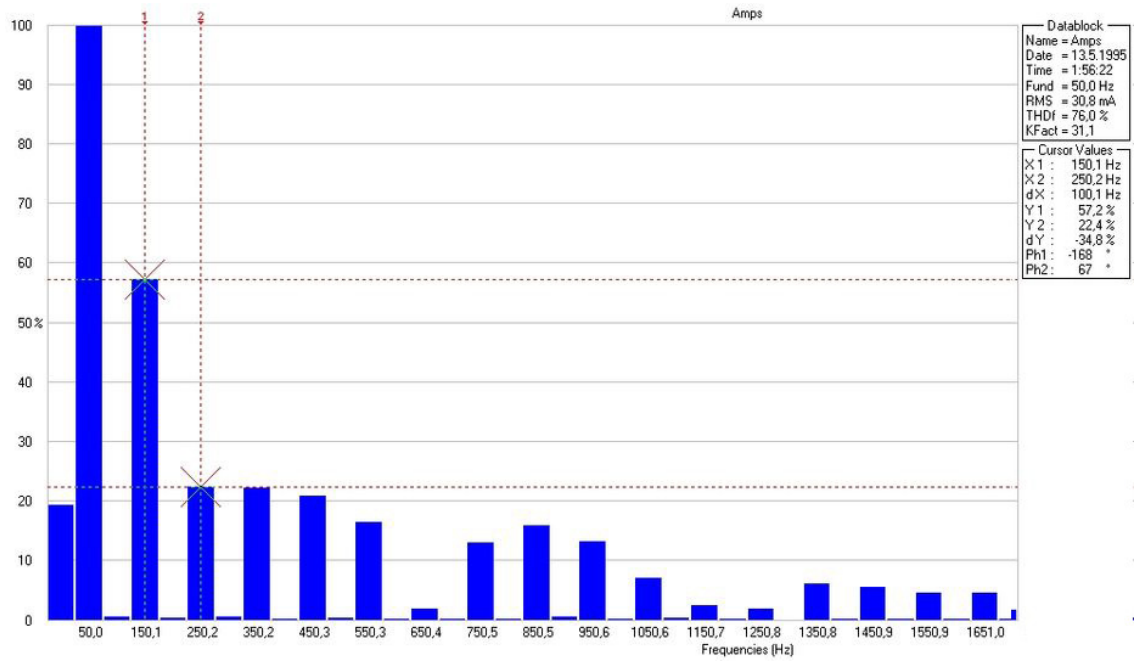


Virran ja jännitteen kuvaajat

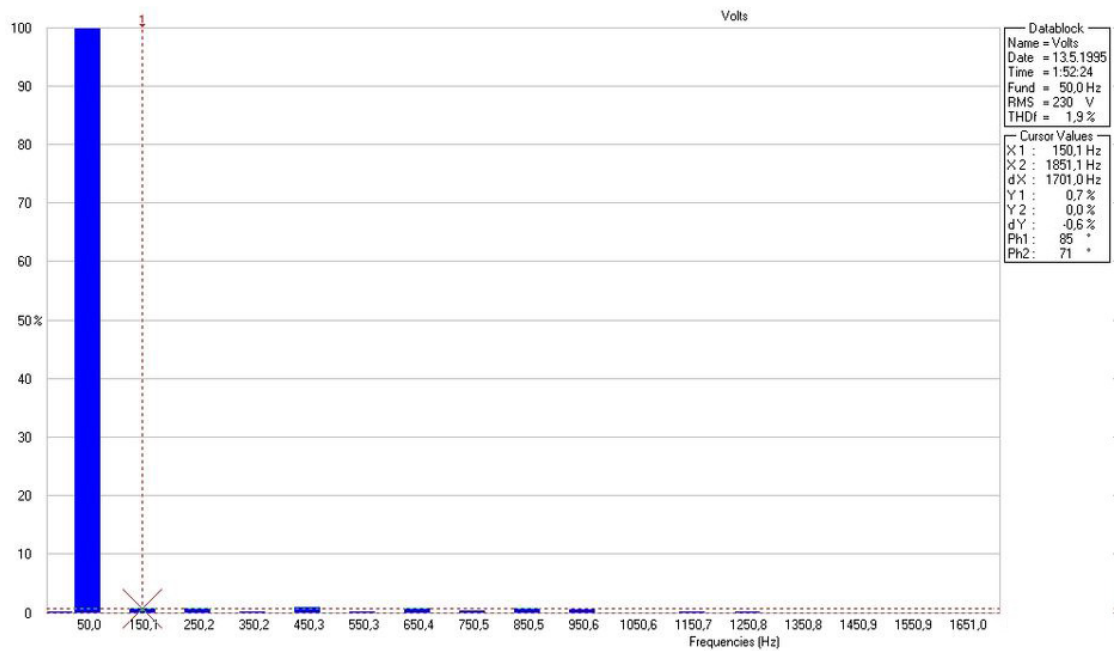


Philips LED 4 W

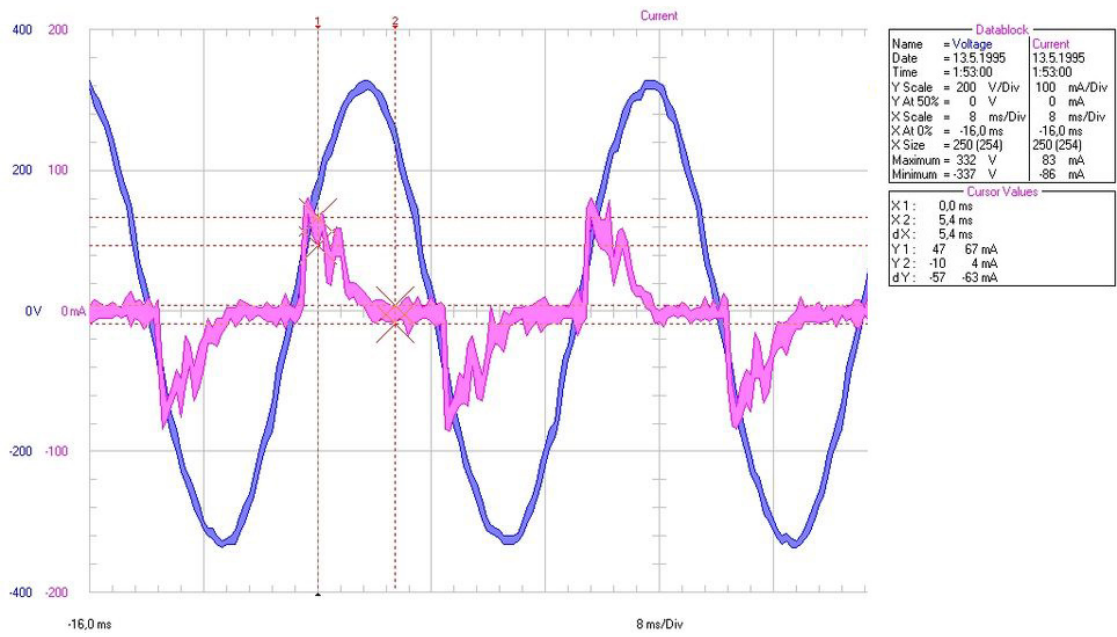
Virran spektri



Jännitteen spektri

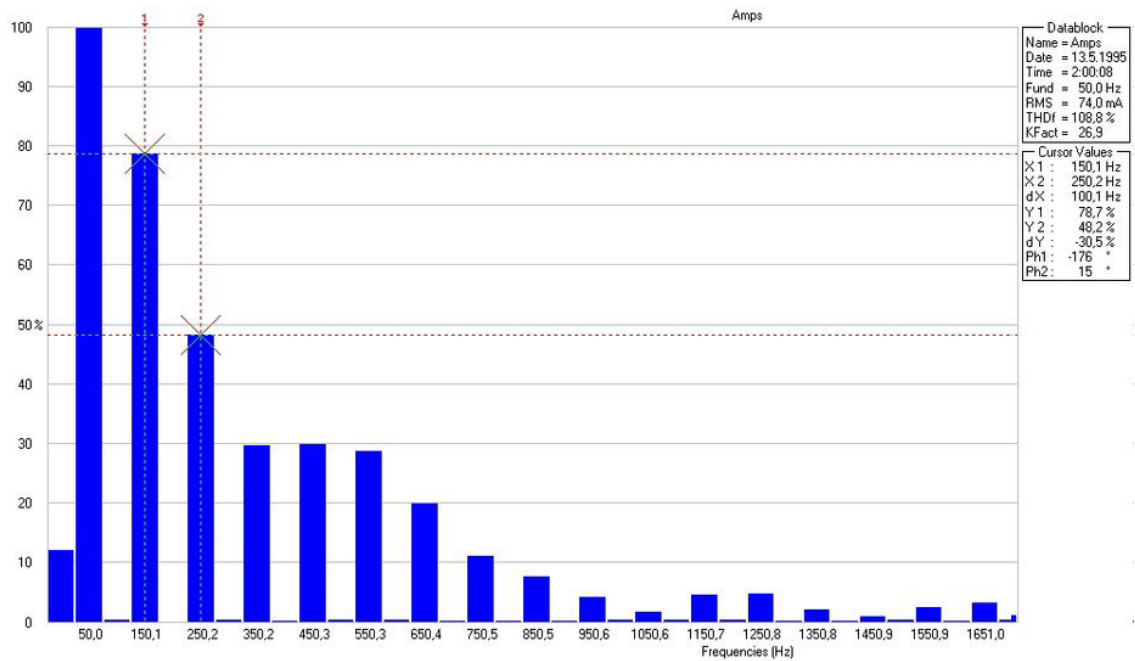


Virran ja jännitteen kuvaajat

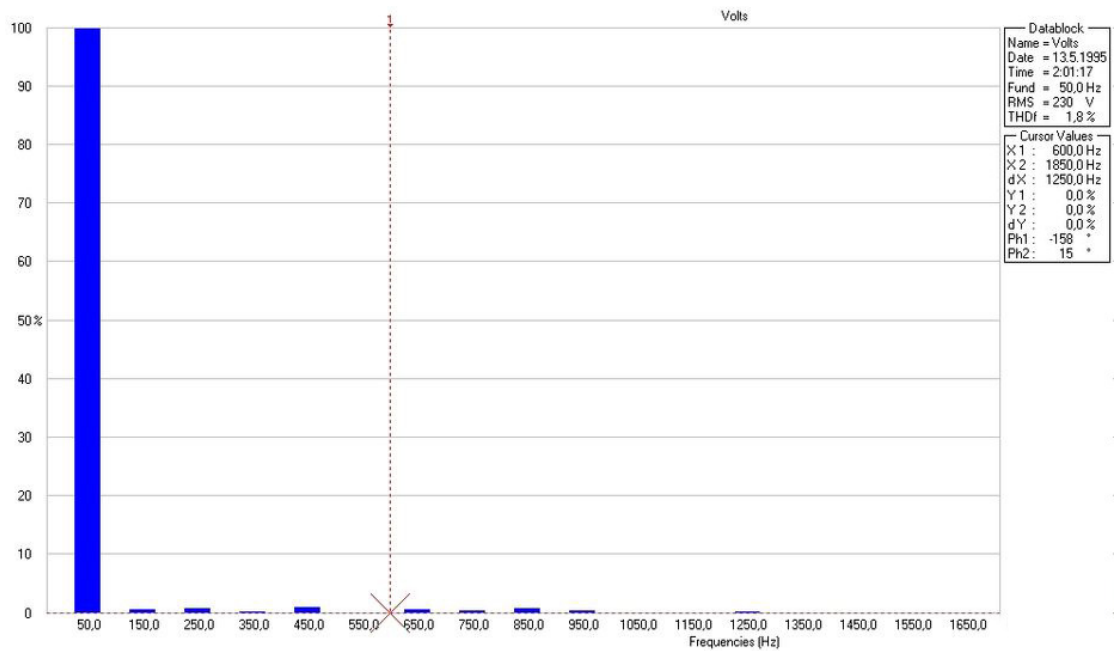


Philips LED 11 W

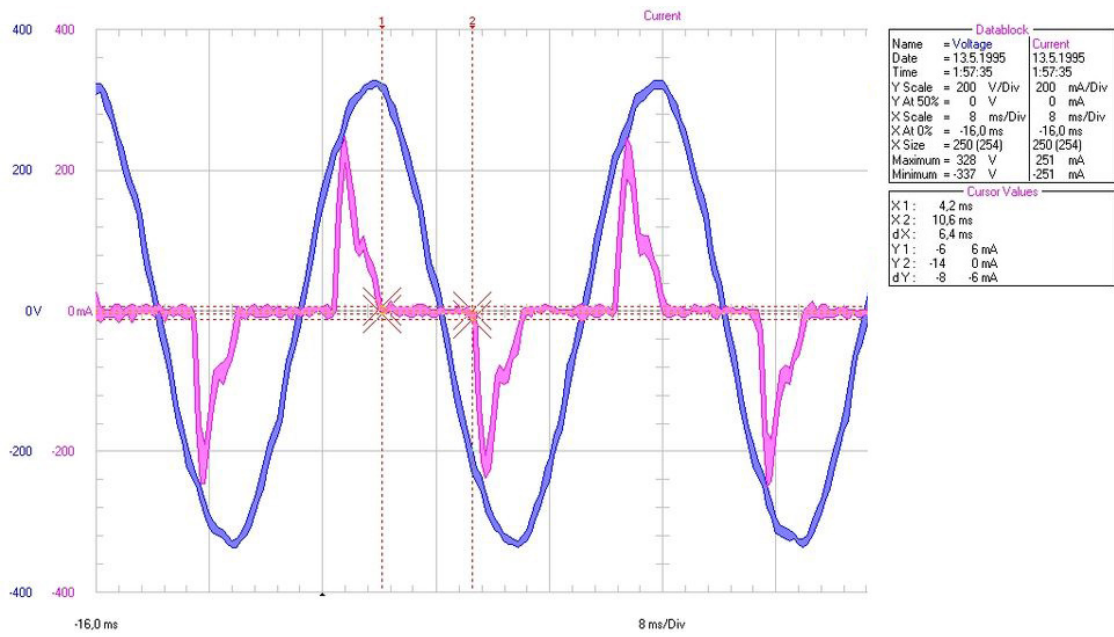
Virran spektri



Jännitteen spektri

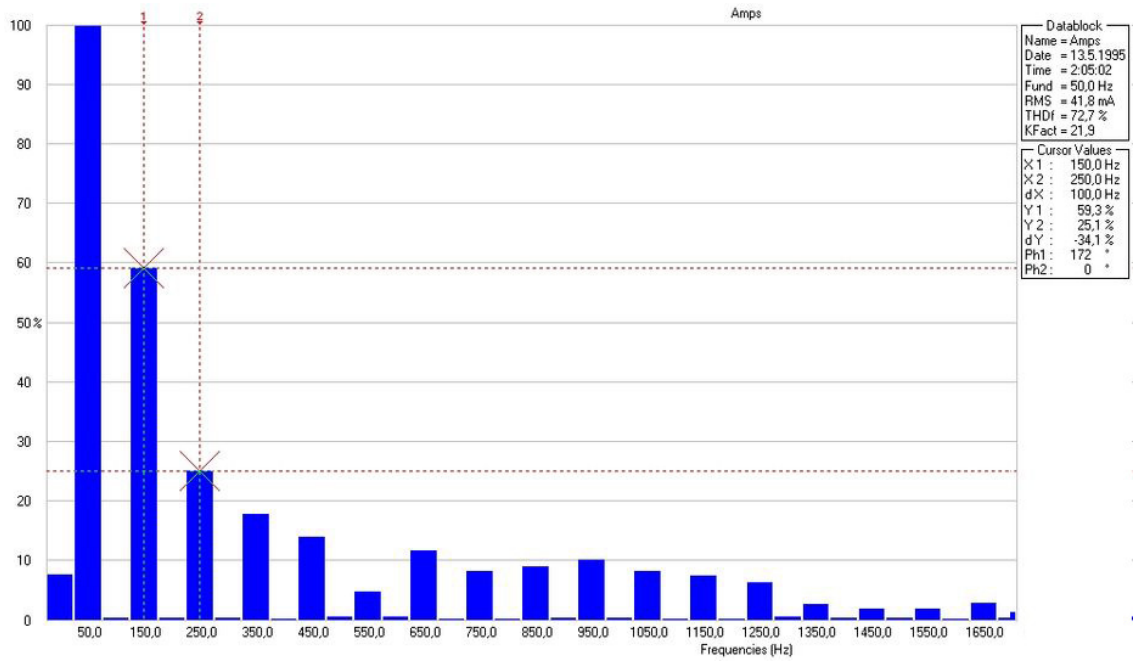


Virran ja jännitteen kuvaajat

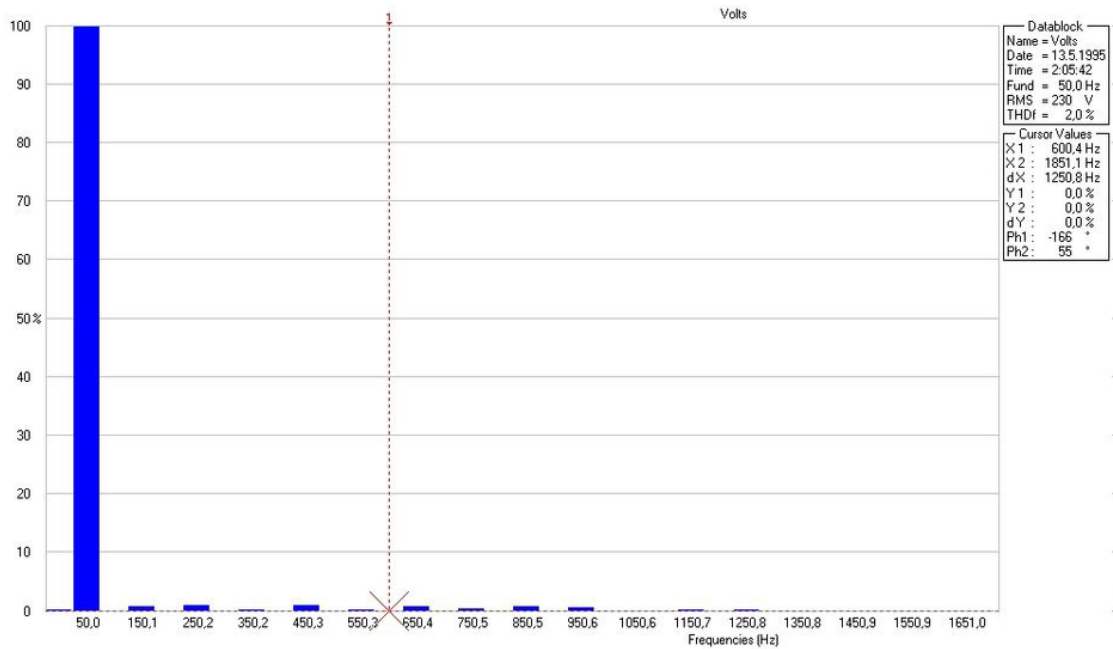


Philips LED 7 W

Virran spektri



Jännitteen spektri



Virran ja jännitteen kuvaajat

