

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tietotekniikan koulutusohjelma
Elektroniikka

Tutkintotyö

Juha Kulju

DC/AC VAIHTOSUUNTAAJAN KEHITYS

Työn ohjaaja TkT, Yliopettaja Matti Ilmonen
Tampere 2006
TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Tietotekniikan koulutusohjelma
Elektroniikan suuntautumisvaihtoehto
Kulju, Juha DC/AC Vaihtosuuntaajan kehitys
Tutkintotyö 55 sivua + 3 liitesivua
Tutkintotyön ohjaaja TkT., Yliopettaja Matti Ilmonen

TIIVISTELMÄ

Tutkintotyön aihe on vaihtosuuntaajan eli invertterin kehittäminen. Laitteiston kehittäminen lähti tarpeesta saada käyttöön luotettava ja käyttäjälleen turvallinen vaihtosuuntaaja. Kehitystyön pohjana oli toimiva vaihtosuuntaaja, mutta laitteessa olevien merkittävien puutteiden vuoksi sitä oli tarvetta kehittää. Työssä perehdytään vaihtosuuntaajaan, jonka toiminta perustuu 50 Hz:n siniaaltoa mukailevan kanttiaallon muodostamiseen kantataajuisella menetelmällä. Porrasmaisesti muuttuva ulostulojännite muodostetaan katkomalla tasajännitettä lähes samalla taajuudella kuin haluttu ulostulojännite on. Työn keskeisin tavoite on selvittää laitteessa esiintyvät tasajännitteen vaihtosuuntaamisesta johtuvat ongelmat ja toteuttaa kytkentään näitä asioita huomioivia parannuksia.

Kehityskohteena olevan vaihtosuuntaajan merkittävimmät puutteet tulivat esille pääasiassa alkuperäistä laitetta testattaessa. Laitetta kuormitettiin eritehoisilla ja erilaisilla verkkovirtalaitteilla. Testauksen aikana esiintyi ongelmia, jotka johtuivat alkuperäisen laitteen rakenteesta sekä lisäksi vaihtosuuntaajan ulostulolle ominaisista voimakkaista jännite- ja virtahuipuista. Laitteen suunnittelussa ei ollut lainkaan huomioitu kytkinkomponenttien ylikuormitusmahdollisuutta, eikä ongelmia, joita syntyy akun napajännitteen laskiessa kuormitustilanteessa. Lisäksi vaihtosuuntaajassa ei ollut mitään indikaattoria, joka olisi informoinut laitteen käyttäjälle vaihtosuuntaajaa kuormittavan laitteen kuormitusvirran suuruudesta tai vaihtosuuntaajan epätavallisesta toimintatilasta.

Vaihtosuuntaajan kehitystyö onnistui monelta osin hyvin. Monet tavoitteet tulivat saavutetuksi ja laitteen käytettävyys ja luotettavuus parani huomattavasti. Toteutetusta vaihtosuuntaajasta saatiin kehitetyksi melko suurta kuormitusta kestävä. Laitetta voidaan kuormittaa yhtäjaksoisesti maksimissaan n. 500 watin kuormalla. Mutta mitä syvällisemmin laitteen rakenteeseen ja toimintaan perehdyttiin, sitä runsaammin syntyi ideoita ja laitteiston kehittämiseen löytyi parannusvaihtoehtoja. Insinöörikoulutuksen tutkintotyöhön varatun ajan puitteissa on kuitenkin jossain vaiheessa tehtävä päätös, mihin työn lopulta rajaa. Tämän kehitysprojektin jälkeenkin laitteessa on edelleen parantamisen varaa, mutta pahimmat puutteet saatiin kyllä korjatuksi.

TAMPERE POLYTECHNIC

Computer system engineering

Electronics

Kulju, Juha

Development of the DC/AC power inverter

Engineering Thesis

55 pages + 3 appendicies

Thesis Supervisor

Dr. Tech., Dosent Matti Ilmonen

May 2006

Keywords

power inverter, inverter

ABSTRACT

The subject of this engineering thesis is the developing of a power inverter. Idea for this development work is to get a reliable and safe power inverter in use. Starting point of this work was an already working power inverter, but it still needs developing. The form of the output voltage of this device is a three-state rectangular wave. The output wave is supposed to be like 50 Hz sine wave. The meaning of this work is to find all problems, that arise from inverting the direct current and then to find solutions to these problems.

Major defects appeared while testing the power inverter. The inverter was tested with different types of loads and electrical devices. The properties of the power inverter are, that the output has high voltage and current peaks. These properties are the major cause of the problems.

Most of the goals were achieved. The usability and the reliability of the device got better than they were in the beginning. Some objects still remain to be developed in this power inverter device, but most of the defects have been removed.

ALKUSANAT

Haluan kiittää elektroniikkainsinööri Reijo Hautakangasta sekä tutkintotyön ohjaaja opettajaa Matti Ilmosta asiantuntija avusta, jota sain heiltä tämän insinöörityön eri vaiheissa. Lisäksi haluan kiittää vaimoani Elinaa kärsivällisyydestä ja kannustamisesta tutkintotyön raportin laatimisen aikana.

Tampereella 3.5.2006

Juha Kulju

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO	5
1 JOHDANTO	7
2 VAIHTOSUUNTAAJA	8
2.1 Vaihtosuuntaajan teholähde	9
2.2 Toteutetun vaihtosuuntaajan teholähde	9
2.3 Toteutetun vaihtosuuntaajan toimintaperiaate	10
2.4 Toteutetun laitteen toimintaperiaatteesta johtuvat ongelmat	11
2.5 Vaihtosuuntaajan ulostulojännite.....	12
2.6 Pulssinleveysmodulaatioon perustuvan vaihtosuuntaajan toimintaperiaate	13
3 KEHITYSTYÖN POHJANA OLEVAN VAIHTOSUUNTAAJAN RAKENNE	15
3.1 Eri kehittämiskohteiden kartoitus.....	18
3.2 Kuormitusvirran rajoittaminen.....	19
3.3 Ylijännitesuojaus.....	20
3.3.1 Kela vaihtovirtapiirissä.....	21
3.3.2 Ylijännitesuojaus	21
3.3.3 Suojakomponenttinvaihtoehtoja.....	22
3.4 Akun napajännitteen seuranta.....	23
4 KEHITTÄMISKOYTEIDEN SUUNNITTELU JA MITOITUS	25
4.1 Muuntaja	25
4.2 Kanavatransistorityypin valinta	28
4.3 Parannuskytkentöjen mitoitus.....	30
4.3.1 Virranrajoituspiirin mitoitus	30
4.3.2 Akkujännitteen valvonta.....	33
5 LAITTEEN TESTAUS, SUORITUSARVOT JA RAJOITUKSET	37
5.1 Toteutetun ja kaupallisen vaihtosuuntaajan kuormitustestit.....	37
5.2 Lämpötilan vaikutus toteutetun laitteen toimintaan	42
5.3 Merkittävimmät havainnot toteutetun laitteen testauksen aikana	42
5.3.1 Ylikuormitus	42
5.3.2 Akun napajännitteen aleneminen	43

5.3.3	Erityyppiset kuormat	44
6	YHTEENVETO	51
	LÄHTEET	54
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

Tämän tutkintotyön aiheena on DC/AC-vaihtosuuntaajan kehittäminen. Tällä vaihtosuuntaajalla eli invertterillä voidaan tuottaa 12 voltin akkujännitteestä 230 voltin ja 50Hz:n vaihtojännitettä. Kehitystyön pohjana oli toimiva vaihtosuuntaaja, mutta laitteessa esiintyi useita merkittäviä puutteita. Laitteen suunnittelussa oli käytetty oikoreittejä ja monet ylikuormitukseen ja komponenttien suojaukseen liittyvät asiat oli jätetty huomioimatta. Tämä johti kytkinkomponenttien hajoamiseen jo vähäisellä kuormalla kuormitettaessa ja joskus vaurioita saattoi tulla jopa kytkiessä laitetta päälle. Ongelmien ratkaisemiseksi oli laitteen toimintaperiaatteeseen siis perehdyttävä syvällisemmin. Aikomuksena oli hakea laitteelle toiminnallisesti perusvaihtoehto poistamalla laitteen toimintaa heikentäviä pahimpia epäkohtia helposti saatavissa olevilla komponenteilla ja materiaaleilla. Haasteellisuuksensa vuoksi laitteen kehitysprojekti on sopiva tutkintotyön aiheeksi.

Tarkoitus on ollut perehtyä vaihtosuuntaajan toimintaperiaatteeseen, jonka 50 Hz:n siniaaltoa mukaileva ulostulojännite muodostetaan kantataajuisella menetelmällä. Ulostulojännite tuotetaan siis katkomalla tasajännitettä lähes samalla taajuudella, kuin haluttu 50Hz:n ulostulojännite on. Lisäksi kehitystyön aikana oli tarkoitus pohtia eri vaihtoehtoja ja mahdollisuuksia kehittää laitteiston kuormituskestävyyttä, turvallisuutta ja toimintavarmuutta.

Toteutetun vaihtosuuntaajan potentiaaliset käyttökohteet ovat auto- ja vapaa-ajan käytössä eli paikoissa, joissa on vaikeaa tai jopa mahdotonta saada käyttöön 230 voltin vaihtojännitettä. Laite on kuitenkin suunniteltu käytettäväksi pääasiassa vain pienitehoisten sähkölaitteiden virtalähteenä. Tosin sillä voidaan lyhyitä aikoja käyttää melko tehokkaitakin sähkölaitteita. Yleisesti ottaen vaihtosuuntaajia käytetään monenlaisissa sovelluskohteissa. Vaihtosuuntaaja voi olla erillinen laite tai osana jotain suurempaa laitekokoonpanoa. Integroituna johonkin laitekokoonpanoon vaihtosuuntaajia käytetään muun muassa hitsauskoneissa, mutta ehkä yleisin sovelluskohde ovat varavirtalaitteet UPS (Unbreakable Power Supply).

2 VAIHTOSUUNTAAJA

Miksi tehdä vaihtosuuntaaja?

Useimmat kodin sähkölaitteet tarvitsevat toimiakseen verkkojännitteen. Vaihtosuuntaajan käyttötarve tuleekin yleensä esiin sellaisissa paikoissa, joissa ei ole helposti tai lainkaan saatavilla 230 voltin vaihtojännitettä. Jos ei ole mahdollista tai mielekästä tuottaa vaihtojännitettä polttomoottorigeneraattorilla (aggregaatti), niin on ryhdyttävä tuottamaan vaihtojännitettä vaikkapa vaihtosuuntaamalla tasajännitettä. Aggregaatin käyttö pienitehoisten laitteiden virtalähteenä ei yleensä ole kannattavaa, koska se on melko arvokas ja epäkäytännöllinen sisäkäyttöön esim. veneessä pakokaasupäästöjen ja lämmöntuotannon vuoksi.

Vaihtojännitteellä toimiville laitteille on olemassa hyvinkin tehokkaita vaihtosuuntaajia, mutta yleensä vaihtosuuntaajan käyttö tulee kyseeseen vain pienitehoisten vaihtosähkölaitteiden kohdalla (pienitehoinen mikroaaltouuni, matkatelevisio, kannettavat tietokoneet, matkapuhelimen ja cd-soittimen akkujen lataus). Syynä tähän on se, että invertteri saa yleensä aina käyttöjännitteensä (auton)akun kautta ja akku tyhjenee melko nopeasti jos kuormana on suuritehoinen laite. Verkkojännitteen saamiseksi esimerkiksi mökille verrattuna muihin mahdollisuuksiin, on vaihtosuuntaajan etuna sen helppo liikuteltavuus ja mahdollisuus käyttää laitetta suoraan auton akun kautta. Akkuja voidaan ladata mökkiolosuhteissa helposti autolla, jos pitää huolen, että ainakin yhdessä akussa on niin paljon virtaa, että auto lähtee vielä käyntiin.

On hyvinkin paljon laitteita, jotka toimivat suoraan esim. 12 voltin tasajännitteellä, mutta kuitenkin 230 voltin vaihtojännitteellä toimivat useimmat kodissa ja teollisuudessa käytettävät laitteet. Suomessa kotitalouksissa on käytössä 230VAC:n standardin jännite ja siksi markkinoilla olevat sähkölaitteet toimivat yleensä tällä jännitteellä. Lisäksi toinen kotitalouksia koskeva jännitestandardi on 380 voltin kolmivaihejännite. Kolmivaihejännitteellä toimivien laitteiden käyttämiselle tämäntyyppisen vaihtosuuntaajan avulla ei ole järjellisiä perusteita, koska

nämä laitteet ovat yleensä hyvin tehokkaita ja vaativat siksi toimiakseen huomattavasti enemmän virtaa kuin yksivaihelaitteet.

2.1 Vaihtosuuntaajan teholähde

Vaihtosuuntaaja saa virtansa akun kautta riippumatta siitä, onko se erillinen laite vai integroituna varavirtalaitteen sisälle. Akkutyypin määräytyy käyttökohteen perusteella. Jos vaihtosuuntaajaa käytetään usein ja kuormitetaan paljon, kannattaa virtalähteenä yleensä käyttää lyijyakua. Lyijyakulla on muihin akkutyyppeihin verrattuna huomattavasti paremmat virranluovutusominaisuudet, eikä akku ole kovin tarkka lataamistavasta. Useimmiten muita akkutyyppejä käytetään vain sellaisissa sovelluksissa, joissa akkua käytetään harvoin tai vain vähän aikaa (esim. UPS).

Varavirtalaite

Varavirtalaitteet tuottavat sähkökatkon ajan kuormittavalle laitteelle virtaa vaihtosuuntaajan kautta. Varavirtalaitteet ovat normaalisti kytkettyinä verkkovirtaan. Niiden sisällä olevan vaihtosuuntaajan virtalähteenä toimivan akun jännitettä ylläpidetään jatkuvasti pienellä latauksella. Käyttöjännite otetaan akusta ja UPS:ään kytketty laite saa normaalitilanteessa virtansa vaihtosuuntaajan kautta. Vaikka verkkovirta katkeaa, niin vaihtosuuntaaja jatkaa toimintaansa täysin katkottomasti. Sähkökatkon sattuessa akku pitää kuormittavan laitteen käynnissä sen aikaa, että esimerkiksi tietokoneen käyttäjä ehtii taltioida keskeneräiset työt ja valmistautua sähköjen katkeamiseen myös tietokoneesta.

2.2 Toteutetun vaihtosuuntaajan teholähde

Toteutetun vaihtosuuntaajan virtalähteenä on järkevintä käyttää lyijyakua, jos laitetta kuormitetaan edes toisinaan voimakkaasti. Laite on suunniteltu auto- ja vapaa-ajan käyttöön sekä käytettäväksi pitkään yhtäjaksoisesti. Vaihtosuuntaaja on mitoitettu 12 voltin jännitteelle, mutta se periaatteessa

toimisi pienten muutosten jälkeen myös 24 voltin jännitteellä. Lyijyakun yhden kennon jännite on 2 V, johtuen rakenteellisista ja valmistusteknisistä syistä. Akun napajännite on akun käyttötarkoituksen mukaan 12 tai 24 V. Kuorma-autoissa käytettävä 24 voltin jännite voisi sopia todella paljon virtaa vaativiin sovelluksiin. Jos jännite muutettaisiin kaksinkertaiseksi 12 voltista 24 volttiin, niin virta pienenee puoleen tehon pysyessä samana. Kahdentoista voltin jännitettä käytettäessä jo pienelläkin kuormalla ensiökäämissä kulkeva virta nousee huomattavan suureksi. Muuntajan keskipisteestä johtuen laitteen ensiökäämissä vaikuttava jännite nousee 24 volttiin eli kaksinkertaistuu. Jännitteen huippuarvo pysyy 12 voltissa eli akun napajännitteen tasolla, mutta huipusta-huippuun jännite kasvaa 24 volttiin.

Esimerkkitapaus

Vaihtosuuntaajan virtalähteenä käytetään 12V akkua. Jos laitteen ulostulossa, eli muuntajan toisiokäämissä on kuormana esim. 200W:n laite, niin käämissä kulkee silloin virta:

$$I = \frac{P}{U} \tag{1}$$
$$I = \frac{200W}{230V} = 0,9A$$

Ja samalla ensiökäämissä kulkeva virta on:

$$I = \frac{200W}{24V} = 8,3A$$

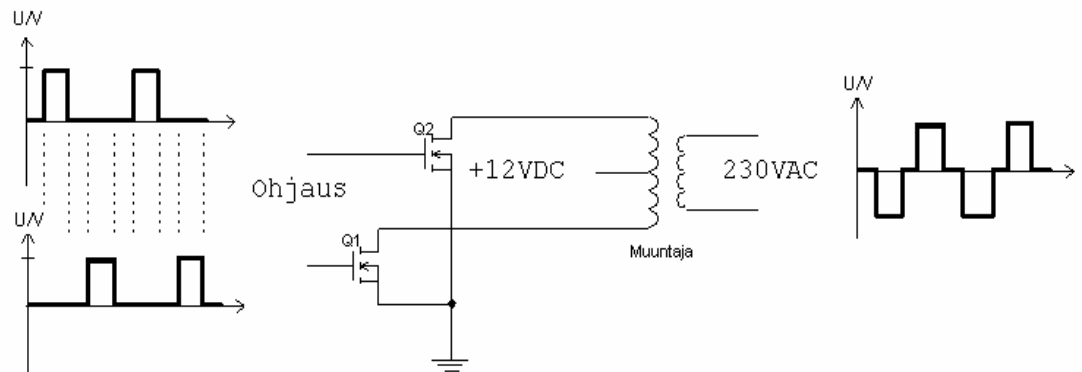
Jos akun jännite olisi 24V, niin samalla kuormalla ensiökäämissä kulkeva virta olisi vain:

$$I = \frac{200W}{48V} = 4,17A$$

2.3 Toteutetun vaihtosuuntaajan toimintaperiaate

Laitteen toimintaperiaate on yksinkertaistettuna seuraava: Akun positiivinen napa on kytketty muuntajan ensiökäämin keskipisteeseen. Ensiökäämin kumpikin pää on erotettu akun miinusnavasta N-tyypin avautuvalla kanavatransistorilla. Ohjainpiirillä ohjataan halutun ulostulosignaalin taajuudella vuorotellen kanavatransistoreja auki. Akun plusnapa kytkeytyy

miinusnapaan ensiökäämin puolikkaan kautta. Virran kytkentähetkellä synnyttää ensiökäämi magneettikentän muuntajan sydämeen. Magneettikentän suunta vaihtelee, kun kytketään vuorotellen ensiökäämin päitä miinusnapaan. Muuttuvan magneettikentän ansiosta indusoituu toisiokäämiin vaihtojännite. Kuvassa 1 on esitetty yksinkertaistettu kytkentä vaihtosuuntaajan rakenteesta sekä kanavatransistorien ohjausjännitteen ja ulostulojännitteen aaltomuoto.



Kuva 1. Periaatteellinen kuva kytkennästä ja aaltomuodosta

2.4 Toteutetun laitteen toimintaperiaatteesta johtuvat ongelmat

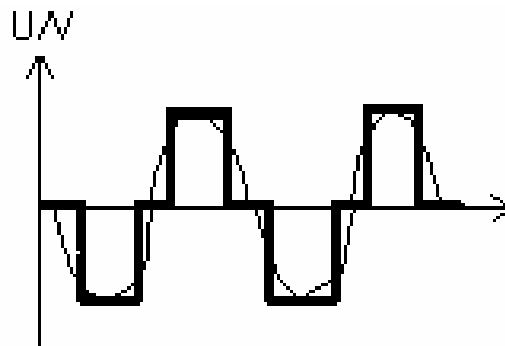
Vaihtosuuntaaja on melko yksinkertainen toteuttaa niin, että akkujännitettä katkotaan ulostulojännitteen taajuuden tahdissa. Merkittävin epäedullinen asia tällä toimintaperiaatteella toimivassa vaihtosuuntaajassa on, että tehopaino-suhde on melko huono. Vaihtosuuntaajan toimintaperiaatteesta johtuen vähänkään kuormitusta kestävä laite vaatii järeän muuntajan.

Toteutettu laite on mitoitettu siten, että sitä voitaisiin kuormittaa maksimissaan n.1kW:n kuormalla. Käytännössä kuitenkin laitteen maksimikuormitusvirta on rajoitettu siten, että laitetta voidaan kuormittaa 500-600W:n kuormalla. Laite painaa n.15kg ja mitat ovat 30x30x30 cm. Laitteen painavin osa on rengassydänmuuntaja, jonka osuus painosta on n. 10kg. Jos halutaan suurempaa kuormituskestävyyttä, niin muuntajan koko ja paino kasvavat huomattavasti. Juuri tästä syystä kaupallisissa

vaihtosuuntaajissa on nostettu tasajännitteen katkontataajuus huomattavasti lopullisen ulostulojännitteen taajuutta korkeammaksi. Kun taajuus on korkeampi, saadaan muuntajan fyysistä kokoa ja virtakestävyyttä pienennettyä huomattavasti.

2.5 Vaihtosuuntaajan ulostulojännite

Vaihtosuuntaajan tuottama aaltomuoto jäljittelee siniaaltoa (kuva 2). Kuvaan on hahmoteltu todellisen ulostulojännitteen päälle ohuemmalla viivalla saman taajuisia siniaaltoa.



Kuva 2. Vaihtosuuntaajan ulostulojännite

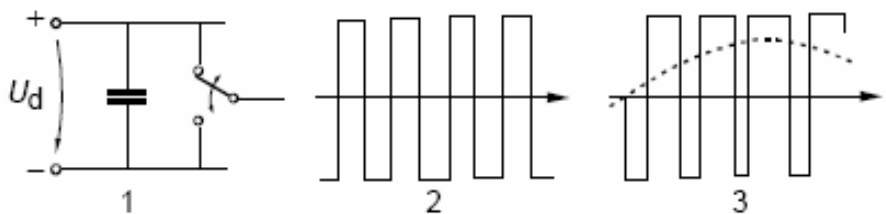
Kulmikas aaltomuoto aiheuttaa sen, että nopeat jännitteenmuutokset synnyttävät korkeataajuisia häiriöitä ja lisäksi laitteen syöttämä jännite saattaa aiheuttaa herkille laitteille häiritsevää hurinaa. Useimmiten tällaisia laitteita ovat radio- ja televisiovastaanottimet sekä yleensä herkäät elektroniikkalaitteet. Tietokoneissa on niin hyvin toteutettu häiriönsuodatus, että niiden toiminnassa ei ole mitään ongelmia. On kuitenkin hyvä, että useiden laitteiden toiminnan kannalta on melko yhdentekevää, millaista käyttöjännite on. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi valaisimet, lämmityslaitteet jne. Laitteet toimivat ulostulojännitteen tehollisarvolla eli niille ei merkitse juuri mitään jännitteen muotoa, vaan sen tehollisarvo. Vaihtojännitteen ja -virran tehollisarvot ovat yhtä suuret kuin tasajännite ja -virta, jotka aiheuttavat saman tehohäviön kuormassa kuin tutkittava vaihtovirta. /1, s. 274/

Monissa laitteissa sisään menevä 230V:n vaihtojännite tasasuunnataan, reguloidaan ja syötetään vasta sitten kuormittavalle laitteelle. Tällöin häiriöt suodattuvat melko hyvin pois. Lisäksi useimmissa sähköisille häiriöille herkissä laitteissa on niin hyvä suodatus, ettei vaihtosuuntaajan särmikäs ulostulojännite tuota ongelmia. Markkinoilla myynnissä olevat kalliimmat vaihtosuuntaajat tuottavat lähes puhdasta siniaaltoa. Ulostulojännitteen muodostaminen ei kuitenkaan tapahdu toteutetun vaihtosuuntaajan toimintaperiaatteen mukaisesti, vaan laitteissa tuotetaan ulostulojännitteen muoto pulssinleveys tekniikalla. Lisäksi näissä laitteissa on tasajännitteen katkontataajuus huomattavasti lopullisen ulostulojännitteen taajuutta korkeampi. Tällä menetelmällä saadaan myös muuntajan fyysistä kokoa pienennettyä huomattavasti.

2.6 Pulssinleveysmodulaation perustuvan vaihtosuuntaajan toimintaperiaate

Laitteessa on pulssinleveysmodulaattori, jonka avulla muutetaan ulostulojännitteen tasoa. Kuva 3 havainnollistaa pulssinleveysmodulaation perustuvan vaihtosuuntaajan toimintaperiaatetta.

Invertterin vaihtokytkinmalli



Kuva 3. laitteen kytkinmalli (1), lähdön potentiaali pulssisuhteella 1:1 (2) ja sinimoduloitu lähdön potentiaali (3).

Kun moduloivan signaalin positiivisen puolijakson pulssinleveys on maksimissaan, niin ulostulojännitteen taso on korkeimmillaan (kuva 3(3)). Negatiivisella puolijaksolla vastaavasti ulostulojännitteen taso on alimmillaan, kun moduloivan jännitteen negatiivinen jännite on maksimissaan.

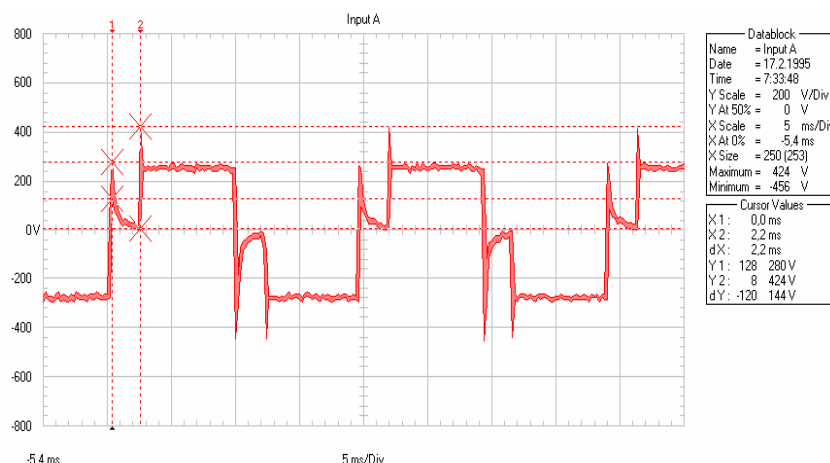
Kuvasta 3(1) nähdään, että invertteri on itse asiassa vaihtokytkin, jolla lähtö voidaan kytkeä joko tasajännitelähteen plus - tai miinusnapaan. Tasajännitelähde on pieni-impedanssinen, joten kytkimen asento määrää yksikäsitteisesti vaiheen lähdön potentiaalin. Invertterin toiminta perustuu siihen, että kytkinmallissa vaihtokytkintä käännetään suurehkolla taajuudella (tyypillisesti ~ 1 kHz) edestakaisin. Tätä taajuutta nimitetään kytkentätaajuudeksi. Jos vaihtokytkin on yhtä kauan ylä- ja ala-asennossa, on vaiheen lähtö keskimäärin tasajännitelähteen keskipisteen potentiaalissa (kuva 3(2)). Tällöin pulssisuhde on 1:1. Antamalla pulssisuhteelle eri arvoja voidaan lähtöjännitteen potentiaalia asetella. Normaalisti invertterissä pulssisuhdetta moduloidaan halutulla lähtötaajuudella (kuva 3(1)). Tästä johtuu nimitys pulssinleveysmodulaatio, Pulse Width Modulation, PWM. /3, s.

16./

3 KEHITYSTYÖN POHJANA OLEVAN VAIHTOSUUNTAAJAN RAKENNE

Kytkäkaavio laitteen kokoonpanosta lähtötilanteessa on liitteenä. (Liite 1). Lisäksi liitteenä on kytkentäkaavio kehitystyön jälkeisestä tilanteesta (liite 2) ja prototyypilaitteen valokuvat. (Liite 3) Laitteen ytimenä eli ohjainpiirinä on tyypiltään SG3524, hakkurikytkentöihin suunniteltu mikropiiri. Piiri ohjaa vuorotellen aktiiviseksi kahta ulostuloa. Ulostulojen aktiivisena oloaika voidaan säätää niin, että on hetki, jolloin kumpikaan ulostuloista ei ole aktiivisena. Periaatteessa puolijakson pulssisuhde tulisi säätää 50 prosenttiin, jotta saataisiin ulostulojännitteen muoto mahdollisimman lähelle siniaaltoa. Pulssisuhdetta muuttamalla voidaan säätää ulostulojännitteen tehollisarvoa. Tehollisarvoa voidaan ajatella pinta-alana, jonka jännitepulssi muodostaa noustessaan aktiiviseksi ja taas laskiessaan nollatasoon. Kanavatransistorien lepoaika on myös siksi välttämätön, että kytkinkomponentit eivät kestäisi, jos toinen alkaisi johtaa heti, kun toinen sammuu. Kytkimet aukeavat ja sulkeutuvat silmänräpäyksessä, mutta kelassa oleva virta ei käyttydy siten. Muuntajassa kulkevalle virralle ja magneettikentälle on annettava hetki aikaa vaimentua.

Kuvassa 4 on esitetty vaihtosuuntaajan ulostulojännitteen muoto, kun laitetta ei kuormiteta. Koska tehoa ei mene yhtään kuormaan, niin kuvasta näkyvät selvästi muuntajan induktanssista aiheutuvat jännitepiikit. Tämän jännitehuipun aikana muuntaja syöttää virtaa takaisin akkuun kanavatransistorien rinnalla olevien suojadiodien kautta.



Kuva 4. Vaihtosuuntaajan ulostulojännite

Ulostulojännitteen taajuus

Ulostulojen värähtelytaajuus muodostetaan kytkennässä RC-aikavakiopiirillä. Kytkenässä on kondensaattori C_t ja vastus R_t . Kondensaattori C_t purkautuu vastuksen R_t kautta ja saa aikaan värähtelyn, jonka tahtiin ohjainpiiri ohjaa ulostuloja. Värähtelytaajuutta voidaan säätää vastuksen R_t kanssa sarjaan kytketyllä potentiometrillä. Värähtelytaajuus lasketaan kaavalla (2) /4, s. 4/ :

$$\tau = R_t \cdot C_t \quad , \text{jossa} \quad (2)$$

$$\tau = \mu s$$

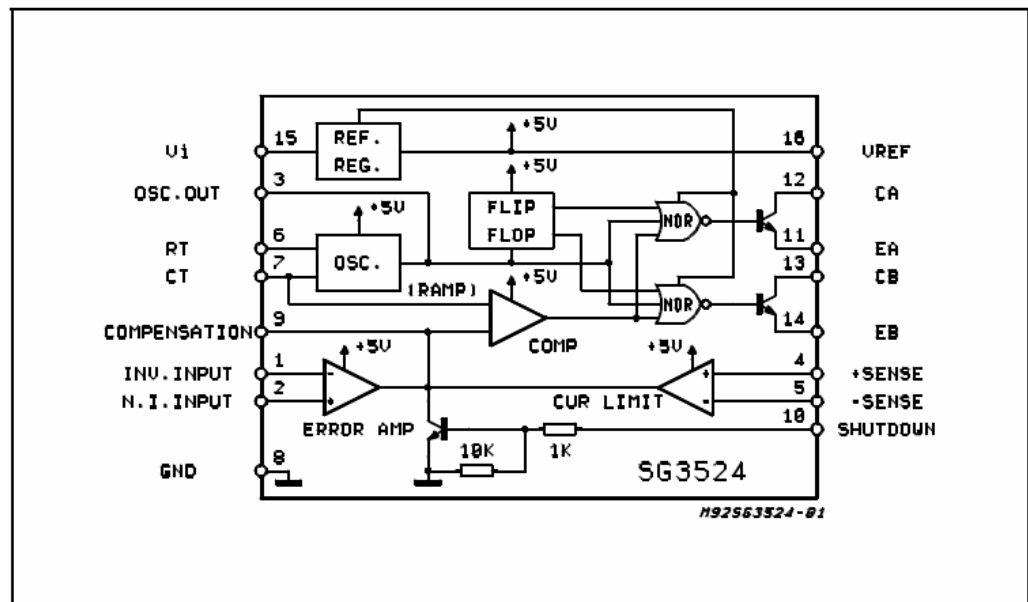
$$R_t = \Omega$$

$$C_t = \mu F$$

Kaavalla 2 saadaan kytkennän komponenteilla $R_t = 100\text{-}200\text{K}\Omega$ ja $C_t = 100\text{nF}$ laskettua aikavakioksi 10-20 ms eli taajuus on 50-100Hz. Aikavakion synnyttämää pulssisignaalia käytetään ohjaamaan ohjainpiirin sisäistä oskillaattoria ja komparaattoria. Pulssi-signaali toimii tahdistussignaalina oskillaattorille, jolla varmistetaan, ettei molempia ulostuloja voida ohjata auki yhtä aikaa. Piirin sisäinen komparaattori saa pulssi-signaalista tahdistuksen ulostulojen odotusaikaa varten. Kondensaattorin C_t arvolle on myös olemassa rajat, koska kondensaattorin purkautumisaika määrää oskillaattorin ulostulopulssin leveyden. Jos pulssinleveys laskee alle $0,5 \mu s$, saattaa syntyä epätahdistusta ulostulossa ennen kuin kiikku ehtii asettua stabiiliin tilaan. /4, s. 4./

Ohjainpiirin sisäinen rakenne

BLOCK DIAGRAM



Kuva 5. Piirin SG3254 sisäinen rakenne

Piirin sisällä oleva oskillaattori ohjaa kiikun kautta (flip-flop) NOR-portteja.

NOR-porteille tulee ohjaus myös komparaattorilta, joka mittaa piirin nastan 9 tasoa. Nastan 9 kautta käytetään piirin shutdown-toimintoa.

Komparaattorin ulostulo ohjautuu 5 volttiin 9 nastan jännitetason ollessa lähellä nollaa. Komparaattorilla saadaan näin sammutettua tarvittaessa ulostulot. NOR-portti ohjaa ulostulon auki, kun kaikissa sen sisäänmenoissa on nollaa vastaava tila.

Piirin nastat 11 ja 14 ovat ulostuloja. Fettien ohjausjännite kytkeytyy näihin ulostuloihin nastojen 12 ja 13 kautta kun ulostuloissa ovat

kytkintransistorit saavat ohjauksen. Ulostulot on kytketty jännitteenjakokytkennän kautta kanavatransistorien hiloille.

Kanavatransistorit ovat N-tyyppin mosfettejä eli niiden hilalle annetaan positiivinen ohjaus. Kun kytkinfetit ohjataan auki-tilaan, niin silloin niiden hiloilla on n.10 voltin jännite.

Kytkinkomponentit

Kytkinfettien drain(nielusta) otetaan takaisinkytkentä ohjainpiirille. Takaisinkytkentäsignaali menee diodisillan läpi, joka leikkaa pois kaikki negatiiviset jännitteet. Takaisinkytkentäjännite kytkeytyy säädettävän regulaattorin adjust-nastaan. Regulaattorin adjust-nastassa on n. 25 voltin jännite laitteen toimiessa normaalisti. (Regulaattori on tässä kytketty hyvin erikoisesti, mutta laite toimii silti). Lisäksi takaisinkytkentäjännitettä mitataan ohjainpiirin sisäisen erovahvistimen invertoivalla sisäänmenolla. Saman erovahvistimen ei-invertoivan sisäänmenon potentiaalia säädetään maita vasten olevalla potentiometrillä. Tällä potentiometrillä voidaan säätää ulostulojännitteen pulssinleveyttä. Erovahvistimen ulostulo kytkeytyy nastaan 9. Jos invertoivassa sisäänmenossa jännite on ei-invertoivan sisäänmenon potentiaalia korkeampi, niin erovahvistin sammuttaa ulostulot. Mitä pienempi potentiaali on ei-invertoivassa sisäänmenossa, sitä suuremmaksi saa jännite nousta ulostulossa.

3.1 Eri kehittämiskohteiden kartoitus

Laitteessa on ennen muutoksia selkeästi havaittavissa kolme välttämättä kehitettävää kohdetta: Kuormitusvirtaa on pystyttävä rajoittamaan, sekä laitteeseen on saatava yli- ja alijännitesuojaus.

Kuormitusvirran rajoittaminen

Maksimi kuormitusvirta on pystyttävä rajoittamaan riittävän pieneksi, ettei kytkinkomponenttien kanavan virrankesto ylity. Testauksessa havaittiin, että laitetta voi kuormittaa miten paljon tahansa aina siihen asti kunnes fettien virrankesto tulee vastaan ja ne tuhoutuvat.

Ylijännitesuojaus

Kytkinkomponenteille on saatava riittävän hyvä ylijännitesuojaus, koska katkottaessa kelassa kulkevaa virtaa, syntyy korkeatasoisia jännitepiikkejä. Lisäksi kuorman kytkeminen ja irrottaminen sekä erityisesti induktiivinen kuorma aiheuttaa hetkellisiä jännitepiikkejä. Fettien kanavan läpilyöntijännite on sen rakenteesta johtuen melko pieni. Melko suurta virtaa kestävässä feteissä jännitekesto on tyypillisesti vain n.100 V.

Alijännitesuojaus

Testauksessa havaittiin, että laitetta kuormitettaessa voimakkaasti ja akun varaustason ollessa alhainen alkaa akun napajännite laskea. Laitteen kytkentä on suunniteltu sellaiseksi, että se pyrkii pitämään ulostulojännitteen tehollisarvon vakiona, vaikka syöttöjännite laskisikin. Kytkentä tekee sen pidentämällä kytkinkomponenttien päälläolo aikaa. Tämä johtaa siihen, että fettien ohjauksen lepoalue kapenee ja lopulta sitä ei ole lainkaan. Eri puolien fetit alkavat ohjautua yhtä aikaa auki ja lopulta piirikortin sulake palaa. Kytkennässä on kyllä huomioitu tämä asia, mutta ominaisuus ei kuitenkaan toiminut.

3.2 Kuormitusvirran rajoittaminen

Akuilla yleensä ja erityisesti lyijyakulla on hyvin pieni sisäinen resistanssi. Koska sisäisiä häviöitä akussa ei juuri ole, niin akku voi syöttää kuormaan hyvinkin suuria virtoja. Jos akkuun kytketään pieniresistanssinen kuorma eli kytketään akku lähes oikosulkuun, niin voi esimerkiksi auton akku antaa virtaa helposti useitakin satoja ampeereita. Muuntajan ensiökäämissä on vain 13 kierrosta paksua kaapelia, jonka resistanssi metriä kohden on joitakin ohmin sadasosia. Koska käämin voidaan ajatella olevan lähes oikosulku, niin voidaan vain kuvitella, mitä tapahtuukaan jos kuormittava laite muodostaa rikkoutuessaan oikosulun. Jos ensiökäämin virtaa ei

rajoiteta millään tavalla, se aiheuttaa välittömästi ylikuormitustilanteen kytkinkomponenteille.

Virranrajoituskytkennän kehittäminen on laitteen käytettävyyden kannalta välttämättömyys. Ei voida olettaa, että laitteen käyttäjä tietää aina kuorman suuruuden ja minkä tyyppisenä kuormana vaihtosuuntaaja näkee kuorman. Lisäksi kuormittavassa laitteessa tapahtuva mahdollinen vikatilanne voi aiheuttaa ylikuormitusta. On myös mahdollista, että vaihtosuuntaajan käyttäjä kytkee ulostulon vahingossa jollain tavalla oikosulkuun. Kuormitusvirrasta kertova mittari olisi ehkä syytä kytkeä myös laitteeseen. Vaihtosuuntaajan käyttäjän on hyvin tärkeitä tietää, kuinka paljon hänen käyttämänsä laite kuormittaa akkua.

Virranrajoituspiirin kytkentätapaan sain apua eräältä työpaikallani olevalta elektroniikkasuunnittelijalta. Totesimme, että paras tapa virranrajoitukseen on ottaa käyttöön piirin sisään kytketty komparaattori. Kytkentä- ja mitoitus esimerkki löytyi ohjainpiirin datalehdeltä. /4, s. 5./ Kuormitusvirtaa voidaan rajoittaa näin melko yksinkertaisella kytkennällä. Tämän vaihtosuuntaajan suunnittelijalta on jostain syystä jäänyt tämä mahdollisuus huomioimatta. Periaatteessa virranrajoituspiiri voitaisiin tehdä myös erillisellä komparaattorilla soveltaen samaa ideaa, joka on kyseisen datalehden kytkentäesimerkissä. Komparaattorilla mitattaisiin virranmittausvastuksessa syntyvää jännitehäviötä ja kun se kasvaisi riittävän suureksi, niin katkaistaisiin kytkinkomponenttien ohjaus.

3.3 Ylijännitesuojaus

Laitteen kehitystyön aikana huomattiin konkreettisesti ylijännitepiikkien huomioimisen tärkeys. Jo laitteen testausvaiheessa tuhoutui useita kanavatransistoreita ennen kuin havaittiin, mikä niiden tuhoutumisen todella aiheuttaa. Syyksi osoittautuivat muuntajassa syntyvät korkeat jännitehuiput. Laitteen toimintaperiaate on sellainen, että ensiökäämissä kulkevaa virtaa katkotaan jatkuvasti ja tämä saa aikaan muuntajassa voimakkaita

jännitepiikkejä. Lisäksi erityisesti induktiivinen kuorma sekä kuorman kytkeminen ja irrottaminen lisäsivät jännitehuippujen muodostumista.

3.3.1 Kela vaihtovirtapiirissä

Kelan ominaisuus virtapiirissä on sellainen, että se vastustaa virran muutosta. Kun kelassa kulkeva virta katkaistaan äkisti, niin se pyrkii jatkamaan kulkuaan edelleen. Koska virta ei voi kulkea virtapiirin ollessa avoin, niin kelaan varastoitunut energia pyrkii nostamaan jännitettä. Mitä suurempi virta kelassa kulkee katkaisemishetkellä, sitä voimakkaammin jännite nousee.

Esimerkkitapaus

Kuormitettaessa vaihtosuuntaajaa 600 watin sähkölaitteella, niin virta ensiökäämissä laskettuna kaavalla 1 on:

$$I = \frac{600W}{24V} = 25A$$

Kun nyt ensiökäämissä kulkeva 25A:n virta katkaistaan nopeasti, niin jännitepiikit, jotka syntyvät ovat hyvin voimakkaita. Alkuperäisessä laitekoonpanossa on tämä asia huomioitu siten, että fettien rinnalle nielusta maihin on kytketty nopeat diodit. Lisäksi komponenttivalmistaja on huomioinut fettien läpilyöntikestoisuutta siten, että fettien sisään on integroitu estosuuntainen diodi, jolla on sama käyttötarkoitus. Käytännön testit osoittivat tämän suojauksen kuitenkin riittämättömäksi.

3.3.2 Ylijännitesuojaus

Ylijännitepiikkien poisto on laitteen käytettävyyden ja toimivuuden kannalta välttämätöntä. Vaikka on saatavilla suurtakin virtaa kestäviä kanavatransistoreita, niin tämäntyyppisissä laitteissa tulee usein kuitenkin vastaan transistorin jännitekesto. Komponentti on pystyttävä suojaamaan

niin hyvin, että läpilyöntijännitekesto ei koskaan ylity. Kanavatransistorit ovat melko arvokkaita komponentteja ja myös siksi on tärkeää että ne säilyvät ehjinä.

3.3.3 Suojakomponenttivalintoja

Zener-diodi

Kokeilumielessä käytettiin paria eri kynnyksjännitteen omaavia zener-diodeja kanavatransistorien ylijännitesuojina. Aluksi kokeiltiin 18 voltin zener-diodeja, mutta pian huomattiin, että jännite jätti yli onkin n. 25 V, joten komponentti ei voinutkaan toimia. Syöttävä 12 voltin jännite kaksinkertaistuu muuntajan ansiosta, joten huipusta-huippuun jännite on n.25V. Seuraavaksi käytettiin suojana 30 voltin zener-diodeja, mutta komponentin jännitekesto ei ollut riittävä ja komponentit tuhoutuivat. Olisi tietenkin voinut käyttää vielä suurempaa kynnyksjännitettä omaavia zener-diodeja suojaukseen, mutta tässä vaiheessa kuitenkin päätettiin testata jotain muuta.

Ylijännitesuoja

Bebek Elektroniksista hankittiin ylijännitesuojaksi tyypiltään SB360 olevia transienttizener-diodeja. Komponentilla on estosuunnassa 60 voltin kynnyksjännite, jolloin se alkaa johtaa. Virtakesto komponentilla on 3A. Käytännön testeissä tämä komponenttityyppi havaittiin parhaimmaksi suojakomponentiksi juuri tässä käyttökohteessa.

Schottky-diodi

Schottky-diodeja käytetään usein ”damperi”-diodeina eli suojakomponentteina televisioiden kuvaputkissa. Kytkennässä on nyt BY229-tyyppiset diodit tranzorb-diodien rinnalla kytkinkomponenttien suojana.

Varistori

Varistori eli VDR (voltage dependent resistor) on jännitteestä riippuva vastus. Varistorin resistanssi kasvaa sen yli olevan jännitteen noustessa. Jännite virran funktiona on muotoa:

$$U = kI^\beta$$

missä k ja β ovat materiaalista ja valmistusprosessista riippuvia parametreja. Kuten kaavasta voi päätellä, niin varistori on hyvin epälineaarinen komponentti /2, s. 70./ Laitteen kehitystyössä oli tarkoitus kokeilla myös tämän suojakomponentin toimivuutta, mutta se jäi tekemättä varistorien huonon saatavuuden vuoksi.

3.4 Akun napajännitteen seuranta

Kun vaihtosuuntaajaa kuormitetaan voimakkaasti, niin tehollähteenä toimivan akun napajännite laskee jonkin verran. Akun kapasiteetti, kunto ja kuormituksen suuruus määräävät kuinka paljon jännite kuormitustilanteessa laskee. Joka tapauksessa kuormitettaessa akku tyhjenee ja akun ollessa lähes tyhjä, napajännite alkaa laskea voimakkaasti. Laitteen pitäisi siis reagoida akun napajännitteen laskemiseen ja lopettaa toimintansa hyvissä ajoin ennen kuin akku tyhjenee kokonaan. Syväpurkaus ei ole akulle hyväksi ja varsinkin talviolosuhteissa se voi olla akulle kohtalokasta. Kun lyijyakku on aivan tyhjä, sen sisältämä neste on muuttunut vedeksi. Jos laitetta käytetään pakkasolosuhteissa, voi akku tällöin jäättyä käyttökelvottomaksi.

Toteutetulla vaihtosuuntaaja -kytkennällä on sellainen ominaisuus, että se pyrkii pitämään ulostulojännitteen tehollisarvon vakiona. Akun napajännitteen laskiessa se yrittää pitää tehollisarvon suuruutta vakiona kasvattamalla kytkinkomponenttien aktiivisenaoloaika. Testauksessa havaittiin, että akun napajännitteen laskiessa alkoi fettien lepoalue pienentyä ja ulostulojännitteen amplitudi laskea. Lepoalue pienentyi

vähitellen ja lopulta sitä ei ollut enää lainkaan. Laitetta edelleen kuormitettaessa fetit ohjautuivat jo yhtäaikaan auki ja silloin yleensä tuhoutui jotain, jollei muuta niin ainakin piirikortin sulake.

Toimenpiteet ongelman ratkaisemiseksi

Kytkenässä on huomioitu akun napajännitteen mahdollinen laskeminen kytkemällä piiriin operaatiovahvistimia, jotka on kytketty vertailemaan eri jännitetasoja. Operaatiovahvistimille on aseteltu jännitteet siten, että ne antavat ohjauksen ohjainpiiriin shtdwn –nastaa, kun akkujännite laskee liiaksi. Testauksessa kuitenkin havaittiin, että napajännitteen tulisi laskea todella alas (8 volttiin) ennen kuin ohjainpiiri sammuttaa ulostulot. Kytkentää tulee hieman muuttaa, siten että fettien ohjaus saadaan sammumaan jo akun jännitteen laskiessa alle 10 voltin. Kytkentään olisi hyvä saada myös sellainen toiminto, että alijännitepiirin toimiessa piiri lukkiutuu päälle ja laite lähtee toimimaan kunnes käyttäjä kuittaa alijännitepiirin painikkeesta tai irrottaa akun ja kytkee varatun akun laitteeseen. Käytännössä vika on yhden jännitteenjaon mitoituksessa.

4 KEHITTÄMISKOHTEIDEN SUUNNITTELU JA MITOITUS

Tässä luvussa käsitellään vaihtosuuntaajakytkennän eri epäkohtien uudelleenmitoitusta ja parantamista. Lisäksi kappaleessa käsitellään kytkennän eri osa-alueiden mitoituksen perusteita ja menetelmiä miten asiat on suoritettu sekä teoriaa eri kohteiden mitoitukseen.

4.1 Muuntaja

Jotta laite saadaan mitoitettua mahdollisimman hyväksi tehotaloudellisesti, on kiinnitettävä erityistä huomioita muuntajan mitoitukseen. Muuntajan hyötysuhde vaikuttaa suoraan koko kytkennän hyötysuhteeseen. Ja todellisuudessa muuntaja on oikeastaan suurin siihen vaikuttava yksittäinen tekijä. Muuntajassa jännitteen ja käämien kierrosten perusteoria on seuraava:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}, \text{ jossa} \quad (3)$$

U_1 =ensiökäämin jännite

U_2 =toisiökäämin jännite

N_1 =ensiökäämin kierrosmäärä

N_2 =toisiökäämin kierrosmäärä

Ideaalisessa muuntajassa, joka ei kuluta tehoa voidaan ajatella, että

$U_1 I_1 = U_2 I_2$, josta saadaan virtojen muuntosuhteelle:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}, \text{ jossa} \quad (4)$$

I_1 =ensiökäämissä kulkeva virta

I_2 =toisiökäämissä kulkeva virta

”Todellisuudessa muuntajissa tapahtuu tehohäviöitä resistanssien, pyörrevirtojen ja hystereesi-ilmiön takia. Pyörrevirtojen vähentämiseksi rautasydämiset muuntajat tehdään ohuista levyistä. Hystereesi-ilmiön vähentämiseksi muuntajat tehdään magneettisesti pehmeistä aineista. Näin

muuntajissa päästään selvästi yli 99% hyötysuhteeseen. Suhteellisen pienestäkin hukkatehosta johtuen muuntajat lämpenevät, joten niille on järjestettävä riittävä jäähdytys.” /1, s. 51./

Muuntajan vaatimukset

Vaihtosuuntaajan muuntajan ominaisuuksille on seuraavat vaatimukset. Ensiökäämissä on oltava keskipiste, ja kun muuntajan ensiökäämin puolikkaassa on n. 10,5 voltin vaihtojännite, niin toisiokäämiin indusoituu 230VAC. Muuntosuhde on tällöin n.1/23.

Laitteen toimintaperiaatteesta johtuen muuntajan ensiökäämin on oltava huomattavan suurta virtaa kestävä. Suurilla virroilla alkaa pienikin johtimen resistanssi aiheuttaa jännitehäviöitä. Tämä heikentää laitteen hyötysuhdetta, koska teho alkaa muuttua lämmöksi jännitehäviöissä. Kun halutaan, että jännitehäviöt pysyvät kurissa, on silloin joko kasvatettava johtimen poikkipinta-alaa tai käytettävä johtimia, joiden materiaalilla on pieni resistanssi. Yleisesti muuntajissa käytetään kuparia, koska sen johtavuus on hyvä ja sen hankintahinta on kuitenkin kohtuullinen.

Muuntajan mitoitus

Toteutetussa vaihtosuuntaajassa käytetty rengassydänmuuntaja on purettu vanhasta UPS -laitteesta. Käytöstä poistettu varavirtalaite oli ollut melko tehokas ja siinä käytetty muuntaja oli myös järeä. Koska oli tarkoitus saada toteutettua sellainen vaihtosuuntaaja, jota voisi tarvittaessa kuormittaa jopa 1KW:n kuormalla, niin vanha järeä muuntaja oli oikein sopiva aihio tähän käyttötarkoitukseen. Muuntaja oli kuitenkin mitoitettu eri jännitteille, eikä ensiökäämissä ollut käytetty keskipistettä.

Muuntajassa ei ollut kerrottu mitään arvoja, joten ne piti selvittää itse. Muuntajan toisiokäämiin kytkettiin suoraan verkkojännite ja mitattiin ensiökäämin jännite. Koska rengassydänmuuntajan ensiökäämi oli

päällimmäisenä, niin käämin kierrosten lukumäärä saatiin laskettua helposti. Ensiökäämin kierrosten ja siitä mitatun jännitteen avulla saatiin laskettua toisiokäämin kierrokset. Toisiokäämissä oli n.285 kierrosta. Kaavalla 3 toisiokäämin kierrosten ja käämien jännitteiden avulla voitiin laskea ensiökäämiin tarvittava kierrosmäärä.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{10,5V}{230V} = \frac{X}{285}$$

$$230X = 2992,5$$

$$X = \frac{2992,5}{230}$$

$$X = 13$$

Toisiokäämin haluttu 230 voltin jännite saavutetaan, kun ensiökäämissä on 13 kierrosta.

Muuntajan käämiminen

Aluksi vanha 4 mm² kuparikäämistä käämitty ensiökäämi poistettiin muuntajasta. Käämi olisi kyllä poikkipinta-alansa perusteella riittänyt melko tehokkaaseenkin kuormitukseen, mutta käämin keskipisteen puuttuminen johti uudelleen käämintään. On hyvin tärkeää, että ensiökäämi on symmetrinen, koska epäsymmetrisyys aiheuttaa ongelmia ohjauselektroniikan kanssa. Symmetrinen ensiökäämi tehtiin kiertämällä ensiökäämin molempien puoliskojen kaapeli parina rengassydämen ympärille, jolloin käämin puoliskoista tuli riittävän tarkasti samanpituiset (Kuva 6).



Kuva 6 Muuntaja

Koska puretusta kuparikäämistä uudelleen käämiminen olisi ollut todella työlästä, eikä 4 mm käämi ole kovin taipuisaa, niin oli löydettävä korvaava vaihtoehto. Käämin valinnassa päädyttiin monisäikeiseen 16 mm² kaapeliin, koska se on valmiiksi eristettyä, sitä saa ostettua pitkiäkin yhtenäisiä pätkiä ja toisaalta sitä on taipuisana todella helppo käsitellä.

4.2 Kanavatransistorityypin valinta

Markkinoilla on saatavilla suuriakin virtoja kestäviä kanavatransistoreja, mutta jännitekestossa on usein toivomisen varaa. Vaihtosuuntaajan kaltaisissa sovelluksissa on todellakin kiinnitettävä huomiota komponentin jännitekesto. Kun virtapiirissä on kela ja virtaa katkotaan, silloin vaaditaan yleensä puolijohdekomponentilta myös huomattavan suurta jännitekestoisuutta. Jännitekestoisuus onkin virtakestoisuuden ohella fetin tärkeimpiä ominaisuuksia.

Kanavatransistorityypin valinta

Vaihtosuuntaajan testauksessa käytettiin useita erityyppisiä kanavatransistoreita. Yhdessä mallilaitteessa oli käytetty tyypiltään IRLS530A-tyyppisiä fettejä. Kyseinen komponenttityyppi kestää jatkuvaa virtaa maksimissaan 10,7 A. Komponentilla on melko pieni virtakestoisuus, mutta drain-to-source jännite saa olla 100V. Komponentin melko pienen virtakestoisuuden ja huonon saatavuuden vuoksi testilaitteeseen kytkettiin BUK-555 tyyppiset kanavatransistorit. Virtakestoisuus tällä komponenttityypillä on IRLS530A -tyyppiin verrattuna huomattavasti suurempi, nimittäin 39A, mutta jännitekestoisuus vain 60 voltia. Molemmissa transistorityypeissä kotelo oli TO-220 mallia. /5 ; 6. /

Laitteen testaus

Lausahdus pitänee paikkansa: "Kun toisessa ominaisuudessa voittaa, niin toisessa yleensä häviää." Näin kävi myös tässä tapauksessa.

Vaihtosuuntaajassa molemmille ensiökäämin puoliskoille on omat kytkintransistorinsa. Nämä puoliskot ovat eristetty toisistaan muuten paitsi, että niillä on yhteinen maapotentiaali. Eri puolet saavat ohjauksen vuorotellen, jolloin ensiökäämin puolikkaat kytkeytyvät vuorollaan miinukseen.

Prototyypilaitteessa käytettiin BUK-555 -tyyppisiä kanavatransistoreja kummallakin puolella rinnan kytkettyinä viisi kappaletta. Fetin kanavan yli vaikuttava jännite saa olla vain 60 V. Tämä jännitekestoisuus oli selvästi liian pieni, koska komponentteja tuhoutui todella paljon.

Kytkin-komponentteja yritettiin kyllä suojata jännitepiikeiltä nopeilla "damperi"-diodeilla, mutta tämä ei kuitenkaan riittänyt. Komponentit saattoivat tuhoutua jopa siitä, että vaihtosuuntaajan kytki päälle. Fettien suojaksi kokeiltiin kytkeä zener-diodeja, mutta tämä ei auttanut. Lopulta kuitenkin löytyi ylijännitesuojaksi transienttizenerdiodi joka osoittautui hyväksi suojaksi ylijännitepiikkejä vastaan.

Vaikka kytkintransistorien suojaksi löytyikin hyvä suojakomponentti, niin päätettiin kuitenkin vaihtaa kanavatransistorin tyyppiä. Tämä siksi, että BUK-555 -tyypin kanavatransistori oli liian heikko jännitekestoisuutensa vuoksi ja komponentteja oli kaikissa kokeiluissa tuhoutunut jo lähes kourallinen. Ongelma ratkaistiin siten, että kanavatransistoreiksi valittiin IRFP150-tyyppiset transistorit. Jatkuvaa virtaa kyseinen komponenttityyppi kestäää 41 A ja jännitekesto on 100 V. Tämä komponentti on suoritusarvoiltaan ja myös kotelonsakin puolesta huomattavasti massiivisempi ja kestävämpi. Kotelo on tyyppiä TO-247AC. /7./ Edellä mainitut ongelmat loppuivat tämän komponenttivalinnan myötä.

4.3 Parannuskytkentöjen mitoitus

Seuraavissa kahdessa kappaleessa käydään läpi vaihtosuuntaajan epäkohtien kehitystyötä. Kappaleissa on käsitelty testattuja ja eri vaihtoehtoja, joita on harkittu ongelmien ratkaisemiseksi. Tekstissä käydään läpi eri parannusvaihtoehdoissa ja menetelmissä esiintyneet ongelmat sekä lopullinen ratkaisu, joka kehitystyön tuloksena otettiin käyttöön.

4.3.1 Virranrajoituspiirin mitoitus

Ohjainpiirin valmistajan Philips Semiconductors:n data-lehdellä on esitetty kytkentä /4, s. 5/, jolla pystytään kontrolloimaan kuormitusvirtaa. Kytkennän ansiosta vaihtosuuntaajaa voidaan kuormittaa periaatteessa rajattomasti. Vaihtosuuntaajan ulostulo voidaan jopa kytkeä oikosulkuun. Oikein toimiva virranrajoitus tekee laitteesta huomattavasti luotettavamman ja kestävämmän.

Virranrajoituspiirin toiminta on seuraava: Kun vaihtosuuntaajaa kuormitetaan liikaa, laskee virranrajoitus ulostulojännitteen tasoa huomattavasti ja samalla myös kuorman kulkeva virta pienenee. Ulostulo ei siis sammu kokonaan, vaan virta putoaa noin kolmannekseen normaalitilanteesta. /4, s. 5./ Ylikuormitustilanteen päättyessä laite alkaa

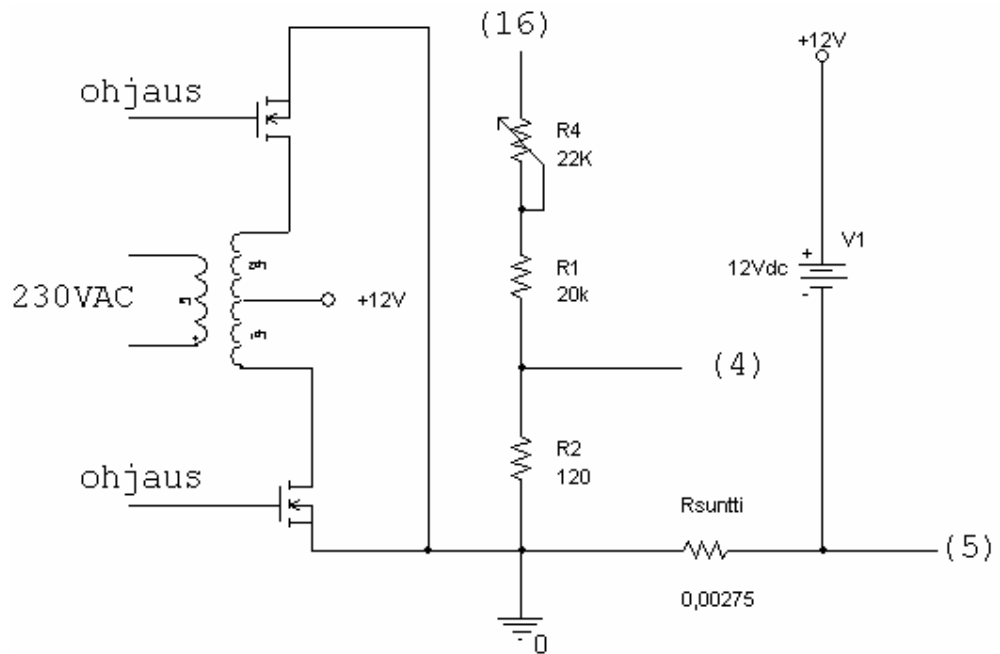
automaattisesti toimia taas normaalisti. Laitetta ei siis tarvitse mitenkään "resetoida" että se lähtisi jälleen käyntiin.

On kuitenkin ongelmia jotka johtuvat juuri siitä, että ulostulojännite vain laskee ylikuormitustilanteessa eikä katkea kokonaan. Pyörivien sähkökoneiden ankkurit alkavat iskeä kipinää, koska esimerkiksi porakone ei alijännitteellä pyöri tarpeeksi nopeasti. Toisaalta kipinöinti vaikuttaa laitetta syöttävään vaihtosuuntaajaan korkeatasoisia ylijännitepiikkejä ja vaihtosuuntaajan kytkintransistorit saattavat jopa tuhoutua. Resistiivisellä kuormalla kuormitettaessa vastaavaa ongelmaa ei ole, koska liian suuritehoisella halogeenivalolla tai lämmitysvastuksella kuormitettaessa valo vain palaa himmeästi tai vastus lämpenee vain vähän.

Virranrajoituspiiri

Virranrajoituskytkennän rakenne on melko yksinkertainen. Kuormitusvirran mittaaminen perustuu pieniresistanssisessa vastuksessa(suntti) syntyvään jännitehäviöön. Virtasuntissa syntyvää jännitehäviötä mitataan ohjainpiiriin sisäänrakennetulla erovahvistimella ja suntin jännitehäviön perusteella katkaistaan transistorien ohjaus, jos kuormitusvirta nousee liian suureksi. Ohjainpiirin nastoissa neljä ja viisi on komparaattorin sisäänmenot –sense ja +sense (kuva 5, s.13). Komparaattori vertailee sisäänmenojen välistä jännite-eroa. Kun jännite-ero on 180-220 mV, niin komparaattorin ulostulo ohjautuu alas ja ohjainpiirin ulostulot sammuvat. /4, s. 1./

Jotta sunttivistuksen resistanssi saadaan mahdollisimman alhaiseksi, täytyy piirin nastaan neljä tuottaa pohjajännite. Pohjajännite saadaan aikaan jännitteenjakokytkennällä ohjainpiirin viiden voltin referenssijännitteestä (ohjainpiiri nasta 16). Jännitteenjakokytkentään on mielekästä laittaa myös potentiometrisäätö. Säädöllä voidaan tehdä hienosäätö haluttuun virtarajaan. Säädöllä käytännössä voi vaikuttaa melko vähän virtarajaan, koska komparaattorin ilmaisualue on niin pieni 0-200mV. Datalehden /4, s.5/ ohjeen mukaisesti toteutettu virranrajoituspiirin kytkentä on esitetty kuvassa 8:



Kuva 8. Virranrajoituspiiri

Virranrajoituspiiriin jännitteenjaon komponenttien mitoittamiseen oli datalehdessä /4, s. 5/ annettu muutamia kaavoja. Käytännön testit kuitenkin osoittivat, että oikeat komponenttiarvot oli haettava kohdilleen todellisessa kuormitusilanteessa. Virranrajoitus on tällä tavalla toteutettuna ehkä liian herkkä, koska erovahvistin reagoi kaikkiin virtapiikkeihinkin ja rajoittaa virtaa, vaikka todellista tarvetta ei vielä olisikaan. Ratkaisuna tähän voisi olla, että virranrajoituspiiriin toteutettaisiin pieni viive, niin se ei reagoisi välittömästi kaikkiin hetkellisiin virtahuippuihin. Kytкинtransistorit kestävät kyllä huomattavan suurta hetkellistä virtaa.

Kuormitusvirta saattaa nousta jopa 60-70 ampeeriin, joten mittausvastuksen resistanssin täytyy olla todella pieni. Mittausvastus voidaan käytännössä toteuttaa pätkällä kuparilankaa. Kuparilangalla on tietty resistanssi, joka on suoraan verrannollinen johtimen pituuteen. Johtimen poikkipinta-ala vaikuttaa myös johtimen resistanssiin. Virranrajoituskytkennässä valittiin mittausvastukseksi $1,5\text{mm}^2$ monisäikeistä johdinta 15 cm pituinen pätkä. Poikkipinta-alaltaan $1,5\text{mm}^2$ olevan yksisäikeisen johtimen resistanssi on $0,00976 \Omega/\text{m}$. Verkkosivulta /8/ löytyvästä resistanssitaulukosta saatua johtimen resistanssi-arvoa voidaan

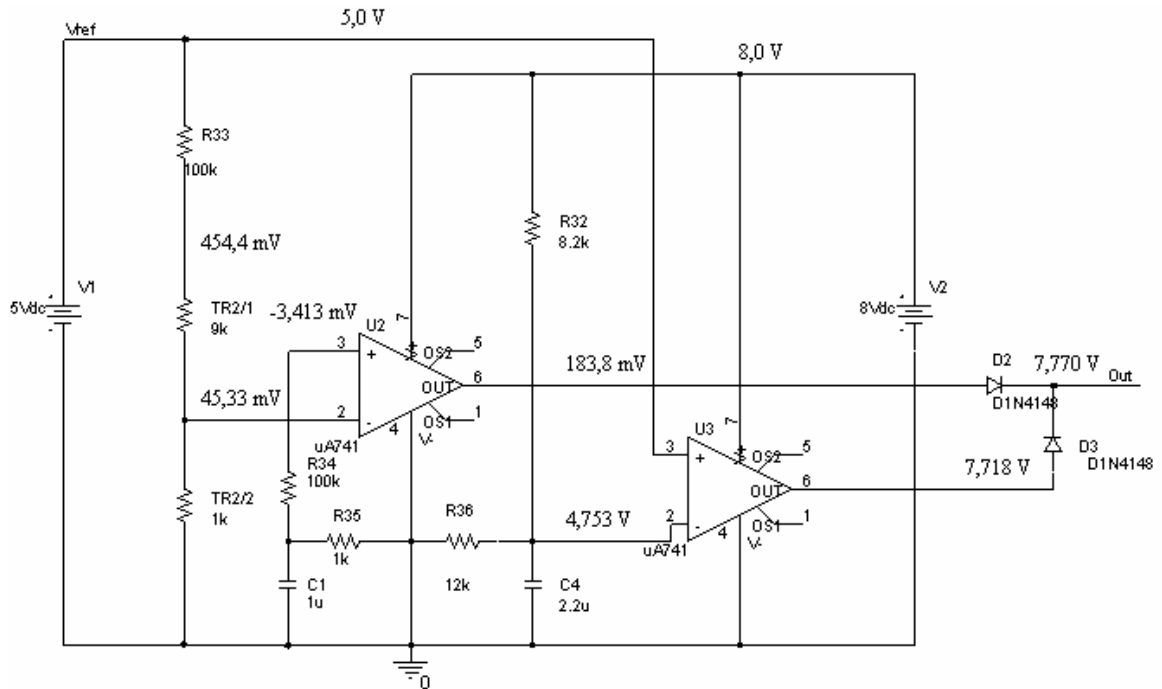
pitää suuntaa-antavana tietona laskettaessa sunttivastuksen todellista resistanssia. Mittausvastuksen resistanssi laskemalla on:

$$0,15 \cdot 0,0976 \Omega/m = 14,6 m\Omega$$

Sunttivastuksen jännitehäviön ja siinä kulkevan mitatun virran avulla laskettaessa sunttivastuksen resistanssi on todellisuudessa hieman pienempi, eli $2.75 \text{ m}\Omega$ (taulukko 1, s. 34). Jännitteenjakokytkentään vastusten arvoiksi valittiin testien edetessä $R_4=22\text{K}\Omega$ potentiometri, jonka kanssa on sarjaan kytkettynä vastus $R_3=20\text{K}\Omega$ sekä $R_2=120\Omega$:n vastus ja $R_s=0,00275\Omega$. Jännitteenjaossa, joka on tehty $42\text{K}\Omega$:n ja 120Ω :n vastuksilla lähes koko jännite jää $42\text{K}\Omega$:n vastuksen yli. Potentiometrisäätö vaikuttaa käytännössä komparaattorin nelosnastan pohjajännitteen muuttumiseen n.14-30 millivoltin välillä.

4.3.2 Akkujännitteen valvonta

Kytkentää suunniteltaessa on huomioitu tilanne, että akun napajännite saattaa laskea. Tämä voidaan todeta siitä, että kytkennässä on kaksi operaatiovahvistinta, joiden tehtävänä on valvoa eri jännitetasoja. Operaatiovahvistimien ulostulot on kytketty diodien kautta ohjainpiirin shtdwn- sisäänmenoon. Kun kumpi tahansa operaatiovahvistimista ohjaa ulostulonsa positiiviseen laitaan, niin ohjainpiirin shtdwn- toiminto aktivoituu. Kuvassa 9 on kytkentä, jolla on alkuperäisessä laitteessa valvottu akkujännitteen tasoa.



Kuva 9. Jännitteenvolventapiiri

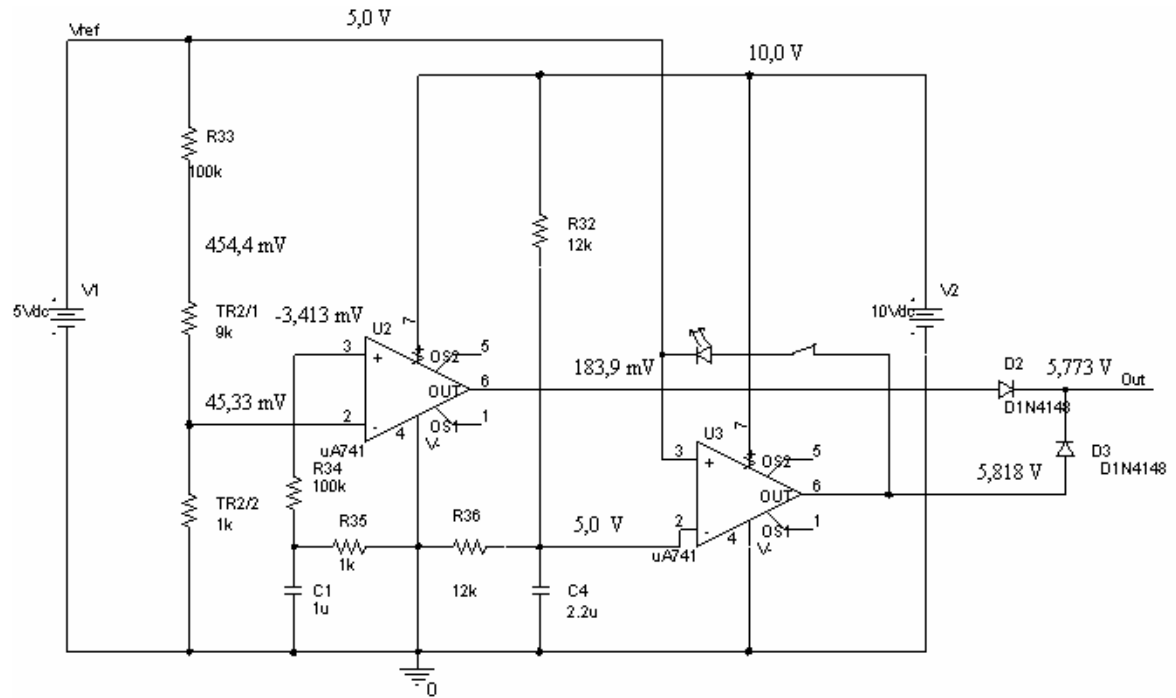
Vastukset TR2/1 ja TR2/2 ovat laitteessa todellisuudessa potentiometri, jolla säädetään jännitteenvolventapiiriin herkkyyttä. Simuloitaessa Spicella potentiometrit täytyy hajottaa kahdeksi vastukseksi. Kuvasta 9 näkyy, että vasemmalla on 5V:n virtalähde, joka kuvaa ohjainpiirin referenssijännitettä. Oikealla on 8V:n jännitelähde, joka on akku.

Akkujännitteen ollessa 12V tulee oikeanpuoleisen operaatiovahvistimen invertoivaan sisäänmenoon 7,128V. Saman operaatiovahvistimen ei-inversoiva sisäänmeno on kytketty referenssijännitteeseen, eli 5 volttiin. Akun jännitteen täytyy laskea n.8 volttiin, jotta operaatiovahvistin antaisi shutdown -käskyn ohjainpiirille (kuva 9). Operaatiovahvistimissa ei ole takaisinkytkentää, joten ne vertailevat sisäänmenojensa jännitteitä ja ohjaavat ulostulon positiiviseen tai negatiiviseen käyttöjännitteeseen sen mukaan, kummissa sisäänmenossa jännitetaso on suurempi. Käytännössä operaatiovahvistimen ulostulo on maissa siihen asti kunnes akun jännite laskee n.8 volttiin jolloin invertoivan sisäänmenon jännite laskee ei-inversoivan sisäänmenon jännitetason alapuolelle.

Käytännön testeissä havaittiin, että jännitteen laskiessa alle 10 voltin alkoivat eri puolen fettien ohjaukset mennä päällekkäin.

Kanavatransistorien ohjaus tulee siis sammuttaa viimeistään akkujännitteen laskiessa 10 volttiin. KytKentä jännitetason valvontaan on valmis, mutta täytyy mitoittaa uudelleen. Oikeanpuoleisen operaatiovahvistimen invertoivan sisäänmenon jännite tehdään $12\text{K}\Omega$:n ja $8,2\text{K}\Omega$:n vastusten avulla. Akkujännitteen ollessa 10V, operaatiovahvistimen ei-invertoivan sisäänmenon jännite on maita vasten 7,128V. Invertoivan sisäänmenon jännite on saatava 5 volttiin, kun akun napajännite on 10V. Jätetään jännitejaon $12\text{K}\Omega$:n vastus kytkentään ja muutetaan $8,2\text{K}\Omega$:n vastuksen arvoa. Koska ei-invertoivaan sisäänmenoon halutaan tasan puolet akun jännitteestä (5V), on jännitejaon toisen vastuksen arvo myös $12\text{K}\Omega$. Lisäksi havaittiin tarpeelliseksi saada lukittua alijännitepiiri päälle, kun se ensimmäisen kerran antaa shutdown-käskyn ohjainpiirille.

Testauksessa ilmeni, että kun alijännitepiiri toimii, niin akun napajännite nousee heti hieman vaihtosuuntaajan sammussa. Operaatiovahvistimen ulostulo ohjautuu akun napajännitteen noustessa taas toiseen laitaan kunnes akun jännite laskee uudelleen kuorman kytkeytyessä akkuun. Tämä aiheuttaa sen, että vaihtosuuntaaja alkaa värähdellä operaatiovahvistimen sammuttaessa ja käynnistäessä ohjainpiiriä. Ongelma saatiin ratkaistua lisäämällä operaatiovahvistimen ei-invertoivan sisäänmenon ja ulostulon väliin led ja kytkin. Kytkin on normaalisti kiinni-asennossa. Kun nyt operaatiovahvistin kytkee ulostulonsa positiiviseen käyttöjännitteeseen, niin virta alkaa kulkea ledin kautta ulostulosta sisäänmenoon ja operaatiovahvistimen ulostulo jää positiiviseen laitaan. Led indikoi vaihtosuuntaajan käyttäjälle alijännitetilanteesta ja vaihtosuuntaaja alkaa taas toimia, kun kytkimellä katkaistaan ledissä kulkeva virta tai kytketään vaihtosuuntaajaan toinen ladattu akku. KytKentä on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Uudelleen mitoitettu jännitevalvontapiiri

5 LAITTEEN TESTAUS, SUORITUSARVOT JA RAJOITUKSET

Toteutetun laitteen suunniteltu käyttökohde

Vaihtosuuntaajan kehitystyö lähti tarpeesta saada matkaveneeseen lähinnä ajon ajaksi kiinteä 230 voltin vaihtojännite navigointilaitteena toimivalle kannettavalle tietokoneelle ja GPS-paikantimelle. Lisäksi tarkoituksena oli saada toteutettua laitteesta riittävän kuormitusta kestävä, jotta kuormaa voisi tarvittaessa kytkeä lisää tietokoneen lisäksi. Veneessä on kaksi 6 voltin ja 155Ah:n akkua, joten virtaa riittää voimakkaaseenkin kuormitukseen, vaikka moottori ei olisikaan käynnissä. Laitteen yhtäjaksoinen käyttö tulisi olemaan mahdollisesti useita tunteja. Olisihan valmiita tehokkaitakin vaihtosuuntaajia saanut kaupasta, mutta projektin lähtökohtana olikin tutustua vaihtosuuntaajan toimintaan ja mahdollisuuksiin toteuttaa itse toimiva laite. Laitteen toimintaa testattiin pidempi jakso käyttämällä laitetta matkaveneessä n. 3 tuntia yhtäjaksoisesti. Laitetta kuormitettiin kannettavalla tietokoneella ja GPS- navigointilaitteella. Laite toimi moitteettomasti tärinän vaikutuksen alaisena ja lisäksi veneessä oli melko kosteaa. Tosin laitetta tällöin ei kuormitettu lähellekään maksimikuormalla.

5.1 Toteutetun ja kaupallisen vaihtosuuntaajan kuormitustestit

Toteutettu vaihtosuuntaaja

Sekä toteutetun, että kaupallisen laitteen kuormitustesteissä oli mittalaitteena Fluken yleismittari-oskilloskooppi. Oskilloskooppi kytkettiin kannettavaan tietokoneeseen ja tietokoneelle saatiin tulostettua näkymiä oskilloskoopin näytöltä. Lisäksi kuormitustestejä suoritettiin myöhemmin digitaalisen oskilloskoopin ja yleismittarin avulla. Oikeastaan vasta jälkimäisessä mittauksessa saatiin mitattua luotettavasti kuormitusvirrat ja akusta otettu teho. Vaihtosuuntaajaa kuormitettiin näiden testien aikana erilaisilla ja eritehoisilla sähkölaitteilla. Testien tarkoituksena oli määrittää

laitteen maksimikuormitettavuus, laitteen toiminta ylikuormitustilanteessa ja erityyppisten kuormien vaikutus laitteen toimintaan.

Ensimmäisissä kuormitustesteissä oli lievänä puutteena se, ettei akun napajännitettä huomattu mitata kuormitustestien aikana. Akun nappajännitettä tarvitaan laskettaessa akusta otettua tehoa. Mittauksista on kuitenkin hyötyä, koska oskilloskoopilta saatiin tulostettua hyviä kuvia havainnollistamaan tehtyjä mittauksia. Kuormitustestit tehtiin siis vielä uudelleen ja mitattiin kaikki tarpeelliset jännitteet ja virrat.

Ongelmana on kuitenkin, että sunttivastuksen resistanssia ei tiedetä tarkasti. Suntin resistanssin mittaamiseksi tarvittaisiin erikoisen herkkä resistanssimittari, sillä suntin resistanssi on 1-5 milliohmia. Tämä ongelma ratkaistiin siten, että vaihtosuuntaajan ottama virta mitattiin akun napaan sarjaankytketyllä virtamittarilla. Kuormana näiden virtamittauksien aikana oli pienehköjä kuormia (taulukko 1; mittaukset 1-5). Mitattujen virtojen avulla saatiin laskettua sunttivastuksen resistanssi eri kuormilla. Näiden viiden mittauksen avulla saaduista suntin resistansseista laskettu keskiarvo on 2,772 mΩ. Tätä resistanssia voidaan pitää laskuissa riittävällä tarkkuudella suntin todellisena resistanssina.

Taulukko 1. Kuormituskokeet

nro.	Uout rms/V	Kuorman tyyppi ja nimellisteho / 240V	Udc suntti/mV	Akun napajännite/V	Akusta otettu virta/A	Akusta otettu teho/W	Suntin resistanssi Rs/milliohmia
1	206	tyhjäkäynti	2,5	12,51	0,82	10,26	3
2	220	40W hehkulamppu	9,2	12,33	3,55	43,77	2,59
3	225	80W hehkulamppu	18,7	12,23	6,78	82,92	2,75
4	227	100W hehkulamppu	23,2	12,19	8,40	102,40	2,75
5	232	180W hehkulamppu	43,0	12,09	15,50	187,40	2,77
6	236	300W halogeenivalo	73,0	11,91	26,33	313,59	Keskiarvo 2,772
7	228	300W halogeenivalo+80W	91,5	11,85	33,01	391,17	
8	226	300W halogeenivalo+100W	96,5	11,85	34,81	412,50	
9	216	300W halogeenivalo+80W+100W	110,8	11,81	39,97	472,05	
10	220	600W kulmahiomakone	53,2	11,94	19,19	229,13	
11	197	750W kahvinkeitin	109,5	11,48	39,50	453,46	
12	183	750W kahvinkeitin+40W	116,5	11,40	42,03	479,14	
13	125	750W kahvinkeitin+80W	116,0	11,36	41,85	475,40	

yleismittarilla mitatut virta-arvot ja niiden avulla lasketut suntin resistanssiarvot

Toteutetun laitteen testaustulosten tarkastelu

Taulukosta 1 nähdään miten kuorman tyyppi ja suuruus vaikuttaa ulostulojännitteen tason laskemiseen. Kun kuorma on pääasiassa resistiivistä, niin se laskee ulostulojännitteen tehollisarvoa huomattavasti enemmän kuin induktiivinen kuorma. Hehkulamppua ja halogeenivaloa voidaan pitää resistiivisenä kuormana ja kulmahiomakonetta taas induktiivisena kuormana. Kulmahiomakone(600W) laskee ulostulojännitteen vain 220 volttiin, kun taas teholtaan huomattavasti pienempi resistiivinen kuorma 480W (taulukko 1; mittaus 9) laskee jännitteen tehollisarvon 216 volttiin.

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että vaihtosuuntaajan maksimi kuormitettavuus on tällä hetkellä n. 500W (taulukko 1; mittaus 9). Jos kuormaa lisätään tästä, niin virranrajoitus alkaa laskea ulostulojännitteen tasoa ja pitää näin kuormitusvirran edelleen samalla tasolla (taulukko 1; mittaukset 11-13). Kun virranrajoitus toimii, suntissa syntyvä jännitehäviö on n.116mV ja kuormitusvirta laskettuna suntin resistanssin avulla on n. 40-42 A.

Mittauksessa 10 on mitattu 600 watin kulmahiomakoneen aiheuttamaa kuormitusta. Mittauksen aikana tarkasteltiin, miten kulmahiomakone reagoi virranrajoitukseen, joka rajoittaa virran n.40 ampeeriin. Pyörivissä sähkökoneissahan käynnistysvirta on huomattavasti suurempi, kuin käyntivirta. Kun kone käynnistettiin, lähti se pyörimään ensin hitaasti, koska virranrajoitus rajoitti virtaa ja jonkin aikaa pyörityään hitaammin, otti se täydet kierrokset. Tämän jälkeen konetta rasitettiin hiomalla, jolloin riittävän paljon rasitettaessa virtaraja tuli taas vastaan ja pyörimisnopeus putosi.

Kaupallinen vaihtosuuntaaja

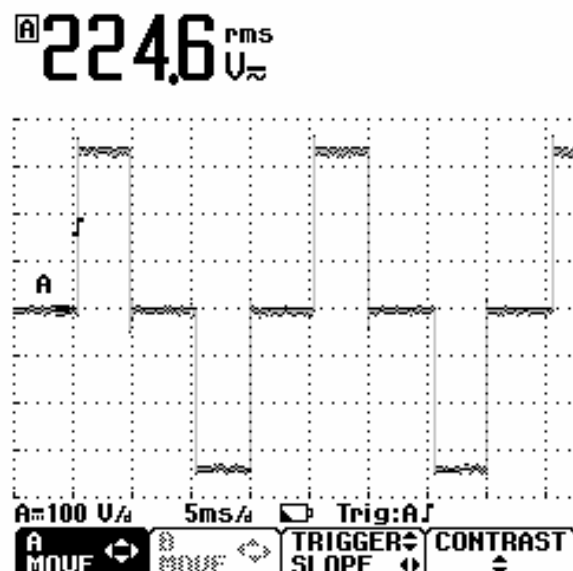
Vertailun vuoksi testattiin myös kaupallista Genius inverter- nimistä vaihtosuuntaajaa, jonka maksimi kuormitettavuus 300W. Laite on

vähemmän kuormitusta kestävä kuin toteutettu laite, mutta antaa silti hyvän vertailunäkökohdan.

Tämän tyyppisessä laitteessa akkujännitettä katkotaan huomattavasti suuremmalla taajuudella kuin ulostulojännite on. Laitteen muuntaja on saatu tästä syystä hyvin pienikokoiseksi ja se tekee tästä laitteesta todella kompaktin kokonaisuuden.

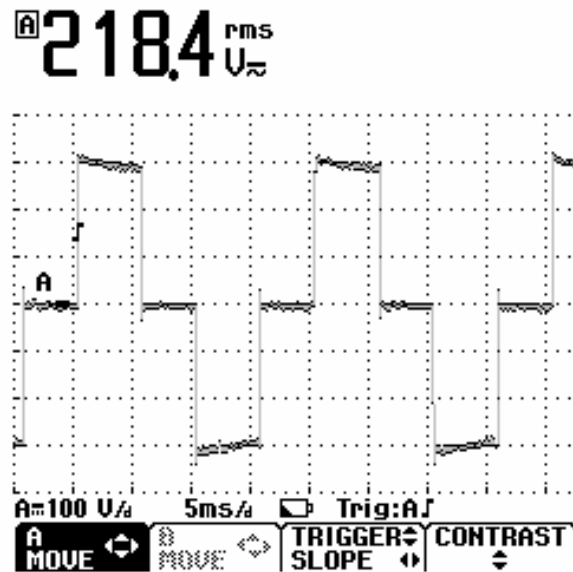
Kaupallisen laitteen syöttämä aaltomuoto on huomattavasti siistimpää kuin toteutetun vaihtosuuntaajan ulostulojännite. Laitteen ulostulojännite on periaatteessa samanlaista porrasaaltoa kuin toteutetun laitteen, vaikka laitteen toimintaperiaatteesta johtuen se voisikin olla ns. mukautettua sini-aaltoa. Syynä aaltomuodon kanttimaisuuteen on ehkä siinä, että mukautetun sini-aallon tuottaminen vaatii hiukan monimutkaisempaa ohjauselektroniikkaa. Kyseessä on kuitenkin hiukan vanhempaa tekniikkaa edustava laite ja ns. ”halpamalli”.

Huomioitavaa kaupallisen laitteen tuottamassa aaltomuodossa on, että pulssisuhde on lähes 50%, toisin kuin toteutetussa vaihtosuuntaajassa, jossa se on 70%. Verrattuna toteutetun laitteen ulostulojännitteen huippuarvoon 280V on kaupallisessa laitteessa se n. 350V. Kuvassa 11 on esitetty kaupallisen vaihtosuuntaajan ulostulojännite kuormittamattomana.

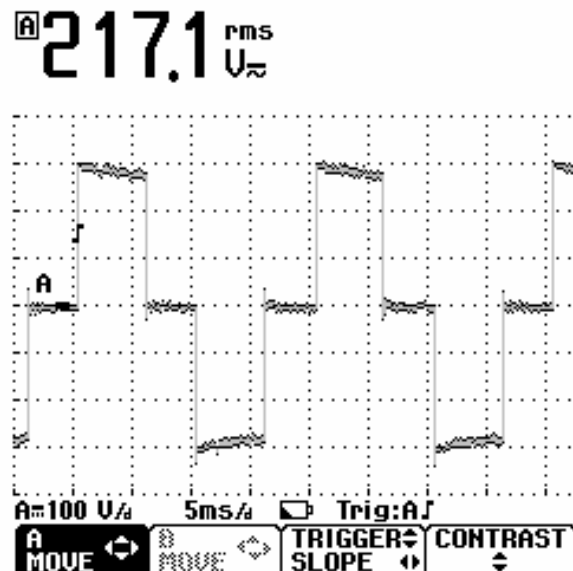


Kuva 11. Kaupallisen vaihtosuuntaajan ulostulojännite (vrt. kuva 4 ja 16)

Vaihtosuuntaajan ulostulojännite on siistiä kanttiaaltoa (kuva 11).
Jännitteen jaksonaika on 20ms, joten taajuus on melko tarkasti 50Hz.
Kuvissa 12 ja 13 on ulostulojännitteet, kun kyseistä vaihtosuuntaajaa kuormitetaan pienehköillä kuormilla. Kuvassa 12 laitetta on kuormitettu 150W:n halogeenivalolla ja kuvassa 13 on tilanne, kun laitetta kuormitetaan 150W:n halogeenivalolla ja 40W:hehkulampulla.



Kuva 12. Kuorma 150W



Kuva 13. Kuorma 190W

5.2 Lämpötilan vaikutus toteutetun laitteen toimintaan

Lämpötilan vaikutusta laitteen toimintaan ei ehditty testaamaan juuri lainkaan. Laitteen kuormituskokeet tehtiin pääasiassa huoneenlämpötilassa (+20°C), mutta lisäksi laitetta testattiin n. +10 °C lämpötilassa autotallissa. Ainakin kylmätestit olisi ollut helppo tehdä ulkona pakkasessa ja olisihan laitteen voinut laittaa vaikka miedolla lämmöllä olevaan sähköuuniin. Todelliset käyttölämpötilat voivat olla laajalla lämpötila-alueella, sillä laite voi olla autossa, jossa talvella saattaa olla 30 asteen pakkanen ja kuumana kesäpäivänä lämpötila voi nousta jopa 50-60 plus-asteeseen.

Kanavatransistorien valmistaja määrittelee datalehdillään, että komponentin käyttö voi tapahtua -55°C - +175 °C. Tällainen käyttölämpötila-alue riittää laitteen käyttöön kaikissa olosuhteissa, jos laite on mitoitettu oikein eivätkä fetit siten pääse ylikuumenemaan. Operaatiovahvistimen ja ohjainpiirin käyttölämpötila-alueet ovat datalehdissä samat 0°C - +70°C. Varmasti ohjainpiirin ja operaatiovahvistimien käyttölämpötilarajat tulevat helpostikin vastaan talvella, mutta periaatteessa mitä luultavimmin laite toimii moitteetta pikkupakkasella. Laite jo itsessäänkin tuottaa käynnissä ollessaan jonkin verran lämpöä, joten laitteen käyttö onnistunee talviolosuhteissakin. /5 ; 6 ; 7./

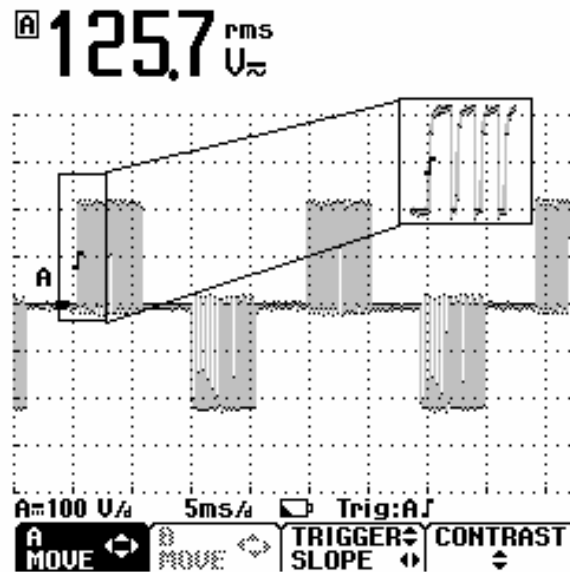
5.3 Merkittävimmät havainnot toteutetun laitteen testauksen aikana

Seuraaviin kolmeen kappaleeseen on kerätty testausvaiheessa kertyneestä materiaalista tärkeimpiä ilmiöitä ja havaintoja. Kappaleissa on pyritty perustelemaan kaikkien tilanteiden synty ja ilmiön aiheuttaja.

5.3.1 Ylikuormitus

Ohjainpiiri ohjaa ulostuloja auki normaalisti 50Hz:n taajuudella. Tähän taajuuteen sisältyy molemmilla puolijaksoilla kanavatransistorin lepoaika. Ylikuormitustilanteessa ohjainpiiri pyrkii ohjaamaan kanavatransistorin aktiivisena oloaikana fettejä auki- tilaan. Kun virranrajoitus huomaa virran nousevan liian suureksi, vaihtosuuntaajan lähtöjännite putoaa nolnaan.

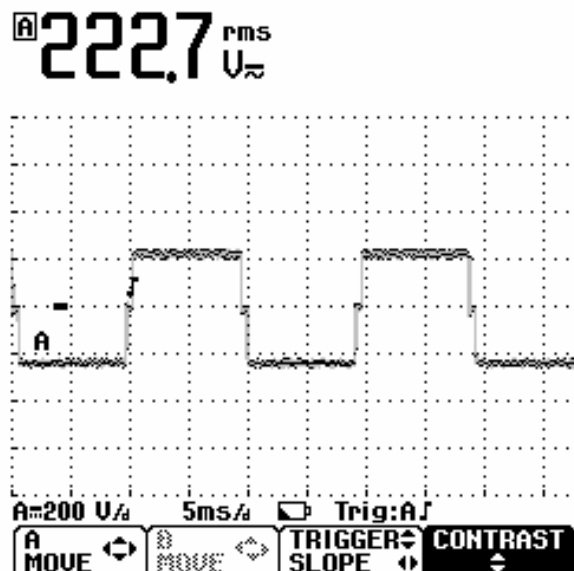
Ohjainpiiri kokeilee jatkuvasti olisiko kuormitus jo vähentynyt riittävästi. Taajuus, jolla ohjainpiiri yrittää avata kytkimiä ylikuormitustilanteessa on n.300Hz. Kuvaan 14 on suurennettu tämä 300 Hz:n värähtelytaajuus, joka on ilmeisesti ohjainpiirin sisäisen oskillaattorin taajuus.



Kuva 14. Ylikuormitustilanne

5.3.2 Akun napajännitteen aleneminen

Kun vaihtosuuntaajaa kuormitetaan voimakkaasti, niin saattaa täyteenkin varatun akun napajännite laskea. Kuvassa 15 on tilanne, jossa vaihtosuuntaajaa kuormitetaan rinnakkain kytketyillä 300W:n halogeenilla ja 40W:n hehkulampulla. Toteutetun vaihtosuuntaajan ominaisuus on, että se pyrkii pitämään jännitteen tehollisarvon vakiona. Kun ulostulojännitteen tehollisarvo on ollut kuormittamattomana n.236V, niin se on laskenut kuormituksen vaikutuksesta n.13V. Huippujännite on laskenut 320 voltista n. 200 volttiin tehollisarvon kuitenkin laskematta enempää kuin 13V. Pulssisuhde on kasvanut 70 prosentista n.90 prosenttiin. Koska jännitteen tehollisarvoa voidaan ajatella jännitteen pinta-alana, niin pinta-ala on pysynyt melko samana vaikka huippujännite onkin laskenut aika lailla.



Kuva 15. Vaihtosuuntaajan maksimikuormitus

5.3.3 Erityyppiset kuormat

Laitetta kuormitettaessa vaikuttaa vaihtosuuntaajan toimintaan se, minkälaisena kuormana vaihtosuuntaaja näkee kuormana olevan laiteen. Kun tarkastellaan jännitelähdettä, joka syöttää vaihtojännitettä kuormaan, voidaan ajatella, että on olemassa kolmenlaista erityyppistä kuormaa: induktiivista, kapasitiivista ja resistiivistä. Vaikka ajatellaankin, että kuorma olisikin lähes puhtaasti resistiivistä, niin sisältää se aina vähän induktiivista tai kapasitiivista vaikutusta. Induktanssi ja kapasitanssi muodostavat vaihtosähköpiirissä vaihtovirtavastukset, joiden vaikutukset ovat toisilleen vastakohtia ja samassa virtapiirissä ollessaan niiden vaikutukset kumoavat toisiaan. Voimakkaampi näistä kahdesta näkyy virtalähteelle kuormana kuormassa olevan resistanssin lisäksi. Kuormaan syötetyn vaihtojännitteen taajuus vaikuttaa kelassa ja kondensaattorissa syntyvään vaihtovirtavastukseen. /1, s 275-282./

Tässä kohdassa voidaan kuitenkin keskittyä verkkovirtalaitteisiin, joiden käyttöjännitteen taajuus on 50Hz. Kuorma on useimmiten induktiivinen, koska kuormassa oleva heikko kapasitiivinen vaikutus kumoutuu pois. Resistanssin, induktanssin ja kapasitanssin yhteisvaikutuksesta muodostuu

kuorman impedanssi, joka on siis kuorman vaihtovirtavastus ja yksikkö on ohmia. Impedanssi aiheuttaa vaihtojännitteelle ja -virralle vaihe-eroa. Vaihe-eron suunta määräytyy siitä, onko impedanssi kapasitiivista vai induktiivista. Kun impedanssi on puhtaasti resistiivistä, niin vaihe-ero on nolla, mutta kun impedanssi on induktiivista, niin silloin virta on jännitettä edellä ja kapasitiivisella impedanssilla päinvastoin. Piirissä, jossa kulkee puhdasta sini-aaltoa, voidaan kelan, kondensaattorin ja vastuksen aiheuttama vaihtovirtavastus ja vaihesiirto laskea osoitinlaskentaa apuna käyttäen. /1, s. 275-282./ Vaihtosuuntaajan ulostulojännitteen ja -virran vaiheen muuttuminen ja vaihtosuuntaajaa kuormittavan laitteen aiheuttama vaihtovirtavastus on myös laskettavissa osoitinlaskennalla jollain tarkkuudella. Vaihtosuuntaajan sini-aallosta poikkeava aaltomuoto tuottaa kyllä epätarkkuutta laskelmiin.

Kuormaan syötetyn vaihtojännitteen teho

”Vaihtovirtapiireissä loisteho Q kuvaa jännitteen U ja sähkövirran I vaihe-erosta johtuvaa näennäistehon S ja pätötehon P eroavuutta. Loisteho voidaan laskea tehollisen jännitteen, tehollisen sähkövirran ja vaihe-eron sinin tulona”./9./

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

”Loisteho Q ei ole työtä tekevää tehoa (toisin kuin pätöteho).

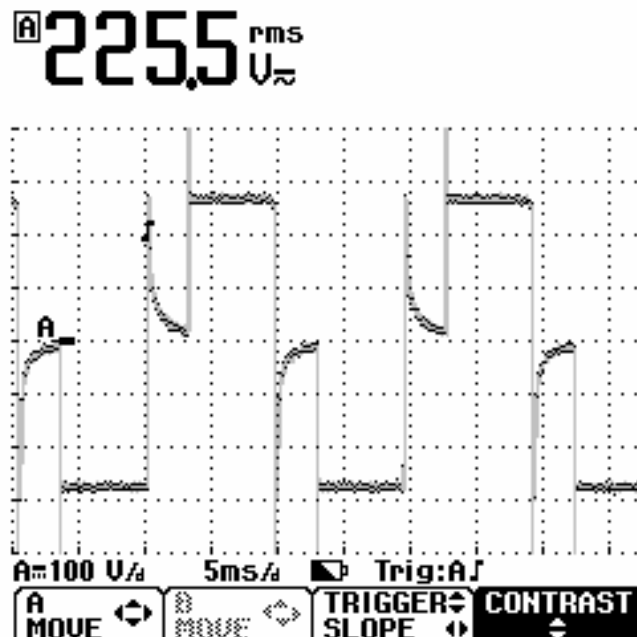
Vaihtovirtapiireissä pätöteho on piirissä todellisuudessa kulutettu teho. Pätöteho on varsinaista työtä tekevää (esim. vastuskuormassa lämmöksi muuttuva) teho. Sen SI-yksikkö on watti. Jos vaihtovirran jännite U ja virta I eivät ole samassa vaiheessa, pätöteho on pienempi kuin näennäisteho. Pätöteho voidaan laskea tehollisen jännitteen, tehollisen virran ja tehokertoimen $\cos\varphi$ tulona” /9/ :

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

"Näennäisteho on tehollisen jännitteen U ja tehollisen sähkövirran I tulo. Jos vaihtovirran jännite ja virta ovat samassa vaiheessa, näennäisteho on yhtä suuri kuin pätöteho P . Jos vaihe-ero on olemassa, näennäisteho on suurempi kuin todellisuudessa kulutettu teho. Näennäistehon SI-yksikkö on voltttiamperei. Näennäisteho² = pätöteho² + loisteho² eli

$$S^2 = P^2 + Q^2 \text{ "/9./}$$

Alla on tarkasteltu vaihtosuuntaajan ulostulojännitteen muodon muuttumista erityyppisten kuormien vaikutuksesta. Laitetta on kuormitettu induktiivisella ja resistiivisellä kuormalla. Kuvassa 16 on vaihtosuuntaajan ulostulojännite kuormittamattomana. Jännitteen tehollisarvo on säädetty 70%:n pulssisuhteella 225,5 volttiin. Kuvasta näkyy selvästi vaihtosuuntaajan oman muuntajan aiheuttamat jännitehuiput, jotka syntyvät fettien katkaisuhetkellä. Kumpikaan kanavatransistoreista ei johda, joten kanavatransistorien rinnalle kytketyt diodit alkavat johtaa ja syöttävät induktanssin aiheuttaman jännitehuipun takaisin akkuun. Induktanssin syöttämän virran laskiessa vaihtosuuntaajan ulostulojännite palautuu lopulta nolla-tasoon.



Kuva 16. Vaihtosuuntaajan ulostulojännite kuormittamattomana

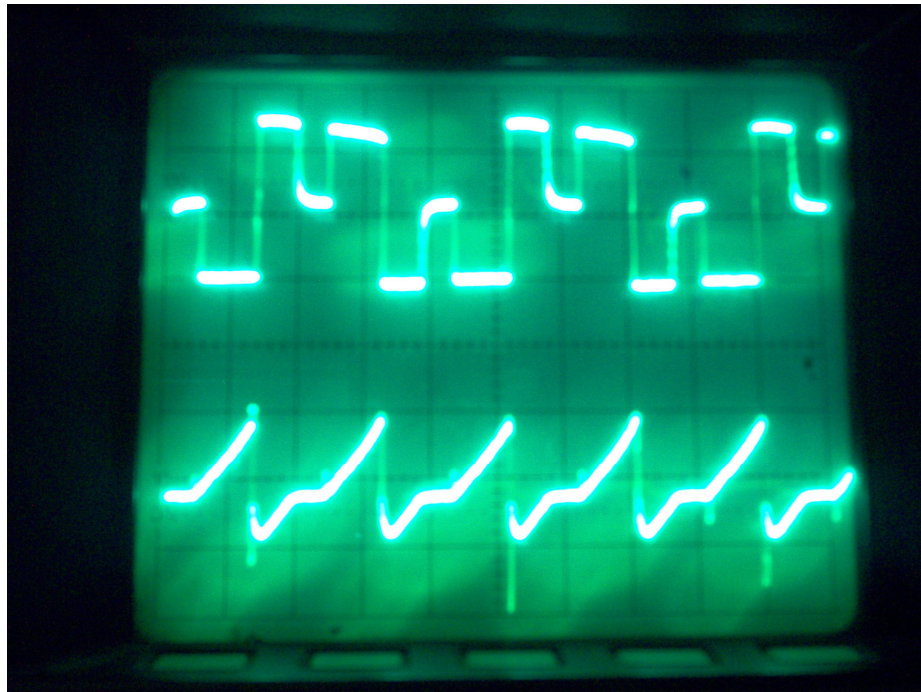
Kapasitiivinen kuorma

Kuten edellä jo mainittiinkin, kapasitanssia on yleensä verkkovirtalaitteissa hyvin vähän verrattuna laitteiden induktanssiin. Tästä syystä kapasitiivista reaktanssia omaavan hyötykuorman löytäminen onkin melko hankalaa. Sähköverkoissa tulee monesti ongelmia pelkästään induktanssin aiheuttamasta loistehosta. Loistehon siirtäminen kuormittaa sen aiheuttaman virran takia siirtojohtoja. Koska esimerkiksi sähkömoottoreissa on induktiivista kuormaa, niiden aiheuttama loisteho kompensoidaan kondensaattoreilla, jotka luovat kapasitiivista loistehoa. Voidaan ajatella myös, että induktiivinen kuorma kuluttaa loistehoa ja kondensaattori tuottaa loistehoa. Kapasitiivista loistehoa tuotetaan yleensä sähkökeskuksiin asennettavilla automaattisilla kondensaattoriparistoilla, jotka kytkevät verkkoon kondensaattoreita aina tarvittaessa./9./

Induktiivinen kuorma

Induktiivinen kuorma aiheuttaa ehkä eniten hankaluuksia vaihtosuuntaajan toiminnalle. Koska induktanssi pyrkii vastustamaan virran muutosta, niin vaihtosuuntaajan särmikäs ulostulojännite ja nopeat virranmuutokset synnyttävät vaihtosuuntaajan oman muuntajan ja induktiivisen kuorman kanssa voimakkaita jännitepiikkejä. Kun vaihtosuuntaajaa kuormitetaan induktiivisella kuormalla on havaittavissa seuraava ilmiö: Tilanteessa, jossa kummankaan ensiöpuolen fetit eivät johda, alkaa induktanssi työntää virtaa takaisin akkuun. Tämä näkyy vaihtosuuntaajan ulostulojännitteessä kanavatransistorien lepoajan kaventumisena (kuva 17). Kun ulostulojännitteen (ylempi kuvaaja) puolijakso vaihtuu, niin pitäisi jännitteen olla hetken nollassa, kunnes fetit alkavat taas johtaa. Kuten kuvasta näkyy, ulostulojännitteen taso vaihtuu kuitenkin suoraan vastakkaiseen huippujännitteeseen vähäksi aikaa, vaikka kanavatransistorit ovat auki-tilassa. Kuorma syöttää tällöin virtaa takaisin akkuun suojadiodien kautta. Jännite syntyy ulostuloon kuorman induktanssin ansiosta ja samalla hetkellä kuvassa näkyy virta, joka on vastakkaissuuntainen normaalille kuormitusvirralle (alempi kuvaaja). Kuvassa 17 on induktiivisena kuormana

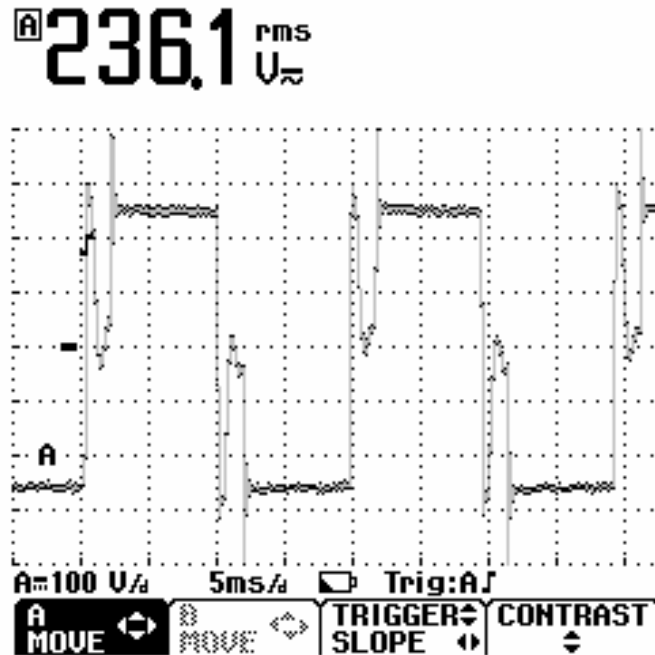
loisteputkivalaisin. Induktiivisen kuorman aiheuttamaan ongelmaan on kuitenkin kehitysajatus johon palaan yhteenvedossa.



Kuva 17. Loisteputkivalaisin

Induktanssin aiheuttama loisteho huonontaa vaihtosuuntaajasta saatavaa hyötytehoa. Tämä johtuu siitä, että induktanssi kasvattaa jännitteen ja virran vaihe-eroa ja osa sähkötehosta muuttuu loistehoksi, joka ei tee työtä kuormassa.

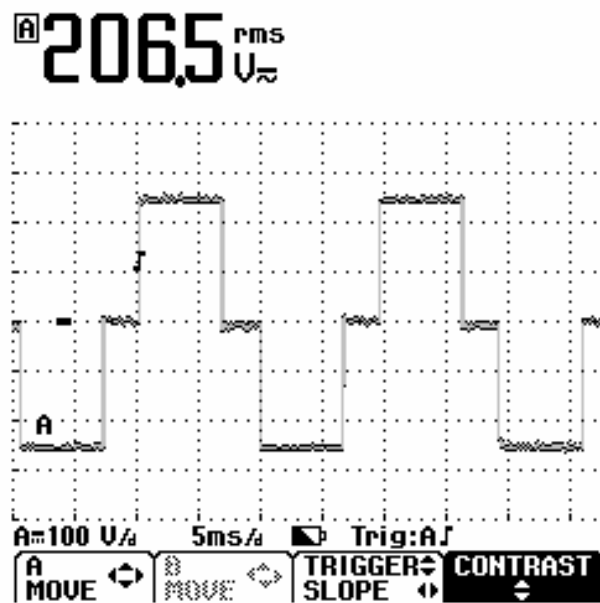
Induktiivisista kuormista myös sähkömoottori aiheuttaa huomattavan suurta häiriötä ulostulojännitteeseen, kuten voidaan havaita kuvasta 18. Rosoinen jänniteaalto syntyy todennäköisesti siitä, että hiiliharjat kipinöivät sähkömoottorissa. Kuvasta on myös selkeästi havaittavissa sähkömoottorin induktanssin aiheuttama jännitehuippu fettien katkaisuhetkellä. Jännitteen tehollisarvoa on hiukan korotettu suuremmaksi kuin on kuvissa 15 ja 19. Jännite on ollut kuvan 18 testauksessa tyhjäkäynnillä n. 240V rms.



Kuva 18 Hiomakone 200W

Resistiivinen kuorma

Vaihtosuuntaajan toiminnan kannalta resistiivinen kuorma vaikuttaa vähiten negatiivisesti ulostulojännitteen muotoon (kuva 19). Koska kuormassa ei juuri ole loistehoa synnyttävää induktanssia tai kapasitanssia, niin vaihtosähköstä saatava teho siirtyy lähes kokonaisuudessaan kuormaan. Laitteen omassa muuntajassa kyllä syntyy aina jonkin verran induktiivista loistehoa, mutta tämä voidaan katsoa laitteen ominaisuudeksi joka voidaan hyväksyä. Kuvasta 19 on havaittavissa selkeä ero induktiivisella kuormalla kuormitettuun ulostulojännitteeseen. Resistiivisellä kuormalla jännitekuvasta puuttuvat selkeästi kuvissa 16, 17 ja 18 näkyneet jännitehuiput fettien katkaisuhetkellä, koska piirissä ei juuri ole induktiivista vaikutusta. Ulostulojännite kuormittamattomana on ollut sama kuin kuvassa 16 eli 225V. Kuormituksen vaikutuksesta jännitteen huipusta-huippuun-arvo on laskenut jonkin verran, joten ulostulojännitteen tehollisarvo on vain 206,5V.



Kuva 19. Kuormana halogeenivalo 150W ja 40W:n hehkulamppu

6 YHTEENVETO

Laitteen kehittäminen lähtötilanteesta oli melko suuri haaste. Työmäärä on ollut mittava, joka koostuu kaikkien materiaalien hankinnasta, ongelmien ratkaisemisesta, tiedon etsimisestä ja tämän raportin laatimisesta. Olen kuitenkin saanut tämän työn aikana huomata sen, että käytännön elektroniikka on loppujen lopuksi melko yksinkertaista, kun asiat hajottaa riittävän pieniksi osiksi. Vaikka toisaalta olen huomannut myös sen, että elektroniikassa on myös se ominaisuus, että kun yhden ongelman saa ratkaistuksi, niin se saattaa siirtyä johonkin muualle. Analogisen elektroniikan osa-alueita pohtiessa tulee vielä mieleen, että tämäntyyppiseltä työltä puuttuu se selkeys ja suoraviivaisuus, joka taas vallitsee esimerkiksi digitaalitekniikassa. Vaihtosuuntaajan kaltaisessa elektronisessa laitteessa riittää päänsärkyä kaikkien mielenkiintoisten asioiden kanssa, joita saavat aikaan kelat, suuret virrat sekä tasa- ja vaihtojännite yhdessä ja erikseen. Olen luottanut siihen, mitä viisaammat ovat sanoneet: ”Joidenkin ilmiöiden ja ominaisuuksien olemassaoloon on vaan tyydyttävä—se vain on sillä tavalla”.

Tulosten ja tavoitteiden saavuttamisen arviointi

Tavoitteena oli saada tehtyä laitteesta käyttökelpoinen ja luotettava. Laitteen toiminta tuli saada sellaiseksi, ettei taitamattominkaan käyttäjä saa rikottua sitä. Kuka tahansa voi vahingossa tai tarkoituksella liittää vaihtosuuntaajaan liian suuren kuorman, siten että se ylikuormittuu. Laitteen suunnittelussa on kuitenkin oletettu, että laitteen käyttäjän täytyy osata kytkeä akun navat oikein päin. Akun napojen kytkeminen ristiin saattaa edelleen rikkoa muutakin kuin sulakkeen.

Kehittelytyön tuloksena laite sai monia hyviä ominaisuuksia ja sen käytettävyys parani huomattavasti. Laitetta voidaan nyt kuormittaa rajattomasti, laitteen rikkoutumatta. Automaattinen virranrajoitus pudottaa lähtöjännitettä, jos laitetta yrittää kuormittaa liikaa. Akun napajännitteen

laskiessa liian alas, kytkeytyy vaihtosuuntaaja pois päältä ja punainen ledvalo syttyy ilmaisemaan käyttäjälle akun alijännitteestä. Kytkinfetit on nyt suojattu niin hyvin, että kuorman kytkemisestä ja irrottamisesta aiheutuvat jännitepiikit eivät nouse liian voimakkaiksi. Vaikka kehitettävää vielä jäikin, niin tärkeimmät puutteet laitteesta tulivat korjatuksi. Laite saatiin siis huomattavasti toimintavarmemmaksi kuin se oli aluksi.

Tulosten käyttökelpoisuus

Tässä tutkintotyössä käsiteltyjä kehittämismenetelmiä voidaan hyvin käyttää muidenkin laitteiden kehittämistarkoitukseen. Toivon, että tästä työstä on hyötyä myös muille, jotka haluavat perehtyä samalla toimintaperiaatteella toimivan vaihtosuuntaajan rakenteeseen ja ominaisuuksiin. Tutkintotyön aihe on sellainen, että oli aikamoinen työ löytää aiheeseen liittyvää tietoa. Ongelma toisensa jälkeen kuitenkin ratkesi, kun sai tiedonjyvän sieltä ja toisen täältä. Monissa kohdissa asiat on käsitelty niin yksityiskohtaisesti, että ne pitäisi olla helppo omaksua ja ymmärtää, millä perusteella mikäkin valinta on tehty.

Jatkokehitysmahdollisuuksia

Laitteen käytettävyyden parantamiseksi olisi hyvä antaa laitteen käyttäjälle indikaatiota laitteen toimintatilasta esimerkiksi ylikuormitustilanteessa, Laitteeseen voisi tehdä virtamittarin, joka näyttäisi käyttäjälleen kuormituksen suuruuden.

Fettien lepoajaksi voitaisiin ensiökämin päät kytkeä maihin erillisillä kanavatransistoreilla, jolloin muuntajan energia pysyisi muuntajan sisällä, eikä muuntaja alkaisi työntää virtaa takaisin akkuun.

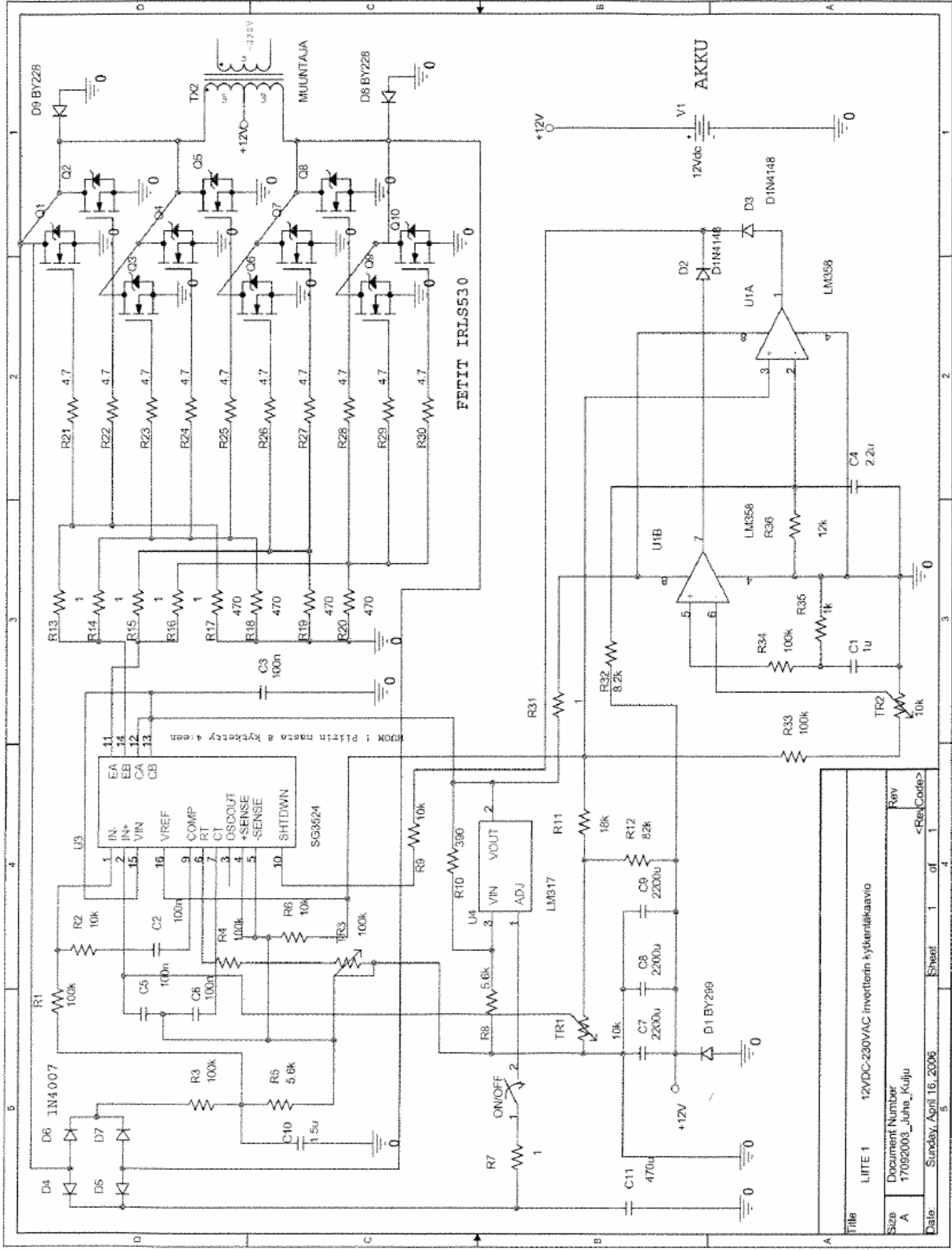
Muuntajan mitoitusta olisi syytä myös hiukan tarkistaa, koska tällä hetkellä vaihtosuuntaajan sopiva ulostulojännite saavutetaan reilusti yli 50%:n pulssisuhteella. Pulssisuhteita pitäisi säätää noin 70%:iin, jolloin haluttu

ulostulojännitteen tehollisarvo saavutetaan. Muuntajan muuntosuhdetta muuttamalla saadaan nostettua ulostulojännitteen huippuarvoa ja siten se vaikuttaa myös tehollisarvoon.

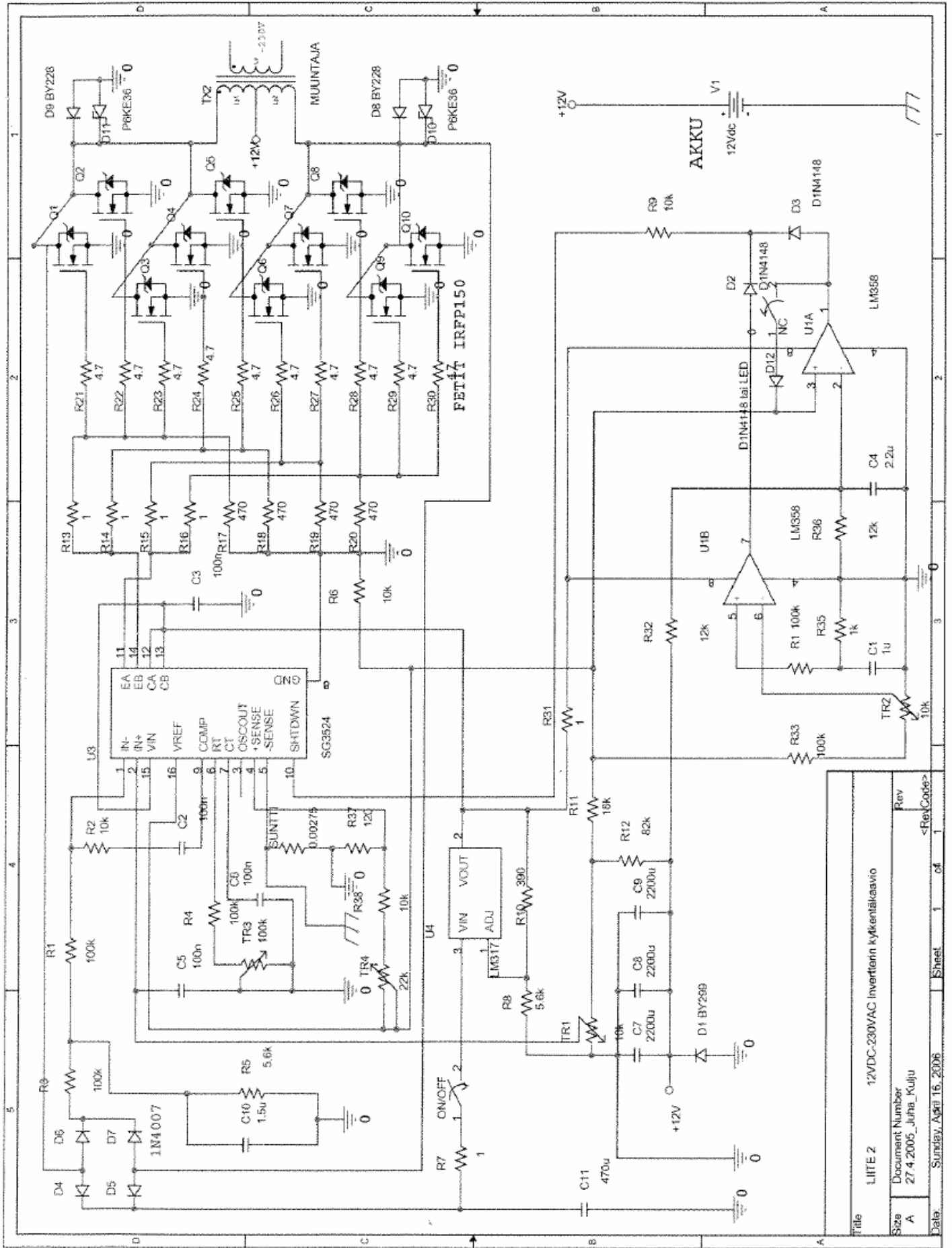
LÄHTEET

- 1 Peltonen, Hannu – Perkkiö, Juha – Vierinen, Kari, I. 2000. Insinöörin (AMK) Fysiikka Osa 2. 4. painos. Jyväskylä: GUMMERUS.
- 2 Silvonon, Kimmo, J. 2004. Sähkötekniikka ja elektroniikka. 2. korjattu painos. Helsinki: Hakapaino Oy
- 3 ABB:n TTT-käsikirja. [www-sivu]. [viitattu 25.4.2006].
J. 2000. Saatavissa:[http://www.abb.fi/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/160_0007.pdf](http://www.abb.fi/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/160_0007.pdf)
- 4 Philips Semiconductors product information. [www-sivu]. [viitattu 14.4.2006] . J. 1994. Saatavissa:
<http://pdf.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/19133/PHILIPS/SG3524.html>
- 5 Philips Semiconductors product information. [www-sivu]. [viitattu 14.4.2006] . J. 1993. Saatavissa:
<http://pdf1.alldatasheet.co.kr/datasheet-pdf/view/17192/PHILIPS/BUK555-100.html>
- 6 Fairchild Semiconductor. [www-sivu]. [viitattu 14.4.2006].
Saatavissa: <http://pdf1.alldatasheet.co.kr/datasheet-pdf/view/53087/FAIRCHILD/IRLS530A.html>
- 7 International Rectifier. [www-sivu]. [viitattu 14.4.2006].
Saatavissa: http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/F/P/IRFP150.shtml
- 8 Oy T.Stenbacka Ab. [www-sivu]. [viitattu 14.4.2006].
Saatavissa: http://www.t-stenbacka.fi/docs/E04a_Tinattu_kuparilanka.pdf

- 9 Wikipedia- vapaa tietosanakirja. [www-sivu]. [viitattu 14.4.2006]
l. 24.3.2006. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Loisteho>



Title		LIFTE 1 12VDC-230VAC invertlerin kytkentäkaavio	
Size	Document Number	Rev	
A	17092003_Juha_Kulju		
Date:	Sunday, April 16, 2006	Sheet	1 of 1



Title	LIITE 2 12VDC-230VAC invertarin kytkentäkaavio
Size	A
Document Number	27.4.2005_juha_kulju
Rev	<RevCode>
Date	Sunnaisy. April 16, 2006
Sheet	1 of 1

