



TEKNIikka JA LIIKENNE

Sähkötekniikka

Elektroniikka

INSINÖÖRITYÖ

TEHONRAJOITUSPIIRI

**Työn tekijä: Kimmo Laakso
Työn ohjaaja: Esa Häkkinen
Työn ohjaaja: Pekka Huttunen**

Työ hyväksytty: __. __. 2008

**Esa Häkkinen
yliopettaja**

TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Kimmo Laakso	
Työn nimi: Tehonrajoituspiiri	
Päivämäärä: 6.2.2009	Sivumäärä: 38 sivua + 4 liitettä
Koulutusohjelma: Sähkötekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Elektroniikka
Työn ohjaaja: Yliopettaja Esa Häkkinen	
Työn ohjaaja: Tuotekehityspäällikkö Pekka Huttunen	
<p>Tämä insinööryö tehtiin helsinkiläiselle Heatpoint Oy:lle. Työssä suunniteltiin tehonrajoituspiiri markkinoille myytäväksi tarkoitettuun induktiokuumentimeen. Induktiokuumentimen perustana toimi Ellego Powertec Oy:n valmistama hakkuritehonlähde. Tehonrajoituspiirillä pyrittiin ehkäisemään hakkuriteholähteen verkosta ottamia virtapiikkejä.</p> <p>Työssä luodaan yksi ratkaisu Urmas Jöksin (2008) insinööryössään kohtaamiin ongelmiin induktiokuumentimen kehittämisessä. Jöksi sai induktiokuumentimen toimimaan hyvin tavallisissa lämmitystilanteissa, mutta ääritilanteissa tapahtuneet kytkintransistoreiden rikkoutumiset estivät projektin valmistumisen. Jöksin projektissa havaittiin, että induktiokuumentimen ottaa tehوترansistoreiden hajoamistilanteissa verkosta liikaa tehoa.</p> <p>Työn tavoitteena oli suunnitella valmis tehonrajoituspiiri, joka valvoo ja tarvittaessa rajoittaa induktiokuumentimen verkosta ottamaa virtaa. Työssä rakennettiin kaksiosainen piiri, jossa UJT-oskillaattoriin avulla ohjattiin kuormaa syöttävää tyristorisiltaa ja tarkkailupiiriin avulla tarkkailtiin kuorman ottamaa virtaa.</p> <p>Tehonrajoituspiiri saatiin mittaustilanteissa käytetyillä kuormilla toimimaan varsin luotettavasti. Mittauksiin soveltuvien kuormien vähyden takia laitetta pystyttiin kuitenkin testaamaan valitettavan vähän. Suunnitteluun kuluneen ajan ja tyristorisiltaan liittyneiden ongelmien takia tehonrajoituspiiriä ei aivan pystytty kehittämään valmiiksi laitteeksi. Esimerkiksi valmiille laitteelle tarvittavia EMC-mittauksia ei ehditty suorittamaan.</p> <p>Insinööryössä kehitetty tehonrajoituspiiri oli toiminnaltaan helposti säädettävä ja muunneltava. Loppuun asti kehiteltynä tehonrajoituspiirillä pystyttäisiin todennäköisesti suojaamaan myös muita laitteita kuin induktiokuumentinta.</p>	
Avainsanat: UJT-oskillaattori, tyristorisilta, unistori, tehonrajoitus	

ABSTRACT

Name: Kimmo Laakso	
Title: Power limiting circuit	
Date: 6.2.2009	Number of pages: 38 pages + 4 appendices
Department: Electrical Engineering	Study Programme: Electronics
Instructor: Esa Häkkinen (M.Sc), Lic.Sc. (Tech.), Principal Lecturer in Electronics Engineering	
Supervisor: Product Development Manager Pekka Huttunen	
<p>This graduate study was carried out for the Helsinki based Heatpoint Oy. During this study a power limiting circuit was designed for an induction heater with the intention of making it a commercial product. The power for the induction heater was supplied by a switched-mode power supply manufactured by Ellego Powertec Oy. The main idea behind the power limiting circuit was to prevent current spikes that the switched-mode power supply takes from the power distribution networks.</p> <p>The objective of this study was to create a solution to the problems Urmas Jöksi (2008) was facing in his graduate study on developing the induction heater. Jöksi managed to make the induction heater work in standard heating situations, but the switching transistors kept breaking down in extreme heating situations. Jöksi noticed that these problems occur when the induction heater takes too much power from the mains.</p> <p>The goal of this graduate study was to design a complete power limiting circuit that monitors and, if needed, limits the amount of current that the induction heater takes from the mains. In this study a two part circuit was made, which uses a UJT relaxation oscillator circuit that controls the load feeding thyristor bridge and a monitoring circuit that probes the amount of current the load is taking.</p> <p>When making the measurements, it was found that the power limiting circuit was functioning very reliably. However, the loads used in the tests did not quite match real situations. Due to the time spent for designing the device as well as some thyristor bridge related problems, it was not possible to finish the complete machine. For example, there was not sufficient time to perform the necessary EMC measurements.</p> <p>The power limiting circuit developed in this graduate study turned out to be easily adjustable and convertible. Once developed to the finish, the power limiting circuit could probably be used to protect also other devices than the induction heater.</p>	
Keywords: UJT relaxation oscillator, thyristor bridge, unijunction transistor, power limiting	

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYS

LYHENTEET JA SYMBOLIT

1	JOHDANTO	1
2	TEHONRAJOITUS	2
	2.1 Tehoa rajoittavan piirin toiminta	2
	2.2 Tarkkailupiirin toiminta	6
3	TEHONRAJOITUSPIIRIN RAKENTAMINEN	9
	3.1 Tehoa rajoittavan piirin rakentaminen	9
	3.2 Tarkkailupiirin rakentaminen	12
	3.3 Tyristorisillan lisääminen kytkentään	17
	3.4 Tehonrajoituspiirin muuttaminen toimimaan verkkovirralla	20
	3.5 Tehonrajoituspiirin toiminnan testaus	22
4	MITTAUSTULOKSET JA PÄÄTELMÄT	24
	4.1 Oskillaattoriin liittyvät mittaukset	25
	4.2 Tyristorisiltaan liittyvät mittaukset	28
	4.3 Tarkkailupiiriin liittyvät mittaukset	32
5	POHDINTA JA YHTEENVETO	34
	LÄHTEET	38

LIITTEET

Liite 1. Unistorin 2N4871 datalehti

Liite 2. Tyristorisillan Ixys VVZ12:n datalehti

Liite 3. Optoerottimen Vishay SFH610A:n datalehti

Liite 4. Valo-ohjatun releen IR PVT412 datalehti

LYHENTEET JA SYMBOLIT

C	kapasitanssi
D	diodi
F	taajuus [Hz]
f_0	alarajataajuus [Hz]
I	virta
η	Intrinsic Standoff Ratio; unistorin sisäinen jännitteenjakosuhte
P	sähköteho
R	resistanssi
V	jännite
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor; kanavatransistori
UJT	Unijunction Transistor; kaksoiskantatransistori; unistori

1 JOHDANTO

Teholähteistä on muodostunut oleellinen osa nykypäivän elektroniikkaa. Erityisesti modernia tehoelektroniikkaa soveltavista hakkuriteholähteistä on tullut markkinoilla erittäin suosittuja. Hakkuriperiaatteella toimivien tehonlähteiden suurimpina etuina perinteisiin tehonlähteisiin nähden voidaan pitää parempaa hyötysuhdetta, pienempää kokoa ja pidempää käyttöikää.

Vuodesta 2005 lähtien on Helsingin ammattikorkeakoulussa tutkittu ja testattu eri opinnäytetyöissä erään hakkuriteholähteen sopivuutta induktiokuumentimen tehonlähteeksi. Insinööriopiskelija Teppo Lindh tutki vuonna 2005 opinnäytetyössään induktiokuumennuksen periaatteita ja valmisti hakkuriteholähteen pohjalta alustavan kokeilukelpoisen laitteen. Kuumentimen tarkoitus oli olla markkinoiden pienin ja monikäyttöisin.

Vuonna 2008 Urmas Jöksi jatkoi siitä, mihin Lindhin projekti jäi, ja pyrki kehittämään opinnäytetyössään induktiokuumenninta toiminnaltaan paremmaksi. Jöksi sai induktiokuumentimen toimimaan tavallisissa kuumennustilanteissa hyvin, mutta ongelmaksi osoittautuivat hakkuriteholähteeseen tulevat virtapiikit ääritilanteissa. Hakkuriteholähteen Mosfet-transistorit rikkoutuivat aina, kun induktiokuumentimen kuumennuspään otti tietylle etäisyydelle kuumennettavasta kohteesta. Parannuskeinoa ongelmaan ei tuntunut löytyvän millään, ja se jäi ajan puutteen vuoksi ratkaisematta.

Tässä insinöörityössä pyritään tuomaan yksi ratkaisu Jöksin kohtaamaan ongelmaan. Työssä on tavoitteena kehittää induktiokuumentimen hakkuriteholähteeseen tehoa rajoittava piiri, joka estää Mosfet-transistoreiden tuhoutumisen. Tehonrajoituspiirin tarkoituksena on tarkkailla ja rajoittaa tarvittaessa hakkuriteholähteen verkosta ottamaa virtaa. Työn perustana toimivan hakkuriteholähteen on valmistanut Halikossa toimiva Ellego Powertec Oy.

Helsinkiläinen Heatpoint Oy aikoo tulevaisuudessa markkinoida induktiokuumenninta Suomessa ja mahdollisesti myös ulkomailla. Induktiokuumentimen ollessa markkinoille tarkoitettu laite, täytyi myös tehonrajoituspiirille suorittaa vaadittavat EMC-mittaukset. Tarkoituksena oli

tutkia Metropolia Ammattikorkeakoulun EMC-laboratoriossa, kuinka paljon rakennettu piiri lähettää ja sietää häiriötä.

Työssä suurin aika kului itse tehonrajoituspiirin suunnitteluun. Alkuperäisen suunnitelman mukaista piiriä jouduttiin muuttamaan useita kertoja ennen kuin mitään testauksia voitiin suorittaa. Muutokset piiriin pyrittiin tekemään harkiten ja yksi kerrallaan, jotta niiden vaikutukset voitaisiin havaita selvästi. Lisäksi ongelmat piirin tyristorisillan kanssa hidastivat projektin edistymistä. Viivästysten takia toimivalle tehonrajoituspiirille ehdittiin tehdä vain vähän käytännön mittauksia.

2 TEHONRAJOITUS

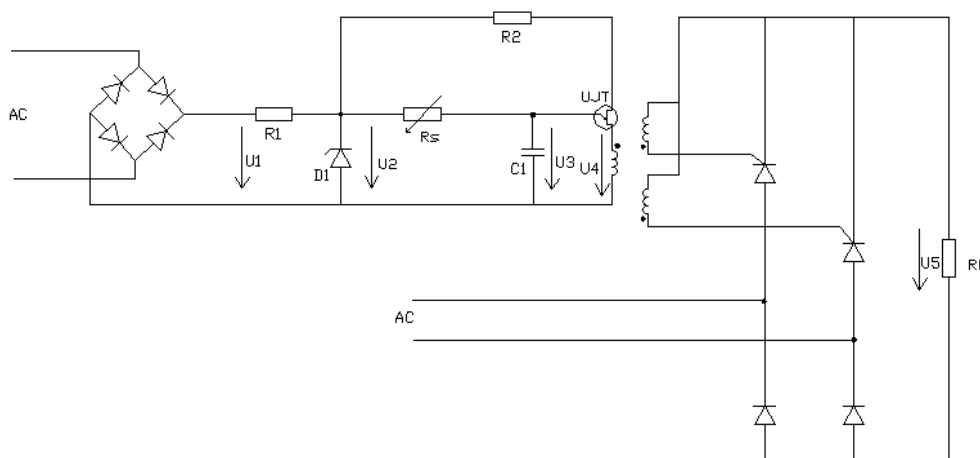
Induktiokuumentimen tapauksessa lämmityspäiden nostaminen irti lämmityskohteesta aiheutti hakkuriteholähteen kytkintransistoreiden tuhoutumisen. Lisäksi oli huomattu, että juuri ennen transistoreiden tuhoutumista laitteen verkosta ottaman virran määrä kasvaa huomattavasti. Jos tämä virtapiikki voitaisiin estää, hakkuripiirin kytkintransistorit pysyisivät mahdollisesti ehjinä ja induktiokuumennin toimisi kaikissa lämmitystilanteissa. Koska ongelma oli verkosta otetun virran määrässä, voitiin tehonrajoituspiiri sijoittaa hakkuriteholähteen sisääntuloon erillisenä piirinä. Tehonrajoituspiiri pystyttiin siis rakentamaan irrallisena piirinä, ja se voitiin perusteellisen testauksen jälkeen liittää osaksi induktiokuumenninta.

Tehonrajoitus voidaan toteuttaa monilla eri tavoilla. Tässä työssä piirin tehoa rajoittava vaikutus perustuu kuorman ottaman virran tarkkailuun ja rajoittamiseen kaksiosaisella piirillä. Piirin toinen osa rajoittaa kuormalle pääsevää virtaa ja toinen piirin osa tarkkailee milloin kuorman ottamaa virtaa tulee rajoittaa.

2.1 Tehoa rajoittavan piirin toiminta

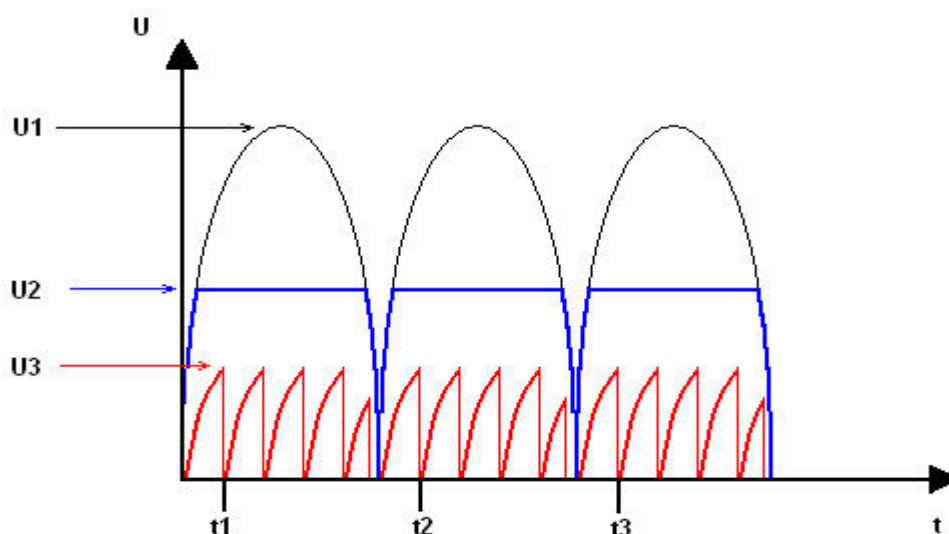
Tehonrajoituspiirin perustana käytettiin unistorioskillaattoripiiriä, joka on oiva tapa kehittää pulssimuotoisia signaaleja. UJT-oskillaattorin avulla voidaan kehittää sopivia sytytyspulsseja tyristorisillan ohjaukseen. Sytytyspulssit välitetään tyristorisillan kahdelle tyristorille pulssimuuntajalla, jossa on kaksi toisiota. Sytytyspulssien alkamisaikaa muuttamalla saadaan tyristorisillan syttymisajankohtaa siirrettyä. Tyristorisillan syttymisaikaa siirtämällä

voidaan suoraan vaikuttaa kuormaan siirtyvään tehoon. Mitä myöhäisemmäksi syttymisajankohta siirretään, sitä vähemmän tehoa on kuorman käytettävissä (kuva 1).



Kuva 1. UJT-oskillaattori ja tyristorilta

Aluksi kuvan 1 mukaiseen piiriin syötettävä vaihtojännite kokoaaltotasasuunnataan tasasuuntaussillan avulla. Seuraavaksi kokoaaltotasasuunnatusta jännitteestä (U_1) leikataan huiput pois vastuksen R_1 ja zeneriodin D_1 muodostamalla jänniteregulaattorilla. Reguloinnin lisäksi vastus R_1 suojaa piiriä liialliselta virralta. Zener-reguloinnin jälkeen jännite näyttää muodostuvan kuvan 2. mukaisesti melkein suorakaiteen muotoisista osista. Tämä suorakaiteenmuotoinen jännite (U_2) toimii unistorivärähtelypiirin syöttöjännitteenä. Säätoivastus R_s ja kondensaattori C_1 määräävät värähtelypiirin jakson pituudet [1].



Kuva 2. UJT-oskillaattoriin jännitteet eri kohdissa

Säätövastuksen R_s kautta tuleva lähes suorakaiteenmuotoinen jännite saa kondensaattorin C1 latautumaan. Kondensaattorin latauduttua tarpeeksi, unistori siirtyy johtavaan tilaan ja purkaa kondensaattorin varauksen ajanhetkellä t_1 (Kuva 2.). Unistorin liipaisupiste U_p eli johtavaan tilaan siirtymiseen vaadittavan jännitteen arvo (U_3) saadaan kaavasta 1:

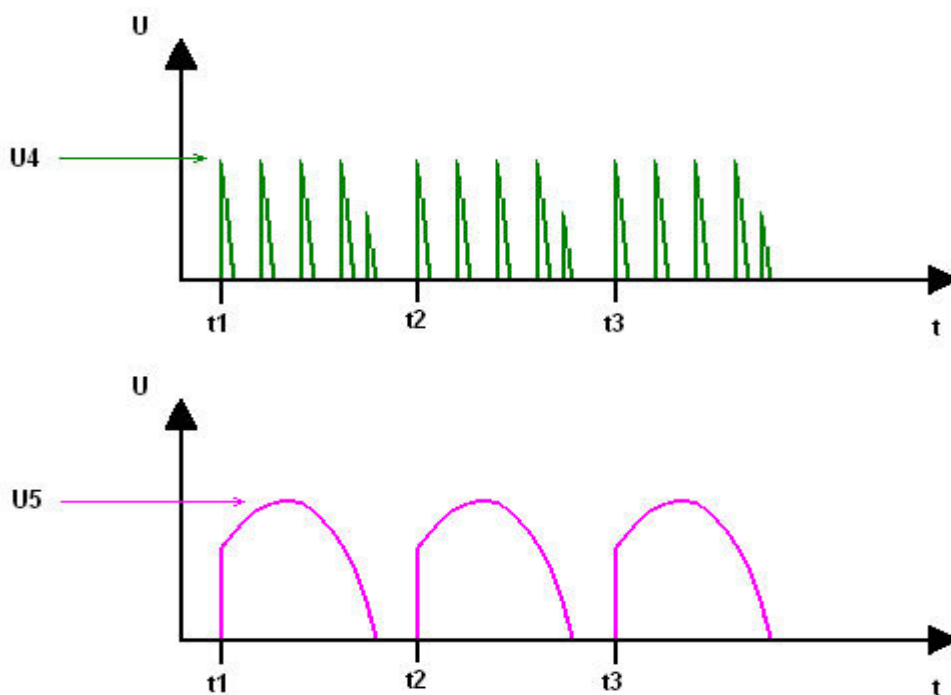
$$U_3 = U_p = \eta * U_{BB} + U_D, \text{ missä} \quad (1)$$

η = unistorin sisäinen jännitteenjakosuhde

U_{BB} = kantojen välinen jännite

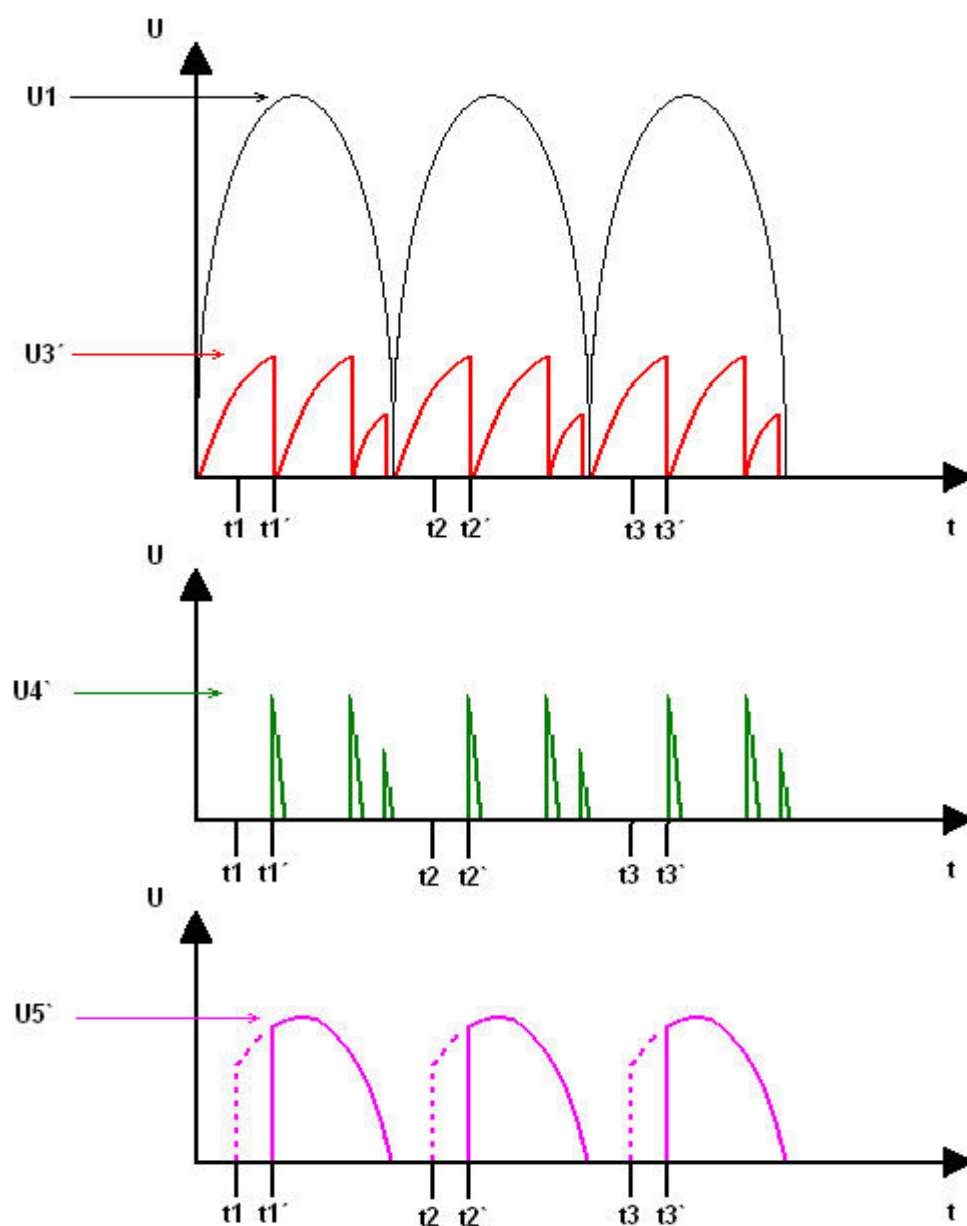
U_D = kynnsjännite

Kondensaattorilta purkautuva jännitepiikki (U_4) kulkee muuntajan kautta tyristorille ja toimii sen sytytyspulssina. Sytytyspulssi sytyttää sen tyristorin johtamaan, jolla anodin ja katodin välinen jännite on oikeassa potentiaalissa. Tyristorin johtaessa oskillaattori antaa koko ajan uusia sytytyspulsseja, mutta näillä ei ole vaikutusta sen toimintaan. Tyristori johtaa jännitettä kuormaan, kunnes sen läpi kulkeva vaihtojännite (U_5) saavuttaa nollatason (kuva 3).



Kuva 3. Tyristorin sytytyspulssit (U_4) ja tyristorilta kuormaan menevä jännite (U_5)

Tehonrajoituspiirin rajoittava toiminta perustuu värähtelypiirin värähtelyjaksojen pidentämiseen. Tyristorisillan sytyttämispulssien tiheyttä voidaan muuttaa kuvan 4 mukaisesti säätämällä unistorin edessä olevaa RC-piiriä. Säätövastusta R_s suurettamalla saadaan kondensaattorin C1 jännite latautumaan hitaammin kohti unistorin kynnyksjännitettä vastaavaa arvoa. Tämä hidastaminen saa unistorin antamaan tyristorisillan ensimmäisen syttymispulssin myöhemmin (vrt. ajanhetkiä t_1 ja t_1'). Mitä myöhemmin tyristorisilta syttyy johtamaan, sitä vähemmän tehoa välittyy kuormaan [1].



Kuva 4. Tehonrajoituspiirin jännitteet värähtelyjakson pidentämisen jälkeen (vrt. kuva 2 ja kuva 3)

2.2 Tarkkailupiirin toiminta

Tehonrajoituspiirin toisena tärkeänä osana toimii tarkkailupiiri, joka valvoo käytettävän laitteen verkosta ottaman virran määrää. Tarkkailupiirin tehtävänä on huomata nopeasti, jos laite ottaa verkosta liikaa virtaa. Tällaisen vikatilanteen sattuessa tarkkailupiirin tulee lisäksi välittää UJT-oskillaattoripiirille tieto, että kuorman ottamaa tehoa tulee rajoittaa. Kuitenkin ennen kuin virran tarkkailua tai rajoitusta voidaan tehdä, laitteesta tulee tietää virran maksimiarvo, jonka ylittamisestä on laitteelle haittaa. Lisäksi on tärkeää tietää, kuinka pitkän ajan laite kestää tämän maksimivirran ylittämistä. Siitä voimme päätellä, kuinka nopeasti tehonrajoittimen tulee toimia vikatilanteessa.

Induktiokuumentimen tapauksessa mittauksissa saatu suurin ottoteho, ilman että laite hajosi, oli 1,6 kW. Kyseisessä testitilanteessa kuumentimen kytkintransistoreita ohjattiin kuitenkin erillisellä funktiogeneraattorilla ja signaalivahvistimella. Ilman näitä apulaitteita transistorit olisivat rikkoutuneet lämmityspäätä nostettaessa. Kuumenninta käytettiin testitilanteessa verkkosähköllä (230 V).

Verkosta otetun virran maksimiarvo voidaan laskea kaavasta 2:

$$P = UI \quad \Rightarrow \quad I = \frac{P}{U} \quad (2)$$

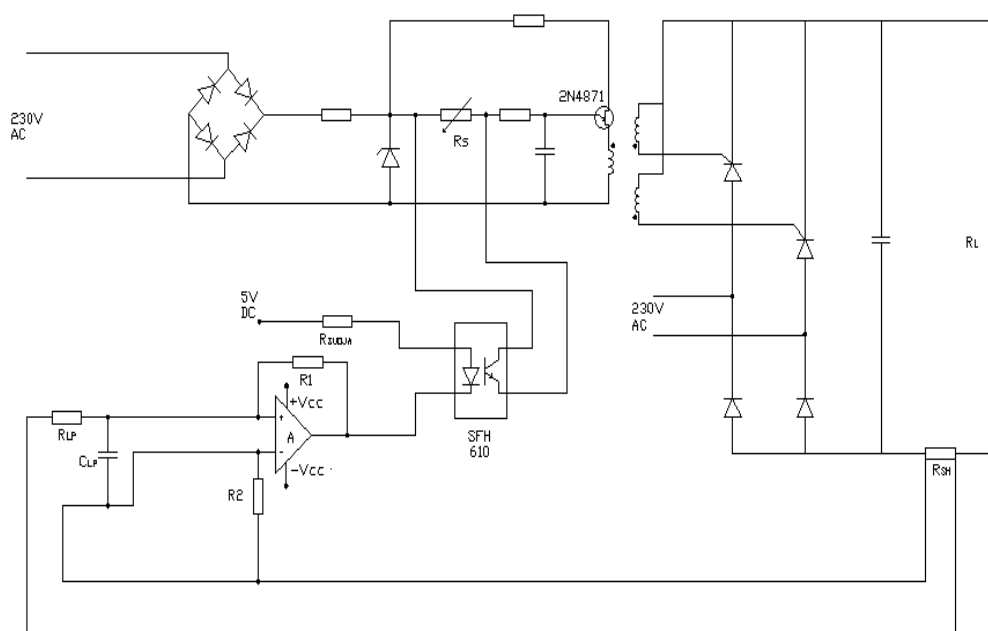
$$I = \frac{1600W}{230V} = 6,96A$$

Saatu virran maksimiarvo on kuitenkin vain suuntaa antava arvio, koska Jöksin saamat tulokset olivat apulaitteiden takia epävirallisia. Lisäksi ei myöskään voida olettaa, että verkkojännitteen arvo olisi kaikissa induktiokuumentimen käyttötilanteissa ja -paikoissa sama.

Ottovirran maksimiarvon lisäksi täytyi selvittää, kuinka kauan induktiokuumennin kestää tämän virran ylittämistä. Mahdollisten erilaisten lämmitystilanteiden määrä teki kuitenkin ajanjakson määrittämisestä erittäin vaikeaa. Pystyttiin vain arvioimaan ajan pituutta vertailemalla eri testitilanteissa todettuja kytkintransistoreiden hajoamisnopeuksia. Arvioinnin perusteella rajoituspiirin tuli pystyä vikatilanteessa rajoittamaan virran

määrää kymmenissä millisekunneissa estääkseen induktiokuumentimelle aiheutuvat pysyvät vauriot.

Tarkkailupiirin suunnittelu aloitettiin miettimällä sopivaa virranmittausmetodia. Induktiokuumentimen ottaman virran määrää päätettiin mitata kuorman kanssa sarjaan sijoitetulla pienellä shunttivastuksella (R_{SH}). Kuorman ottama virta muodostaa shuntin napoihin jännitteen, jota pystytään mittaamaan.



Kuva 5. Alustava tarkkailupiiri liitettyä tehonrajoituspiiriin

Kun tarkkailuelin oli valittu, piti miettiä miten saataisiin luotua lisää vastusta tehoa rajoittavaan piiriin. Tarvittiin komponentti, joka normaalissa tilanteessa johtaisi täysin ja vikatilanteessa (suurella virralla) ei ollenkaan. Ongelmaa ratkaisemaan valittiin optinen erotin (SFH 610). Optoerotin ollessa täysin johtavassa tilassa, värähtelypiiri ei huomaa säätövastusta R_s ja toimii normaalilla taajuudellaan. Optoerotin siirtyessä johtamattomaan tilaan, jännite ei pääse enää kulkemaan sen lävitse.

Tämän seurauksena oskillaattorin RC-piirille menevä virta ei pysty enää ohittamaan säätövastusta R_s . Säätövastuksen arvo lisätään RC-piiriin, jolloin värähtelytaajuus hidastuu ja kuorman tehon rajoittaminen käynnistyy.

Seuraavana suunnittelun vaiheena oli muokata shunttivastukselta otettu jännite siihen muotoon, että sillä voitaisiin ohjata optoerotinta. Arvioitiin, että shunttivastukselta tuleva jännite tulisi olemaan kymmeniä millivoltteja. Optoerotin täysin johtavaksi saattamiseen valittiin viiden voltin tasajännite. Tarvittiin siis vahvistusta shuntilta tulevaan jännitteeseen, jotta sen arvo riittäisi optoerotin johtamattomaksi tekemiseen. Vahvistimen vahvistus ajateltiin muokata siten, että seitsemän ampeerin virta kuormassa aiheuttaisi optoerotin siirtymisen kokonaan johtamattomaan tilaan. Operaatiovahvistimelle valittiin ei-invertoiva kytkentä, koska vahvistimen ulostulosta saatavan jännitteen tuli olla positiivinen (kuva 5).

Ei-invertoivalla kytkennällä vahvistuksen arvo saadaan kaavasta 3:

$$A_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

Tarkkailupiirin toiminnan ollessa vielä täysin hämärän peitossa, ajateltiin parhaaksi tehdä vahvistimen toiminnasta säädettävä. Säädettävyys ajateltiin toteuttaa pitämällä vastus R_1 vakiona ja laittamalla vastuksen R_2 tilalle säädettävä vastus. Näin ollen R_2 :sta suurentamalla saatiin vahvistus suuremmaksi ja päinvastoin.

Vahvistimen eteen oli myös järkevää sijoittaa alipäästösuodatin, joka suojasi piiriä häiriöiltä. Suodatin ajateltiin toteuttaa RC-piirillä, joka ohjaisi korkeat taajuudet kondensaattorin kautta maihin. Suodattimen alarajataajuuden haluttiin olevan n. 1 kHz. Mitoitus tehtiin valitsemalla vastuksen R_{LP} arvoksi 1 k Ω ja laskemalla kondensaattorin C_{LP} arvo alarajataajuuden kaavasta 4:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi f_0 R} \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{2\pi * 1kHz * 1k\Omega} = 159nF$$

3 TEHONRAJOITUSPIIRIN RAKENTAMINEN

Alustavan tehonrajoituspiirin suunnittelun jälkeen saatoimme siirtyä itse piirin rakentamiseen ja sen toiminnan testaukseen. Piirin juotostyöt ja mittaukset tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulun laboratoriotiloissa. Työn komponenttien toimittamisesta vastasi suurimmaksi osin Ellego Powertec Oy. Joitakin komponentteja jouduttiin kuitenkin tilaamaan elektroniikan komponenttien erikoisliikkeistä.

Tekijän turvallisuuden takaamiseksi piiri valmistettiin aluksi toimimaan 30 V:n vaihtojännitteellä. Kun piirin toiminta oli saatu varmistettua alemmalla jännitteellä, se voitiin muuttaa toimimaan tarvittavalla 230 V:n verkkojännitteellä. Piirin kokeiltava versio päätettiin tehdä 160 mm x 105 mm reikäpiirilevylle, jotta uusien komponenttien vaihto tai lisäys olisi helppoa. Kun piirin toimivuus olisi riittävällä tasolla, koulun piirilevyjyrsimellä voitaisiin valmistaa piirille pienempi ja häiriösuojaukseltaan parempi piirilevy. Tehonrajoituspiirin tulisi pystyä suojautumaan induktiokuumentimen synnyttämän magneettikentän lisäksi myös muilta ulkoisilta häiriöiltä. Piirin häiriönkestävyyttä pystyttäisiin testaamaan Metropolia Ammattikorkeakoulun EMC-laboratoriossa.

3.1 Tehoa rajoittavan piirin rakentaminen

Tehonrajoituspiirin valmistaminen aloitettiin tehoa rajoittavasta UJT-oskillaattoripiiristä. Oskillaattoripiiriä alettiin rakentaa reikälevylle aikaisemmin esitetyn alustavan mallin mukaan (kuva 1). Piirin ensimmäisenä pohdittavana asiana oli unistoria ohjaavan jännitteen suuruus. Unistorin ohjausjännite määräytyi piirin alkuosassa olevan zenerdiodin zenerjännitteen mukaan. Zenerdiodilla pystyttiin myös vaikuttamaan tyrystoreiden sytytyspulssien suuruuteen. Oskillaattoripiiriin valittiin 24 V:n zenerdiodi, jonka arveltiin riittävän kaikkiin tarpeisiin. Seuraavaksi zenerdiodin eteen sijoitettiin suojavastus R1. Vastuksen tehtävänä oli rajoittaa zenerdiodille tulevaa virtaa ja näin suojata sitä rikkoutumiselta. Vastus ei saa olla kuitenkaan liian suuri, jotta zenerdiodi saa tarpeeksi virtaa pysyäkseen lämpilyöntijännitealueella. Piiriin lisättiin myös varmuuden vuoksi pieni suojavastus (R2) suojaamaan unistoria liialliselta virralta (kuva 6).

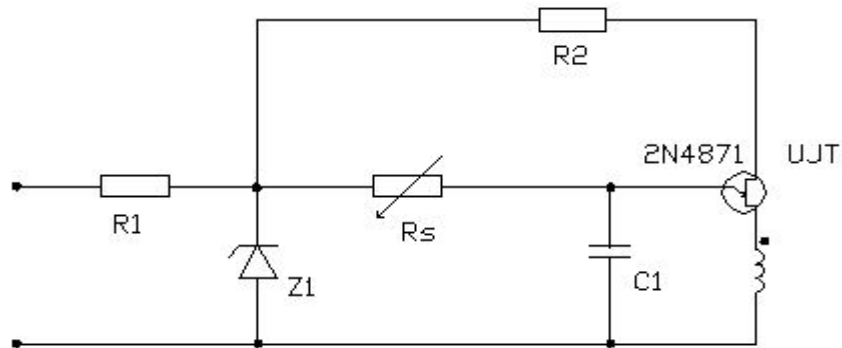
Jänniteregulaattorin rakentamisen jälkeen unistorin liipaisupiste voitiin laskea aiemmin esitetyn kaavan mukaan (liipaisujännitteelle esitetty arvot sisäisen jännitteen jakosuhteen minimi- ja maksimiarvoilla):

$$U_P = \eta * U_{BB} + U_D \quad (1)$$

$$U_{P_{MIN}} = 0.7 * 24V + 0.6V = 17.4V$$

$$U_{P_{MAX}} = 0.85 * 24V + 0.6V = 21.0V$$

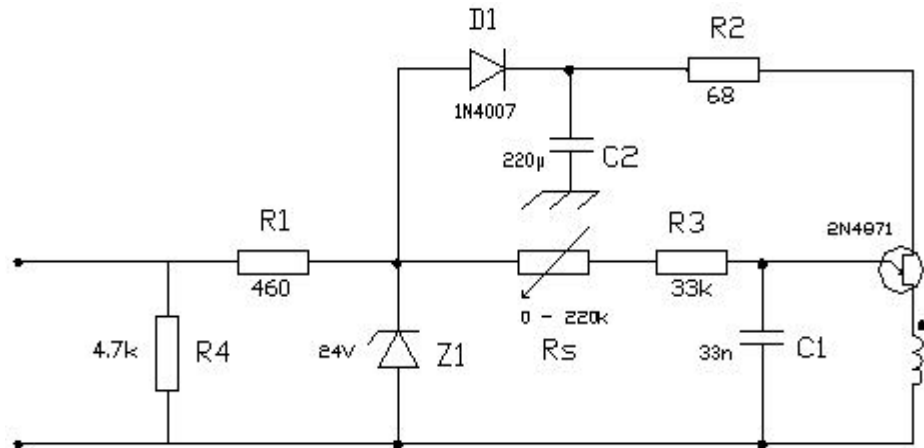
Seuraavana mietittävänä asiana oli piirin värähtelytaajuus. UJT-oskillaattorin värähtelytaajuus pystyttiin määräämään unistorin edessä olevalla RC-piirillä. Tavoitteena oli, että normaalin rajoittamattoman toiminnan aikana unistori lähettäisi pulssimuuntajalle verkkojännitteen puolijakson aikana vähintään viisi sytytyspulssia (ks. kuva 2 ja kuva 3). RC-piirin komponenttien sopivat arvot selvitettiin kokeilemalla. Aluksi piiriin valittiin suunnilleen sopivaa kokoluokkaa oleva kondensaattori. Tämän jälkeen kuvassa 6 nähtävällä säätövastuksella R_s pystyttiin kätevästi muuttamaan värähtelytaajuutta ilman komponenttien vaihtoa.



Kuva 6. Värähtelypiirin ensimmäinen versio

Testitilanteessa vastaan tuli kuitenkin ongelmia. Unistori ei jostain syystä suostunut siirtymään johtavaan tilaan ja tyhjentämään kondensaattorin varausta pulssina muuntajalle. Ongelmaa selvittämään rakennettiin erilliselle reikälevylle unistorin datalehdellä oleva testikytkentä. Testikytkentä toimi mainiosti, joten transistorin tiedettiin olevan ehjä. Värähtelypiirin vika pyrittiin tämän jälkeen paikallistamaan etsimällä eroavaisuuksia testikytkennän kanssa. Hetken tutkinnan jälkeen piireistä löydettiin eroavaisuus. Testikytkennässä unistorin ylemmälle kannalle (B2) tuli täysin tasainen

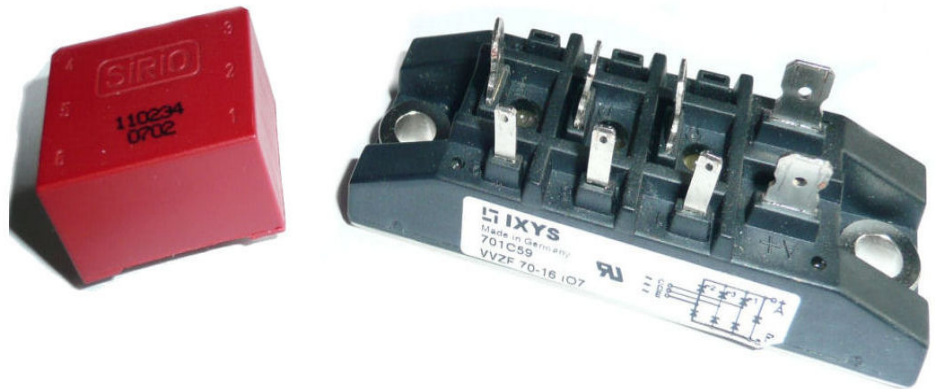
jännite, kun taas värähtelypiirissä jännite tuli zenerdiodilta palkkimaisena. Värähtelypiirissä jännite saatiin tasoitetuksi lisäämällä vastuksen R2 eteen kohtalaisen suuri kondensaattori (220 μ F). Lisäksi piiriin sijoitettiin diodi D1 ja vastus R4 estämään piirin toimintaa häiritsevien tasajännitteiden syntymistä. Muutosten jälkeen UJT-oskillaattori alkoi toimia toivotulla tavalla.



Kuva 7. Värähtelypiirin toinen versio

Kun värähtelypiirin toiminta oli saatu toivotulle tasolle, voitiin RC-piirin mitoitus jatkua. Säätoivastusta pienentämällä sytytyspulslien määrä lisääntyi, ja suurentamalla ne saatiin jopa poistumaan kokonaan. Sopivan vastusarvon (33k Ω) löydyttyä piiriin lisättiin arvoa vastaava kiinteä vastus (R3). Tämän jälkeen säätoivastus säädettiin nollassi, jotta se ei vaikuta aikavakioon. Säätoivastus säilytettiin kuitenkin kytkennässä, koska sitä tarvittaisiin myöhemmin tarkkailupiiriin liittämisen yhteydessä (kuva 7).

Seuraavana rakennusvaiheena oli lisätä piiriin sopiva pulssimuuntaja ja tyristorisilta. Pulssimuuntajassa tuli olla kaksi toisiota, jotta tyristorisillan molempia tyristoreita voitaisiin ohjata. Pulssimuuntajaksi valittiin Sirio TI/110 234, joka on erityisesti suunniteltu tyristoreiden sytyttämiseen. Valittu pulssimuuntaja oli muuntosuhteeltaan 3:1:1, joten tyristoreille välittyi kolmannes ensiöön tulevasta virrasta. Tämän virran uskottiin kuitenkin riittävän sytyttämään tyristorisillan tyristorit.



Kuva 8. Pulssimuuntaja Sirio TI/110 234 ja tyristorisilta IXYS VVZF70

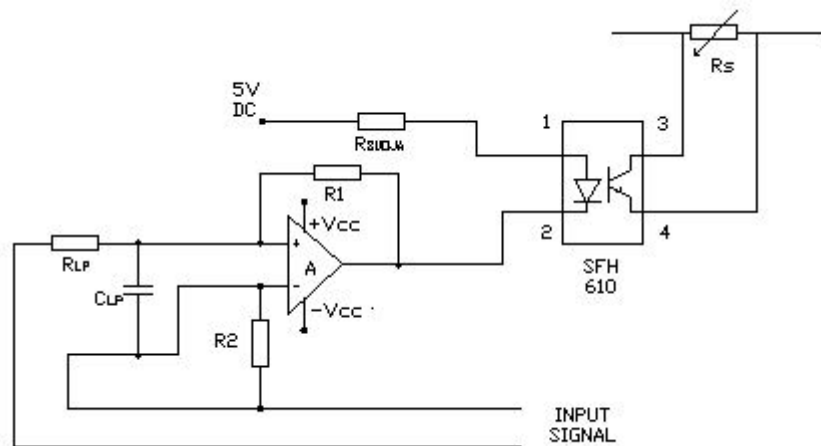
Ellego Powertec Oy toimitti pulssimuuntajan lisäksi myös piiriin tarkoitetun tyristorisillan. Alkuperäisen suunnitelman mukaan piirissä tyristorisillan tuli olla kaksivaiheinen. Toimitettu tyristorisilta IXYS VVZF70 oli kuitenkin suunniteltu kytkettäväksi kolmivaiheisiin järjestelmiin. Ylimääräisen vaiheen ei uskottu kuitenkaan aiheuttavan ongelmia, jos se vain jätettiin kytkemättä.

Pulssimuuntajan lisäys piiriin sujui mutkattomasti, ja sen toiminta oli odotusten mukaista. Oskillaattoriipiirin luomat sytytyspulssit pysyivät muodossaan, ja ne saatiin hyvin välitettyä eteenpäin tyristorisillalle. Seuraavana vaiheena oli tyristorisillan lisääminen kytkentään. Testausvaiheessa kuitenkin huomattiin, etteivät sytytyspulssit saaneet tyristoreita syttymään. Pitkän pohdinnan jälkeen ongelman ajateltiin johtuvan tyristorisillasta. Sillan arveltiin olevan kytkentään liian järeä, sillä sen virrankesto oli kymmenkertainen (70 A) piirin tarpeisiin nähden. Suuren virrankeston myötä tyristorisillan sytyttämiseen tarvittava pulssi oli myös arveltua suurempi. Ongelman ratkaisemiseksi päätettiin tilata virrankestoaltaan pienempi tyristorisilta. Uuden tyristorisillan toimitusajan venyessä pitkäksi, tehonrajoituspiirin rakentamista päätettiin jatkaa tarkkailupiiristä.

3.2 Tarkkailupiirin rakentaminen

Sopivan tyristorisillan puuttuessa tarkkailupiirin sisääntuloa ei voitu rakentaa alustavan suunnitelman mukaan (ks. kuva 5). Ongelmasta johtuen tarkkailupiirin rakentaminen aloitettiin vahvistinkytkennästä ja sisääntulosignaali jouduttiin luomaan keinotekoisesti. Vahvistimeksi valittiin

rail-to-rail-tyyppinen TS924, jossa on yhdessä kotelossa neljä operaatiovahvistinta. Vahvistimen tehtävänä oli vahvistaa shuntilta saatava sisääntulosignaali optoerottimen sulkemiseen riittävään viiden voltin arvoon. Optoerottimen ledille tuleva viiden voltin referenssijännite ja vahvistimen käyttöjännite päätettiin luoda aluksi testitilanteeseen laboratorion tasajännitelähteellä. Vahvistimen keinotekoinen sisääntulosignaali päätettiin luoda signaaligeneraattorilla. Tarkkailupiirin toimintaa voitaisiin tällöin tarkastella erimuotoisilla sisääntulosignaaleilla.



Kuva 9. Tarkkailupiirin ensimmäinen versio

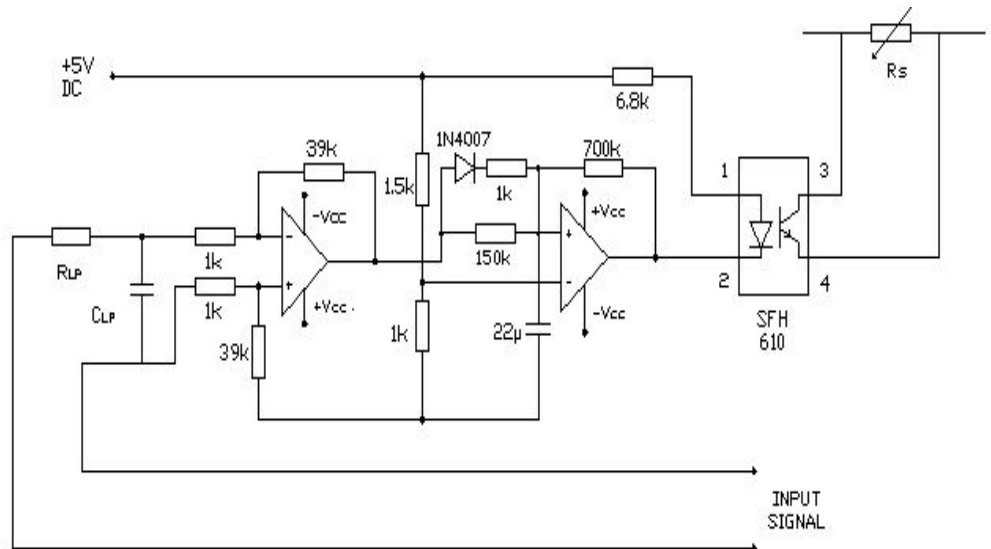
Kuvassa 9 esitellyn tarkkailupiirin ensimmäisen version testaaminen aloitettiin optoerottimen toiminnasta. Testitilanteessa optoerotin saatiin luotua täysin johtavaksi eli tehoa rajoittava kytkentä ei huomannut ollenkaan säätövastuksen R_s olemassaoloa. Optoerottimen toiminnan ollessa toivottua pystyttiin testaamaan sisääntulosignaalin vaikutuksia tarkkailupiirin toimintaan. Tarkkailupiirin vahvistimen vahvistus säädettiin n. 100-kertaiseksi. Tämän jälkeen piiriin alettiin syöttää signaaligeneraattorilla sinimuotoista sisääntulosignaalia. Signaalia kasvatettiin hitaasti ja samalla huomattiin, kuinka optoerottimen napojen 1 ja 2 välinen jännite alkoi pienentyä. Ledin jännitteen pienentyessä, optoerottimen fototransistori päästi yhä vähemmän jännitettä lävitseen. Jännite joutui nyt kulkemaan säätövastuksen R_s lävitse, jolloin vastus tehoa rajoittavassa piirissä lisääntyi. Resistanssin kasvu johti tehoa rajoittavan piirin luomien syytyspulsseiden tasaiseen vähenemiseen. Sisääntulosignaalin ollessa n. 50 mV:n luokkaa, syytyspulsseja ei syntynyt enää ollenkaan. Piiri toimi siis täysin odotusten mukaisesti. Vaihtamalla sisääntulosignaali kantiaalloksi

pystyttiin testaamaan, kuinka nopeasti optoerottimen tilaa pystyttiin muuttamaan. Testien perusteella nopeuden arveltiin riittävän hyvin tarpeisiin.

Alustavan tarkkailupiirin rakentamisen ja testauksen jälkeen oli järkevää pohtia, miten hyvin tehoa rajoittava piiri ja tarkkailupiiri toimivat yhdessä ja kuinka toimiva koko tehonrajoituspiiri oli induktiokuumentimen vian ratkaisuun. Nykyisessä kunnossaan tehonrajoituspiiri saisi todennäköisesti estettyä induktiokuumentimen kytkintransistoreiden rikkoutumisen, mutta kuumentimen teho rajoittuisi myös normaaleissa lämmitystilanteissa. Ongelma johtui siitä, että tarkkailupiiri lisäsi vastusta tehoa rajoittavaan piiriin jo alemmilla kuormavirroilla. Induktiokuumentimen toiminnan ennenaikainen rajoittaminen oli turhaa, ja lisäksi se tulisi vähentämään kuumentimen lämmitystehoa. Ongelmasta johtuen tarkkailupiiri tuli muuttaa päälle/pois-tyyppiseksi eli kuumentimen tehoa rajoitettaisiin ainoastaan tietyn kuormavirran ylittämisen jälkeen.

Lyhyen tarkastelun jälkeen tehonrajoituspiiristä löytyi myös toinen epäkohta, joka vaati tarkempaa tutkimista. Piirin kaksiosaisuudesta johtuen, se sisälsi myös kaksi maapistettä. Näiden maapisteen välillä olisi todennäköisesti potentiaaliero, joka saattaisi häiritä piirin toimintaa. Ongelman ratkaisemiseksi tarkkailupiiri ja tehoa rajoittava piiri tuli galvaanisesti erottaa toisistaan muuntajan avulla.

Vääränlaisen toiminnan seurauksena tarkkailupiirin rakennetta tuli miettiä uudelleen. Oli selvää, että kytkentä ei vastannut tarpeita induktiokuumentimen suhteen. Kytkennän muuttaminen hitaasti vastusta lisäävästä päälle/pois-tyyppiseksi tarkoitti sitä, että piiristä tulisi hiukan monimutkaisempi. Monimutkaisemman rakenteen ei kuitenkaan arveltu suurentavan piirin ulkomittoja ratkaisevasti.



Kuva 10. Tarkkailupiirin toinen versio

Aluksi vanhan tarkkailupiirin vahvistin päätettiin muuttaa differentiaaliseksi. Differentiaalisena vahvistin ei käyttäisi tyristorisiltan yhteydessä olevaa sisääntuloa maapotentiaalina. Yhteyspisteet tehoa rajoittavan piirin kanssa vähentyivät, ja piirien välinen erotus tuli näin paremmaksi. Differentiaalisen vahvistinasteen tarkoituksena on vahvistaa sisääntulojen välistä jänniteeroa. Jotta tarkkailupiiri saataisiin muutettua päälle/pois-tyyppiseksi, täytyi siihen lisätä myös toinen vahvistinaste. Tämän vahvistimen tuli toimia tarkkailupiirin kytkimenä. Tehtävää suorittamaan valittiin kuvassa 10 nähtävä komparaattorikytkentä, joka vaihtaa tilaansa tulojännitteen mukaan. Komparaattori on jännitevertailija, joka vertailee sisääntulojännitteitään. Positiivisen tulon jännitteen ollessa suurempi, vahvistimen lähtö on suurimmassa mahdollisessa arvossaan (+Vcc). Jos taas negatiivisen tulon jännite on suurempi, vahvistimen lähtö on pienimmässä mahdollisessa arvossaan (-Vcc).

Optoerotinta sulkemaan tarvittiin komparaattori, joka normaalitilassa antaa ulos -5 V ja tietyn sisääntulojännitteen ylitettyä antaa ulos +5 V. Jotta komparaattorin lähtö olisi normaalitilassa pienimmässä mahdollisessa arvossaan, negatiivisen sisääntulon tuli olla korkeammassa potentiaalissa kuin positiivinen sisääntulo. Vaatimuksen toteuttamiseksi vahvistimen negatiiviseen sisääntuloon rakennettiin jännitejaon avulla kahden voltin referenssijännite. Komparaattorin ulostulon negatiivinen tila kasvatti optoerotimen ledin jännitettä puolella. Lisääntyneen jännitteen seurauksena

optoerottimen ledin virtaa tuli rajoittaa. Optoerottimen ledin anodin eteen lisättiin 6.8 kΩ:n vastus, jolla virta saatiin pudotettua sopivalle tasolle.

Seuraavaksi komparaattoriin lisättiin positiivinen takaisinkytkentä. Positiivisen takaisinkytkennän avulla komparaattoriin muodostuu kytkentävälystä eli hystereesiä. Hystereesin takia komparaattorin tilan muuttamiseen tarvitaan suurempi erojännite. Komparaattorin liipaisujännitteiden arvot saadaan kaavasta 5:

$$\begin{aligned} U_{\max} &= U_{ref} + B(U_{out(+)} - U_{ref}) \\ U_{\min} &= U_{ref} - B(U_{ref} - U_{out(-)}) \end{aligned}, \text{ missä} \quad (5)$$

$U_{out(+)}$ = komparaattorin positiivinen lähtöjännite

$U_{out(-)}$ = komparaattorin negatiivinen lähtöjännite

U_{ref} = Ulkoinen referenssijännite

$$B = \frac{R1}{R1 + R2}; \text{ kerroin}$$

$$B = \frac{150k\Omega}{150k\Omega + 700k\Omega} = 0.176$$

$$U_{\max} = 2V + \frac{150k\Omega}{850k\Omega} (5V - 2V) = 2.529V$$

$$U_{\min} = 2V - \frac{150k\Omega}{850k\Omega} (2V - (-5V)) = 0.765V$$

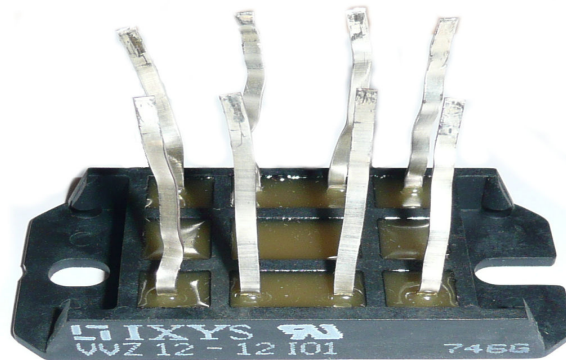
Liipaisujännitteistä voitiin päätellä, että komparaattorin positiiviseen tilaan muuttamiseen vaadittiin vähintään U_{\max} arvoinen jännite vahvistimen positiiviseen sisääntuloon. Lisäksi komparaattori vaihtoi tilansa aina negatiiviseksi, kun positiivisen sisääntulon jännite laski alle U_{\min} arvon. Hystereesillä saatiin siis luotua välystä ja hitautta tehonrajoituspiirin tilan vaihtoon palautumistilanteessa.

Hystereesistä huolimatta tarkkailupiirin arveltiin palautuvan normaalitilaan liian nopeasti. Jos tarkkailupiiri pystyi palautumaan vikatilanteen ollessa vielä käynnissä, tehonrajoituspiirin toiminnassa seuraisi ikävää pomppimista rajoitustilan ja normaalitilan välillä. Ongelman välttämiseksi tarkkailupiirin toiminnan tuli olla vikatilanteessa nopeaa, mutta palautumistilanteessa hidasta. Halutun toiminnan aikaansaamiseksi komparaattorin positiivisen sisääntulon eteen lisättiin kondensaattori. Komparaattori ei siten voisi

vaihtaa tilaansa ennen kuin kondensaattori oli ladattu tai purettu. Vikatilanteessa kondensaattori latautuisi nopeasti 1 k Ω :n vastuksen kautta, joten komparaattorin tila vaihtuisi nopeasti. Kytkentään lisätty diodi estäisi palautumistilanteessa kondensaattorin purkautumisen 1 k Ω :n vastuksen kautta. Kondensaattori joutuisi tyhjentämään varauksensa tällöin hitaasti 150 k Ω :n vastukseen. Komparaattorin positiivisen sisääntulon potentiaalin putoaminen kestäisi näin ollen pidempään. Viiveen seurauksena komparaattori vaihtaisi tilaansa positiivisesta negatiiviseksi paljon aiempaa hitaammin. Kytkennän kondensaattori mitoitettiin siten, että komparaattorin tilan palautuminen kestäisi vähintään yhden sekunnin. Rakennetun palautumisviiveen myötä tehonrajoituspiirin reagointi vikatilanteisiin oli saatu toivotunlaiseksi (kuva 10).

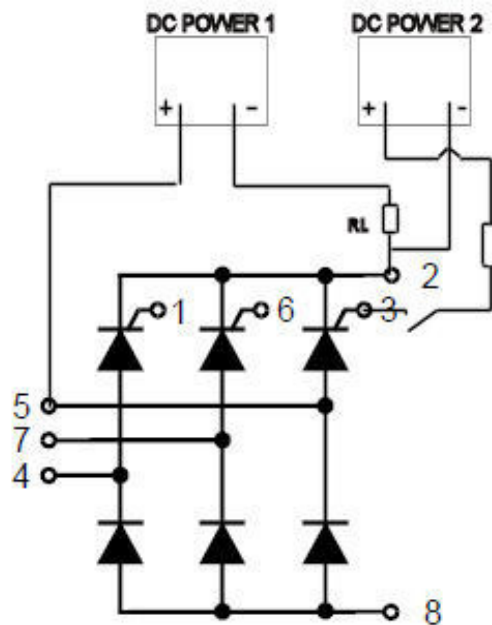
3.3 Tyristorisillan lisääminen kytkentään

Toimivan tarkkailupiirin rakentamisen jälkeen voitiin siirtyä tutkimaan tyristorisiltaan liittyviä ongelmia. Aikaisemmin oli havaittu, etteivät värähtelypiirin luomat pulssit saaneetkaan tyristorisiltaa syttymään. Ongelmaa ratkaisemaan oli tilattu Saksasta uudet virrankestoltaan pienemmät tyristorisillat, joiden arveltiin syttyvän helpommin.



Kuva 11. Tyristorisilta IXYS VVZ12


Uudentyyppinen tyristorisilta liitettiin rakennettuun värähtelypiiriin, jonka jälkeen sen toimintaa voitiin testata. Pettymys oli kuitenkin valtava, kun testeissä havaittiin, että uusi tyristorisilta toimi yhtä huonosti kuin vanhakin. Sytytyspulssit eivät saaneet siltaa syttymään eikä toivottua jännitemuotoa siis välittänyt kuormaan. Ongelman ei uskottu johtuvan sytytyspulssista, koska niiden katsottiin olevan tarpeeksi voimakkaita. Tyristorisillan toimintaa päätettiin todentaa yksinkertaisemmalla testikytkennällä.



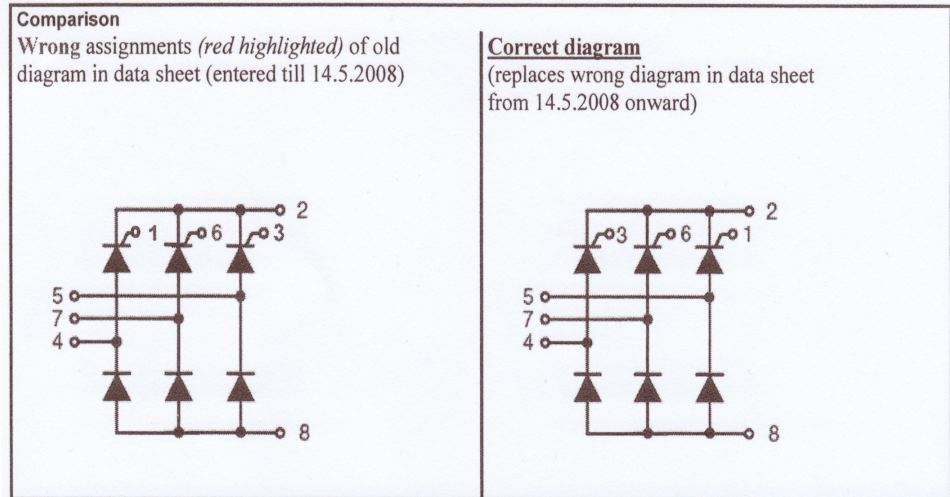
Kuva 11. Tyristorisillan testikytkentä

Kuvan 11 mukaisessa testikytkennässä tyristorisillan ohjaukseen käytetään kahta tasajännitelähdettä, joista toinen antaa kuormalle jännitteen ja toisen avulla pyritään sytyttämään tyristori. Alkutilanteessa tyristoria sytyttävän tasajännitelähteen positiivinen napa pidetään irti tyristorin hilasta. Hilan ja katodin välisen jännitteen ollessa nollassa, kuormaan ei välity virtaa. Kun hilalle kytketään jännite, tyristorin tulee siirtyä johtavaan tilaan. Liipaisun jälkeen tyristorin tulee antaa virtaa kuormaan, kunnes sen läpi kulkeva virta putoaa lähelle nolaa tai sen yli oleva jännite muuttuu estosuuntaiseksi. Testikytkennän tapauksessa tämä tarkoittaa sitä, että tyristorin tulee johtaa siihen asti, kunnes kuormalle jännitettä antava tasajännitelähde irrotetaan kytkennästä.

Yksinkertaisella testikytkennällä testattiin, kuinka hyvin tilatut tyristorisillat toimivat. Testeissä havaittiin, että tilattujen kolmivaiheisten siltojen toiminnassa oli vikaa. Vain siltojen keskimäinen vaihe suostui liipaisumaan testikytkennän avulla odotusten mukaisesti. Ongelman mystisyyden vuoksi tyristorisillat päätettiin lähettää testeihin Ellego Powertec Oy:hyn. Diagnoosin ollessa samankaltainen aiemman kanssa, tyristorisillat päätettiin lähettää takaisin valmistajan tehtaalte. Viikkojen odotuksen jälkeen samat tyristorisillat lähetettiin takaisin. Paluuviestissä kerrottiin, että tyristorisiltojen datalehden kytkentäkuvassa oli virhe, jonka takia siltoja ei saatu toimimaan.

	8D-Report Q 7705		
	page 2/2		
RMA#	Q 7706	Date:	19.5.2008
		Opened:	7.5.2008

Analysis Protocol/Analysebericht



Kuva 12. Korjaus datalehden kytkentäkuvaaan (väärä vasemmalla ja korjattu oikealla)

Valmistajan lähettämästä oikaisuviestistä voidaan havaita, että tyristorien hilat 1 ja 3 ovat vaihtaneet kuvassa paikkaansa. Korjauksen perusteella on helppo ymmärtää, miksi vain keskimäinen hiloista toimi testeissä oikein. Tilanne oli todella harmittava, sillä paljon aikaa oli valunut hukkaan yritettäessä saada tyristorisilta toimimaan virheellisellä kytkentäkuvalla. Menetettyä aikaa ei kuitenkaan auttanut jäädä suremaan, koska virhe datalehdessä oli hyvin ennalta-arvaamaton.

Tyristorisillan uudet testit aloitettiin aiemmin esitetyllä testikytkennällä (kuva 11). Korjatun kytkentäkuvan (kuva 12) avulla silta saatiin toimimaan toivotulla tavalla. Kaikki kolme tyristoria saatiin liipaistua, ja ne jäivät johtavaan tilaan niin kuin oli odotettu. Seuraavaksi tyristorisillan toimintaa päätettiin todentaa vaihtamalla testikytkennän sytyttävän jännitelähteen tilalle tehonrajoituspiirin pulssimuuntaja-annot. Näin pystyttiin testaamaan, riittäisivätkö värähtelypiirin luomat sytytyspulssit tyristorien liipaisuun. Testeissä silta toimi aivan yhtä hyvin kuin kahdella jännitelähteelläkin, joten sytytyspulssit olivat tarpeeksi voimakkaita. Tyristorisillan toimivuutta voitiin nyt lähteä kokeilemaan ilman ulkoisia jännitelähteitä. Tehonrajoituspiirin syöttöjännitteen ollessa vain 30 V, tyristorisillan kuormana käytettiin hyvin pientä vastusta. Pienen vastuksen avulla virta saatiin pidettyä korkeana,

jolloin tyristori saatiin pysymään liipaisun jälkeen johtavassa tilassa. Suuren virran takia kuormavastuksena jouduttiin käyttämään tehovastuksia. Testeissä tyristorisilta saatiin liipaistua ja kuorman yli vaikuttavan jännitteen muoto oli samanlainen kuin aikaisemmin oli toivottu (ks. kuva 3). Kolmivaiheinen tyristorisilta toimi hyvin kaksivaiheiseksi kytkettynä. Silta tasasuuntasi siihen johdetun vaihtojännitteen, jolloin kuormaan saatiin syötettyä jännitettä jokaisella puolijaksolla. Tyristorisilta oli vihdoin saatu toimimaan, joten tehonrajoituspiirin rakentamisessa voitiin edetä.

3.4 Tehonrajoituspiirin muuttaminen toimimaan verkkovirralla

Tähän asti tehonrajoituspiiriä oli syötetty verkkomuuntajalla tuotetulla 30 V:n vaihtojännitteellä ja ulkoisilla tasajännitelähteillä. Valmiin kytkennän tarkoituksena oli kuitenkin toimia 230V:n verkkojännitteellä. Kun piirin toiminta oli saatu varmistettua alemmalla vaihtojännitteellä, voitiin piiri nyt muuttaa kestävämpään verkkojännitteeseen. Tavoitteena oli, että kaikki piirin tarvitsemat vaihto- ja tasajännitteet saadaan muokkaamalla tuotettua verkkojännitteestä. Tehonrajoituspiirin sisääntulo pyrittiin muokkaamaan siten, että pienet erot verkkojännitteen laadussa eivät vaikuttaisi piirin toimintaan.

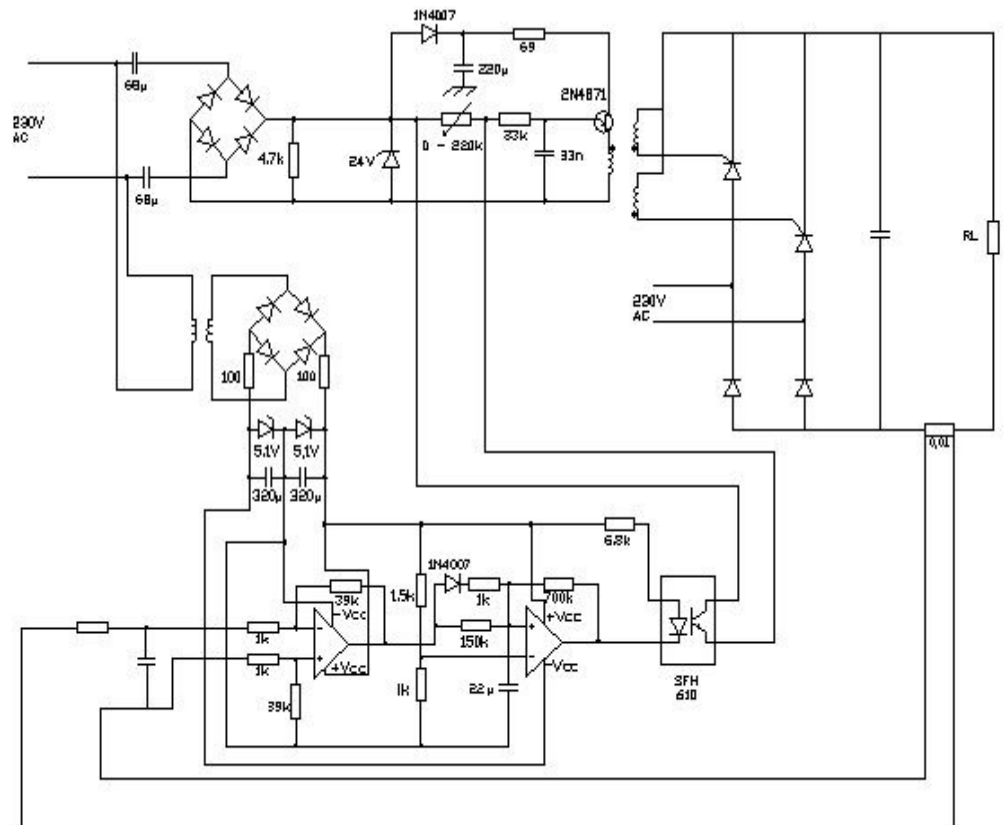
Sisääntulojännitteen muuttuessa moninkertaiseksi täytyi piirin edessä olevaa rajoitusta parantaa. Ilman parannuksia jännitteen mukana lisääntyvä virta tuhoaisi komponentteja. Kytkennän muuttaminen aloitettiin värähtelypiirin sisääntulosta. Värähtelypiirin tasasuuntaajan sisääntuloihin sijoitettiin sarjaan 68 μF :n kondensaattorit, joiden tehtävänä oli rajoittaa virtaa. Kondensaattorit vastaisivat toiminnaltaan sarjavastuksia, koska pienellä taajuudella niiden kapasitiivinen reaktanssi on suuri. Piirin valittujen kondensaattoreiden tuottama kapasitiivinen reaktanssi voidaan laskea kaavasta 6:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (6)$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi * 50\text{Hz} * 680\text{nF}} = 4,7\text{k}\Omega$$

Valituilla kondensaattoreilla saatiin juuri sopivankokoinen rajoitus aikaan, joten värähtelypiiriä pystyttiin nyt syöttämään verkkovirralla.

Seuraavana tehtävänä oli luoda verkkovirrasta sopivat tasajännitteet ja värähtelypiiristä erotettu maapotentiaali tarkkailupiiriin. Tarkkailupiirissä tasajännitteitä tarvittiin vahvistimien käyttöjännitteisiin, komparaattorin referenssijännitteeseen ja optoerottimen johtavaksi tekemiseen. Lisäksi tarkkailupiirin tuli olla galvaanisesti erotettu värähtelypiiristä. Hyvän galvaanisen erotuksen aikaansaamiseksi piirien väliin päätettiin lisätä muuntaja. Kyt kentään valittiin muuntaja, jonka avulla 230 V:n verkkojännite saatiin pudotettua 20 V:n vaihtojännitteeksi.



Kuva 13. Tehonrajoituspiiri syöttöjännitteiden lisäämisen jälkeen

Muuntajan syöttämä alennettu vaihtojännite tasasuunnattiin tasasuuntaussillan avulla. Kokoaaltotasasuunnattu jännite johdettiin kytkentään, jossa kahdella zenerdiodilla poistettiin jännitteestä huiput ja jaetaan se kahteen eri puoleen. Zenerdiodien luomat n. viiden voltin jännitteet tasoitettiin tasajännitteiksi kahden kondensaattorin (320 μ F) avulla. Jaon avulla pystytään muodostamaan negatiivisen ja positiivisen tasajännitteen lisäksi myös maapotentiaali kondensaattoreiden väliin. Kyt kentään lisättiin vielä kaksi 100 Ω :n vastusta, joilla suojattiin

zenerdiodeita liialliselta virralta. Koska värähtelypiirin maapotentiaali saatiin muuntajan kautta, se oli hyvin erotettu värähtelypiiristä (kuva 13).

3.5 Tehonrajoituspiirin toiminnan testaus

Ennen tehonrajoituspiirille tehtäviä varsinaisia mittauksia oli hyvä varmistaa, että rakennettu piiri toimi toivotulla tavalla. Testeissä värähtelypiirin ja tarkkailupiirin syöttöjännitteet otettiin suoraan valtakunnan verkosta. Tyristorisillan syöttöjännitettä nostettiin hitaasti ja tarkkailtiin, miten piiri toimi normaalitilassa ja rajoitustilanteessa. Selkeämmän rajoitustilanteen aikaansaamiseksi kuorman virtaa tarkkailevan vastuksen kokoa kasvatettiin (0.47Ω). Rajoitustilanne saataisiin tällöin aikaan alemmalla jännitteellä ja tarkkailuvastuksen yli vaikuttavat häiriöt pienemmiksi.

Testeissä havaittiin, että normaalitilassa piiri toimi kuten oli suunniteltu. Tyristorisilta saatiin sytytettyä hyvin, ja kuormalle välittyi lähes optimaalisen muotoinen jännite. Testeissä voitiin siis siirtyä tutkimaan piirin toimintaa rajoitustilanteessa. Tyristorisillan jännitettä kasvatettiin hitaasti, kunnes rajoitustilanteeseen riittävä jännite saatiin aikaiseksi tarkkailuvastukseen. Keinotekoisien rajoitustilanteiden luomisen jälkeen tarkkailupiiri alkoi odotetusti katkoa tyristorisillan sytytyspulsseja. Katkomistahdin huomattiin kuitenkin olevan aivan liian nopea. Nopean rajoitustahdin takia kuorman jännite ei ehtinyt pudota kovinkaan paljon rajoitustilanteiden välissä. Ongelmasta johtuen kuorman jännite pysyi rajoituksesta huolimatta hyvin korkeana. Piirin toiminta ei siis ollut vieläkaan toivotulla tasolla, joten kytkentää tuli muuttaa.

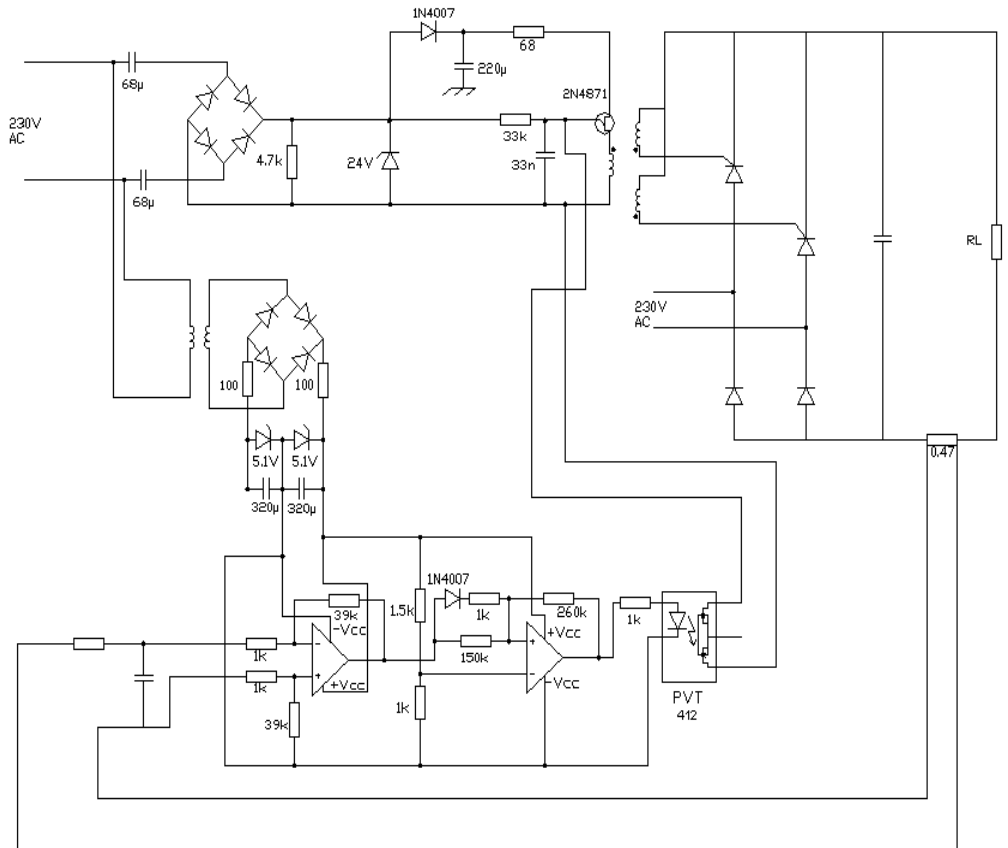
Lyhyen tutkimisen jälkeen havaittiin, että unistorin hilalle syntyi rajoitustilanteessa epämääräisen muotoisia jännitepulsseja. Pulssit saivat unistorin liipaistumaan liian usein, jolloin turhia sytytyspulsseja välittyi tyristorisillalle. Ongelman ehkäisemiseksi optoerottimen toimintaa päätettiin muuttaa. Värähtelypiiriin vastusta lisäävä kytkentä päätettiin vaihtaa kytkentään, joka rajoitustilanteessa oikosulkee unistorin hilan maapotentiaaliin. Kytkennän aikaansaamiseksi optoerottimen toiminta tuli muuttaa päinvastaiseksi kuin aikaisemmin. Normaalitilassa optoerottimen tuli toimia suurena vastuksena ja rajoitustilanteessa sen piti pystyä luomaan oikosulku. Kytkennän muuttamisen jälkeen huomattiin, ettei optoerotin ollessaan auki pystynyt luomaan tarpeeksi suurta vastusta, jolloin unistorin

ohjauspulssit vuotivat normaalitilassa optoerottimen läpi maihin. Ongelman ratkaisemiseksi optoerotin tuli vaihtaa ominaisuuksiltaan parempaan komponenttiin. Tehtävää suorittamaan valittiin valo-ohjattu rele (PVT412).

Valo-ohjatun releen avulla värähtelypiiri saatiin toimimaan normaalitilassa hyvin, mutta rajoitustilassa oli vieläkin ongelmia. Unistorille välittyi vieläkin liian usein ohjauspulsseja, jolloin kuorman jännite ei ehtinyt rajoittua tarpeeksi. Pohdinnan jälkeen unistorille välittyvien pulssien ei enää arveltu olevan vain ylimääräisiä häiriöitä, vaan vian lähde löytyi todennäköisesti tarkkailupiirin toiminnasta.

Tarkkailupiirin toiminnan perusteellisen tutkimisen jälkeen ongelman syy löytyi. Tarkkailupiirin komparaattorin eteen rakennettu kytkentä, jonka tarkoituksena oli luoda piiriin palautumisviivettä, ei toiminut. Palautumisviiveen luonti onnistui vain ensimmäisen rajoitustilan aikana. Seuraavien rajoitustilojen välissä komparaattori jäi heilumaan positiivisen ja negatiivisen tilan välille, jolloin värähtelypiirin toiminnan rajoittaminen toimi katkonaisesti. Katkonaisen rajoittamisen takia unistorille pääsi syntymään ylimääräisiä ohjauspulsseja. Kiusallisen ongelman ratkaisemiseksi palautumisviivettä luomaan ajateltu kondensaattori päätettiin poistaa kytkennästä ja viive pyrittiin saamaan aikaiseksi muilla keinoilla.

Tarkkailupiirin komparaattoriin oli jo aikaisemmin tehty hiukan kytkentävälystä (hystereesiä), jonka tarkoituksena oli luoda hitautta piiriin. Tehonrajoituspiirin tarvittava palautumisviive pyrittiin saamaan aikaiseksi lisäämällä komparaattoriin kytkentävälystä. Kytkentävällys muokattiin vastuksia vaihtamalla niin suureksi, että komparaattorin sisääntulojännite joutui putoamaan melkein nollassa, ennen kuin tilan vaihtaminen oli mahdollista. Kytkennän muuttamisen jälkeen tehonrajoituspiirin rajoitustila saatiin kestämään noin puoli sekuntia. Palautumisviiveen arveltiin olevan tarpeeksi pitkä, jotta ikävä hyppiminen normaali- ja rajoitustilan välillä saataisiin ehkäistyä.

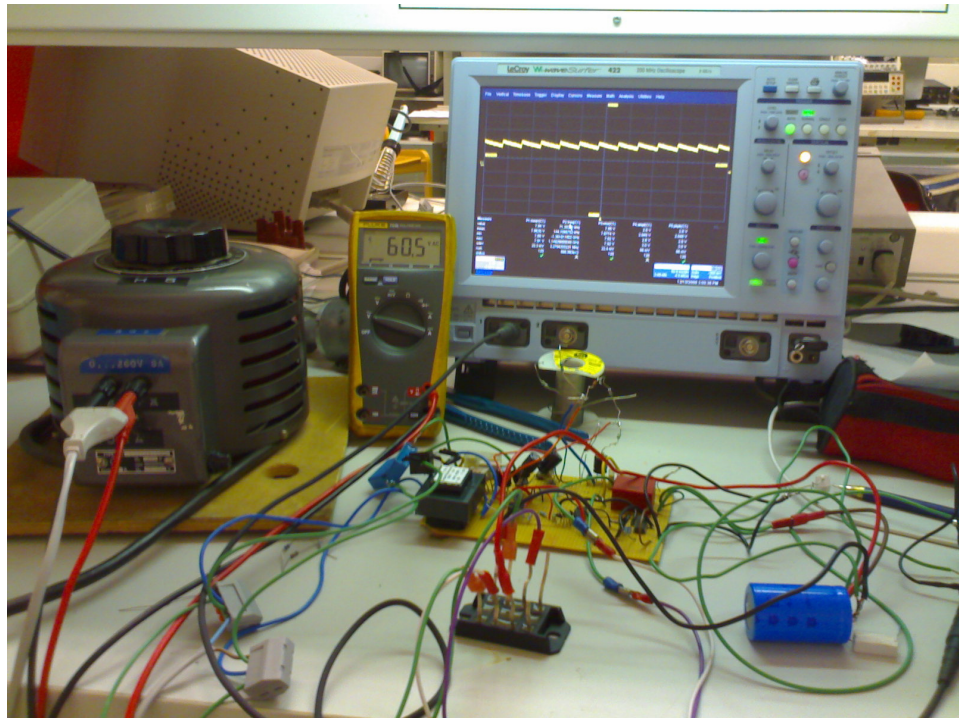


Kuva 14. Lopullinen tehonrajoituspiiri

Piirin toiminnan arveltiin nyt olevan riittävällä tasolla lopullisia mittauksia ajatellen. Osa tehonrajoituspiiriin kytketyistä komponenteista jäi lukuisten muutosten myötä turhiksi, mutta kaikkia ei juotettu irti piirin paremman muunneltavuuden takia.

4 MITTAUSTULOKSET JA PÄÄTELMÄT

Valmiin tehonrajoituspiirin rakentamisen jälkeen työssä voitiin siirtyä suorittamaan mittauksia. Piirin mittaukset suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun laboratoriotiloissa. Mittauksissa käytettiin monia eri mittalaitteita, mutta suurin osa niistä tehtiin LeCroy Wavesurfer 422-oskillaattorilla (200MHz). Kyseisellä oskillaattorilla voitiin muuttaa mittaustulokset suoraan sähköiseen muotoon mittaustilanteessa. Ominaisuuden avulla tarkkoja tuloksia voitiin ottaa nopeasti eri tilanteista. Oskillaattorissa käytettiin differentiaalisia mittapäitä, jotta erotusominaisuudet saatiin paremmiksi.

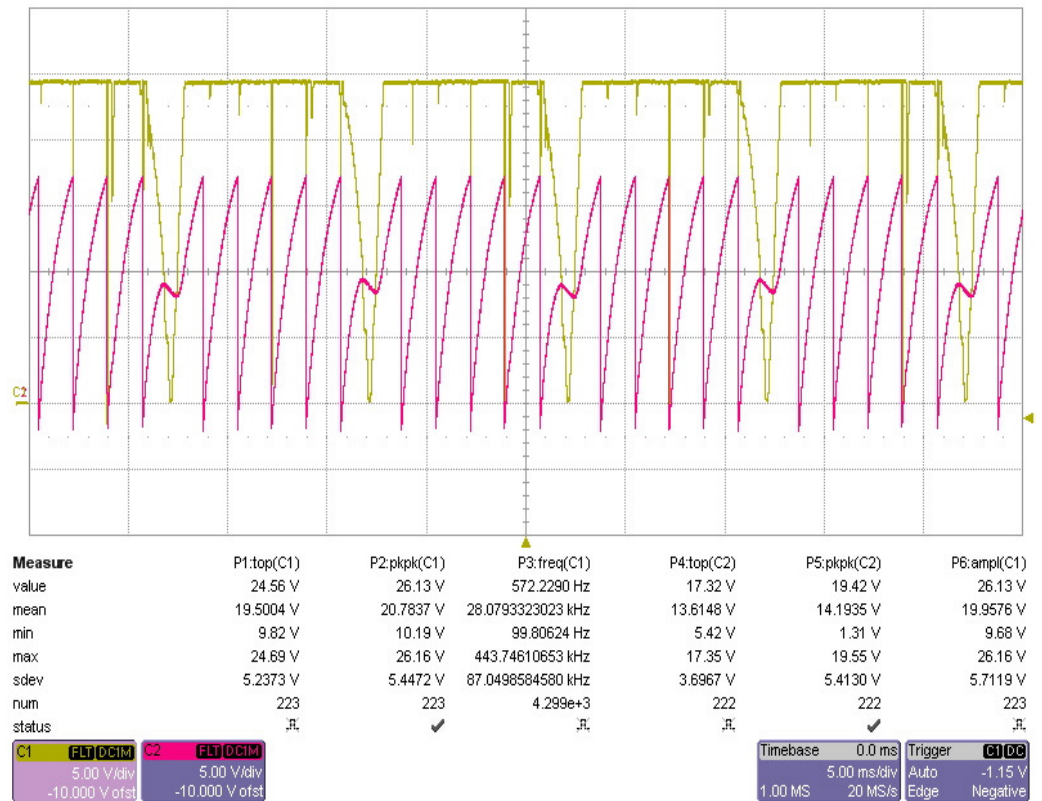


Kuva 15. Kuva mittaustilanteesta

Mittaustuloksia pyrittiin ottamaan tehonrajoituspiirin toiminnan kannalta tärkeistä kohteista. Saatujen mittaustulosten avulla voitiin päätellä, mitkä osa-alueet piirissä toimivat hyvin ja missä oli vielä parantamisen varaa. Mahdolliset korjaukset piiriin pyrittiin tekemään mittausten yhteydessä. Tehonrajoituspiirin toiminnan varmistamiseksi mittauksia tehtiin erisuuruisilla syöttöjännitteillä ja kuormilla.

4.1 Oskillaattoriin liittyvät mittaukset

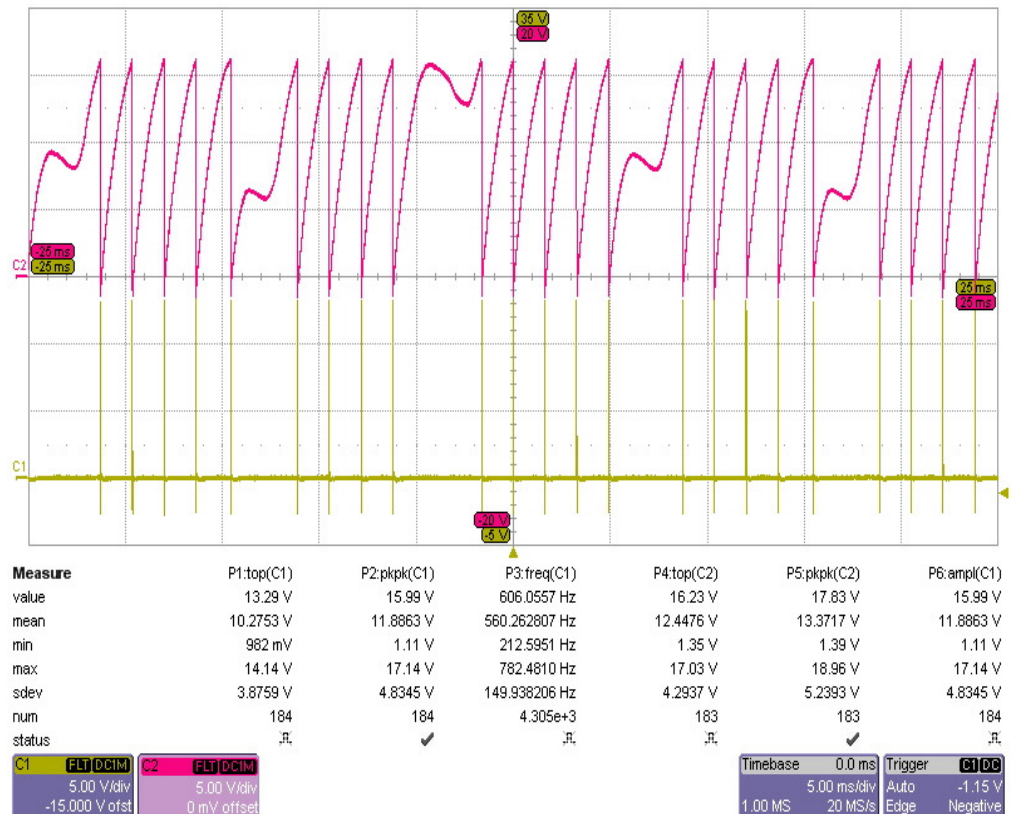
Mittaukset aloitettiin UJT-oskillaattoriin, jonka toiminta oli erityisen tärkeää koko tehonrajoituspiirille. Värähtelypiirin toiminnan kannalta ensimmäisiä kiinnostavia mittauskohdeita olivat jänniteregulaattorilta saatava jännite ja unistorin liipaisujännite. Kuvaajan havainnollisuuden takia jännitteet mitattiin oskilloskoopilla samanaikaisesti.



Kuva 16. Zener-reguloitu jännite ja unistorin liipaisujännite

Kuvaajasta voidaan havaita, että keltaisella piirtyvä reguloitu jännite rajoittuu hyvin tavoiteltuun 24 V:n arvoon. Jännitteessä voidaan kuitenkin nähdä lyhyitä vajoamia. Negatiiviset piikit olivat peräisin värähtelypiirin edessä olevista rajoituskondensaattoreista. Jännitepiikeillä ei ollut kuitenkaan vaikutusta unistorin liipaisujännitteeseen, joten kauneusvirhettä ei lähdetty korjaamaan. Punaisella piirtyvä unistorin liipaisujännite oli myös hyvin tavoitellun kaltainen. Unistorin liipaisupisteeksi muodostui kuvaajan mukaan 17.32 V, joka oli hyvin lähellä aikaisemmin lasketun liipaisujännitteen minimiarvoa (17.4 V). Unistori liipaistui jokaisella vaihtojännitteen puolijaksolla viisi kertaa. Määrä vastasi projektin alussa suunniteltua arvoa. Liipaisujännitteen havaittiin myös käyvän hieman negatiivisella puolella jokaisen liipaisun jälkeen. Tilanne ei ollut tarkoituksenmukainen, mutta sen ei kuitenkaan arveltu aiheuttavan ongelmia piirin toimintaan.

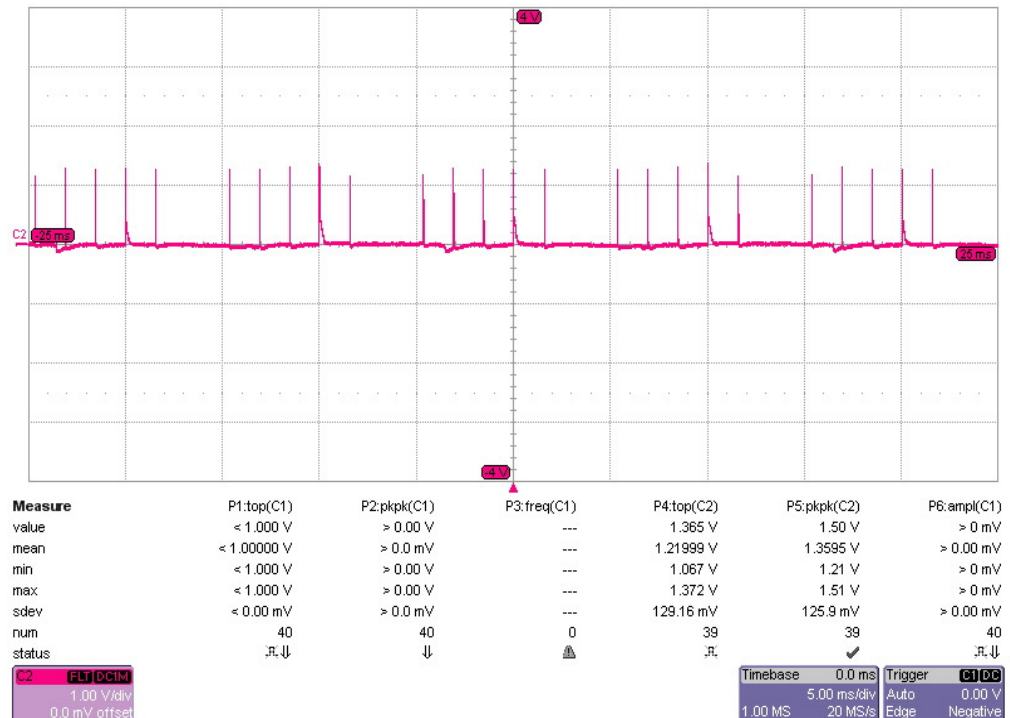
Seuraavana kiinnostavana mittauskohteena olivat unistorin muodostamat sytytyspulssit. Aluksi sytytyspulssit mitattiin pulssimuuntajan ensiön puolelta, jotta ne nähtäisiin vaimentumattomina. Sytytyspulssit mitattiin lisäksi liipaisujännitteen kanssa samanaikaisesti, jolloin jännitteiden keskinäinen riippuvuus pystyttiin havaitsemaan.



Kuva 17. Unistorin liipaisujännite ja unistorin luomat sytytyspulssit

Mittaustuloksista (kuva 17) voidaan päätellä, että oskillaattoriin valittu unistori (2N4871) toimi varsin hyvin. Sytytyspulssit olivat melko tarkkoja ja kapeita. Pulssien voimakkuus (n. 15 V) vaikutti riittävältä. Ainoana mietinnän kohteena olivat sytytyspulsseissa näkyvät negatiiviset piikit. Aikaisemmin havaitut negatiiviset osat unistorin liipaisujännitteessä näyttivät myös vaikuttavan sytytyspulsseihin. Kuvaajaa suurentamalla voitiin nähdä, että negatiivinen piikki syntyi liipaisuhetken jälkeen kuten liipaisujännitteessäkin. Huolestuttavinta oli, että negatiivisen piikin koko oli lähes kaksinkertaistunut. Ongelman takia UJT-oskillaattorin luomia sytytyspulsseja päätettiin mitata tarkemmin.

Sytytyspulssien mittauksia jatkettiin pulssimuuntajan toisipuolelta. Mittauksissa keskityttiin tyristoria sytyttävään hilan ja katodin väliseen jännitteeseen. Sytytyspulssien lisäksi tyristorin syttymiseen vaikutti sen läpi kulkeva virta. Jos virta ei ylittänyt tiettyä arvoa, tyristori ei jäänyt pysyvästi johtavaan tilaan.



Kuva 18. Tyristorin sytytyspulssit(hilan ja katodin väli)

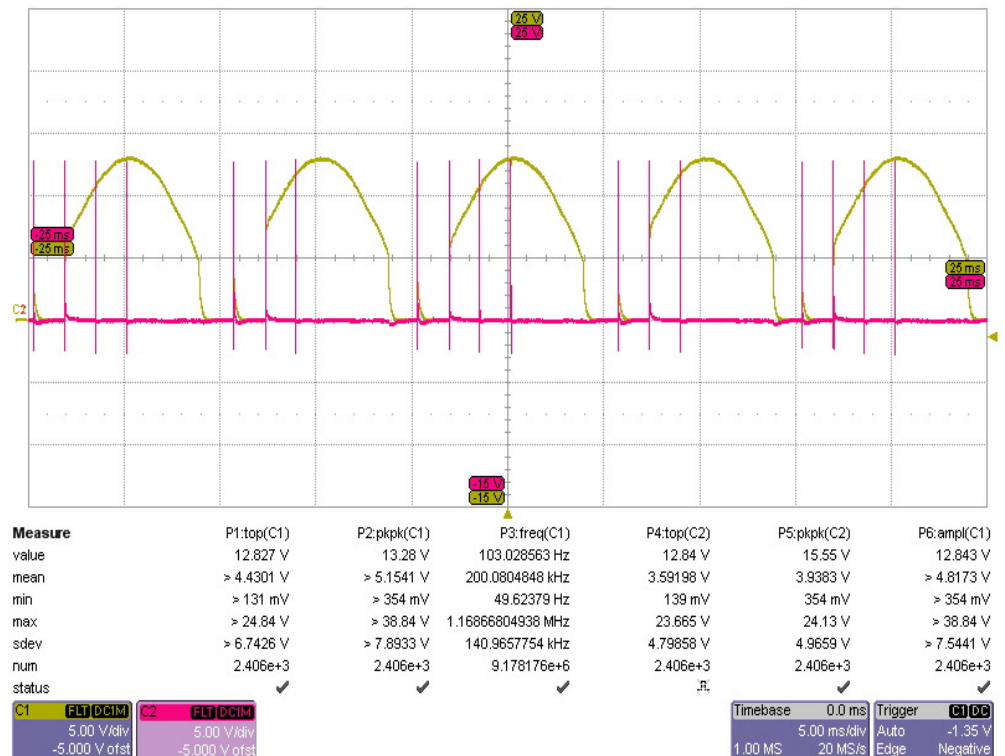
Ensimmäisenä kuvaajasta havaittiin, että tyristorisillan hiloille välittyvät sytytyspulssit olivat pienentyneet valtavasti. Pulssien kokoon vaikuttivat pulssimuuntaja ja tyristorisillan muodostamat resistanssit. Esimerkiksi pulssimuuntajan läpi kulkiessaan sytytyspulssit pienenevät kolmannekseen alkuperäisestä. Asiasta ei kuitenkaan oltu huolissaan, koska sytytyspulssien koko oli aikaisemmissa testeissä osoittautunut riittäväksi. Sytytyspulssien pienentyneellä koolla oli myös positiivisia vaikutuksia. Aikaisemmissa mittauksissa todetut negatiiviset piikit olivat kadonneet lähes kokonaan. Sytytyspulssien muoto oli lähes optimaalinen tyristorin liipaisua ajatellen.

4.2 Tyristorisiltaan liittyvät mittaukset

UJT-oskillaattoripiirin mittaustulosten ollessa hyvin lähellä toivottua, voitiin mittauksissa siirtyä tarkkailemaan tyristorisillan toimintaa. Mittauksia tehtiin erisuuruksilla kuormavastuksilla, jotta tyristorisillan toimintavarmuus voitiin todistaa paremmin. Pienemmillä kuormilla syöttöjännitettä jouduttiin kuitenkin pudottamaan, koska vastukseen vaikuttanut virta olisi kasvanut hyvin suureksi. Liian suureksi kasvanut virta olisi kuumentanut kuormavastusta tai jopa polttanut sen. Suuren kuormavirran takia

mittauksissa käytettiin 10 W:n tehovastuksia. Mittaukset suoritettiin ilman tyristorisillan perässä olevaa kondensaattoria (ks. kuva 14).

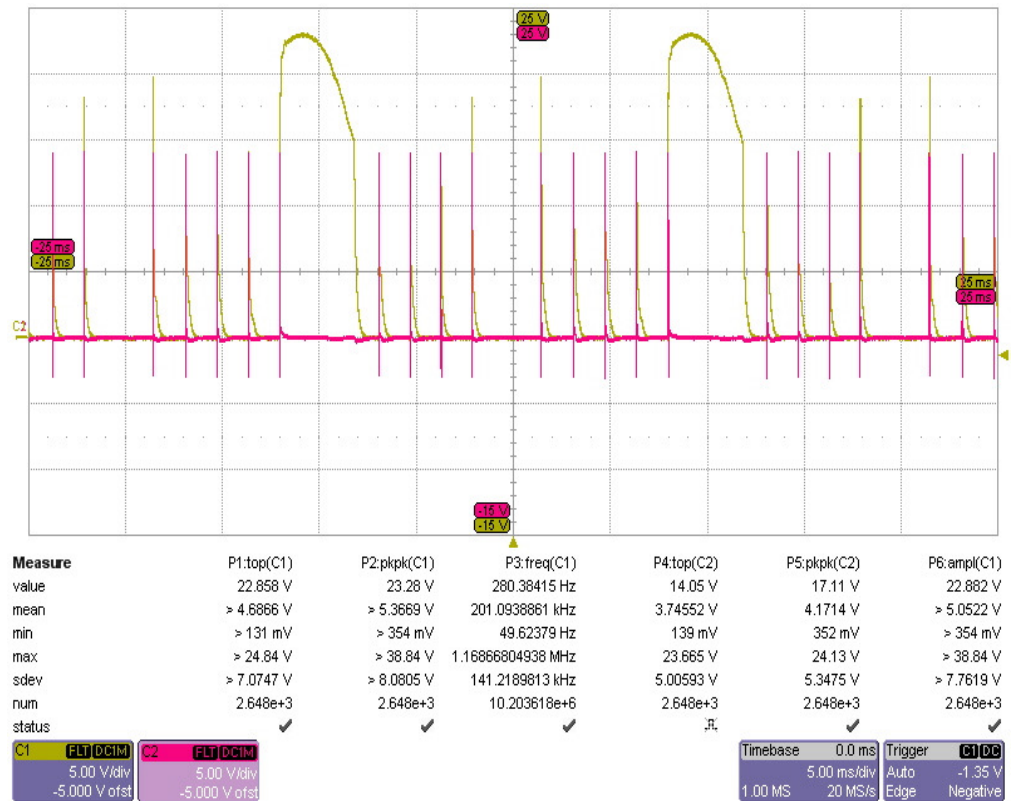
Mittaukset aloitettiin pienellä kuormavastuksella (470 Ω). Sisääntulojännitettä nostettiin niin ylös kuin kyseisellä kuormalla voitiin. Vastuksen kuumeneminen rajoitti jännitteen nostamista. Mittauksissa tarkkailtiin kuormaan syntyvän jännitteen lisäksi myös sytytyspulsseja. Tällöin pystyttiin havaitsemaan mikä sytytyspulsseista onnistui sytyttämään tyristorin.



Kuva 19. Tyristorisillan muodostama jännite (470 Ω :n kuorma)

Tyristorisiltaan syötetty jännite saatiin nostettua 90 V:n vaihtojännitteeseen, jolloin kuormavastuksen jännitteen suurimmaksi arvoksi tuli noin 130 volttia (kuvaajassa 1. kanavalla 10-kertainen vaimennus). Ensimmäisen sytytyspulssin kohdalla tyristoriden pitovirta ei ylity, jolloin tyristorit eivät siirry pysyvästi johtavaan tilaan. Tyristorit saadaan kuitenkin sytytettyä toisella sytytyspulssilla (kuva 19).

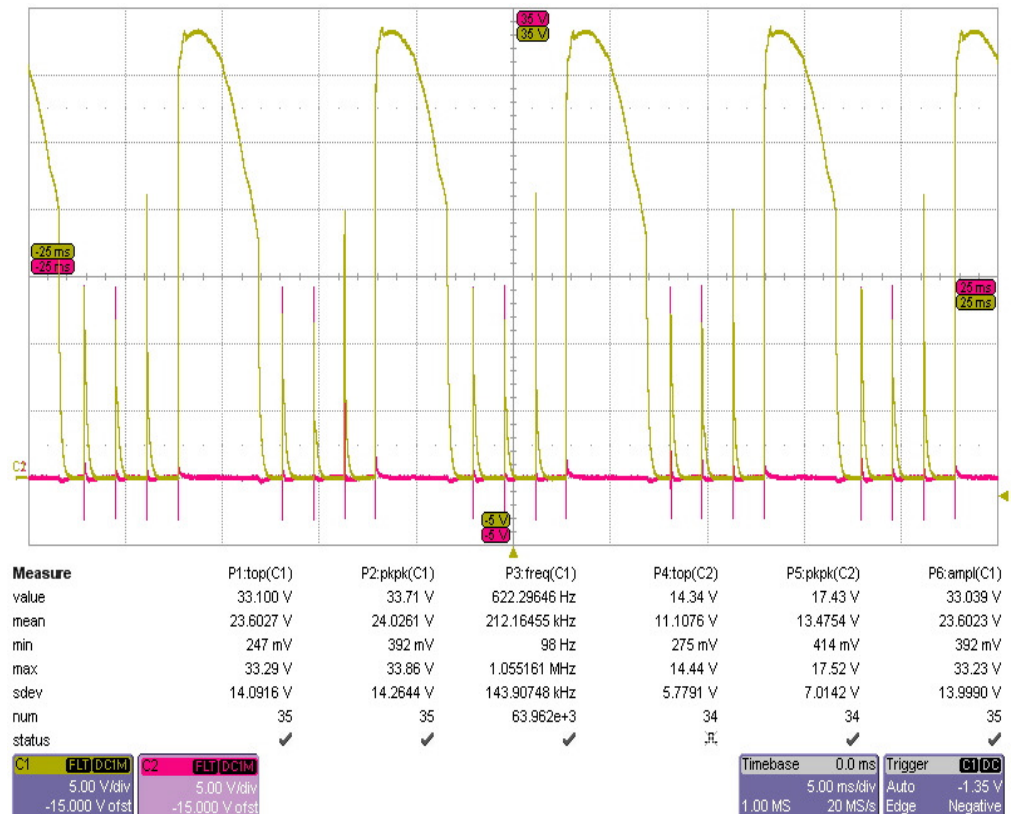
Kuormaan syntyvän jännitteen muoto saatiin hyvin lähelle aikaisemmin suunniteltua (ts. kuva 3). Kuorman jännitteen jäädessä kuitenkin melko pieneksi, päätettiin kuormavastuksen resistanssia lisätä. Kuormaksi vaihdettiin 1005 Ω :n tehovastus, minkä jälkeen mittaus toistettiin.



Kuva 20. Tyristorisillan muodostama jännite (1005 Ω :n kuorma)

Isommalla kuormalla syöttöjännite pystyttiin nostamaan 160 V:iin, jolloin kuormaan syntyi odotetusti hieman alle 230 V:n jännite. Mittaustuloksista (kuva 20) pystyttiin kuitenkin havaitsemaan eroavaisuutta tyristoreiden toiminnassa. Toisen tyristorin pitovirta näytti ylittyvän paljon helpommin kuin toisen. Tästä johtuen tyristorit syttyivät erisuuruilla sisääntulojännitteillä. Kuvaajasta voidaan nähdä, kuinka toinen tyristoreista on syttynyt ja päästää jännitettä kuormaan, kun taas toinen ei ole vielä syttynyt. Eroavaisuuden syynä saattoivat olla erot pulssimuuntajan toisioissa tai erot tyristoreiden toiminnassa. Aikaisemmin mitatut toisioiden sytytyspulssit olivat melkein identtisiä keskenään, joten ongelman ei arveltu kokonaan johtuvan pulssimuuntajasta. Mittauksissa kuitenkin huomattiin, että syöttöjännitettä kasvattamalla erot tyristoreiden syttymishetkissä pienenivät.

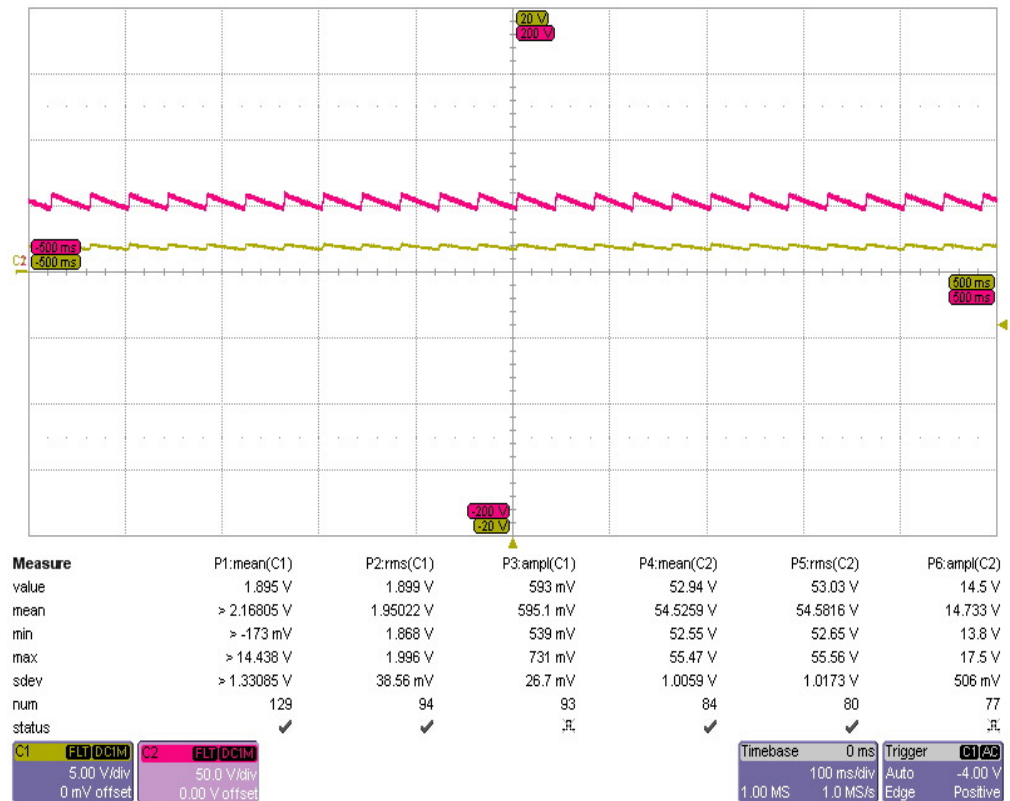
Syötetyn jännitteen jäädessä aiemmissa mittauksissa ylimmilläänkin alle tavoitteellisen 230 V:n, päätettiin kuorman suuruutta kasvattaa edelleen. Kuormaan lisättiin sarjaan yksi 330 Ω :n tehovastus, jotta sama mittaus pystyttiin suorittamaan muuntajasta syötetyllä verkkojännitettä vastaavalla jännitteellä.



Kuva 21. Tyristorisillan muodostama jännite (1335 Ω :n kuorma)

Sisään syötetyn verkkojännitteen avulla kuorman jännite nousi tavoiteltuun 330 voltin arvoon. Sisääntulojännitettä nostettaessa tarkkailtiin lisäksi myös tyristoryiden syttymishetkiä. Toinen tyristoryesta syttyi 170 V:n jännitteellä, kun taas toisen syttymistä saatiin odottaa lähes 200 V:iin asti. Sisääntulojännitteen nostaminen 230 V:iin tasoitti kuitenkin tyristoryilta tulevien jännitteiden eron lähes huomaamattomaksi (kuva 21).

Tyristorisillan luoman jännitteen ollessa lähellä odotettua, voitiin mittauksissa siirtyä eteenpäin. Tyristorisillan perään lisättiin valmiissa kytkennässä näkyvä (Kuva 14) isohko kondensaattori (470 μ F). Kondensaattorin tarkoituksena oli tasata tyristorisillalta saatava jännite melko tasaiseen muotoon. Kondensaattorin toimintaa päätettiin mitata 470 Ω :n kuormalla, jolloin kuorman virta voitiin nostaa helposti hyvin korkeaksi. Korkean kuormavirran avulla tyristorisilta toimi varmemmin, joten mittaustuloksista saatiin parempia. Mittauksessa värähtelypiiriä ja tarkkailupiiriä syötettiin verkkojännitteellä.



Kuva 22. kuormajännite ja differentiaalisen vahvistimen antojännite (kelt.)

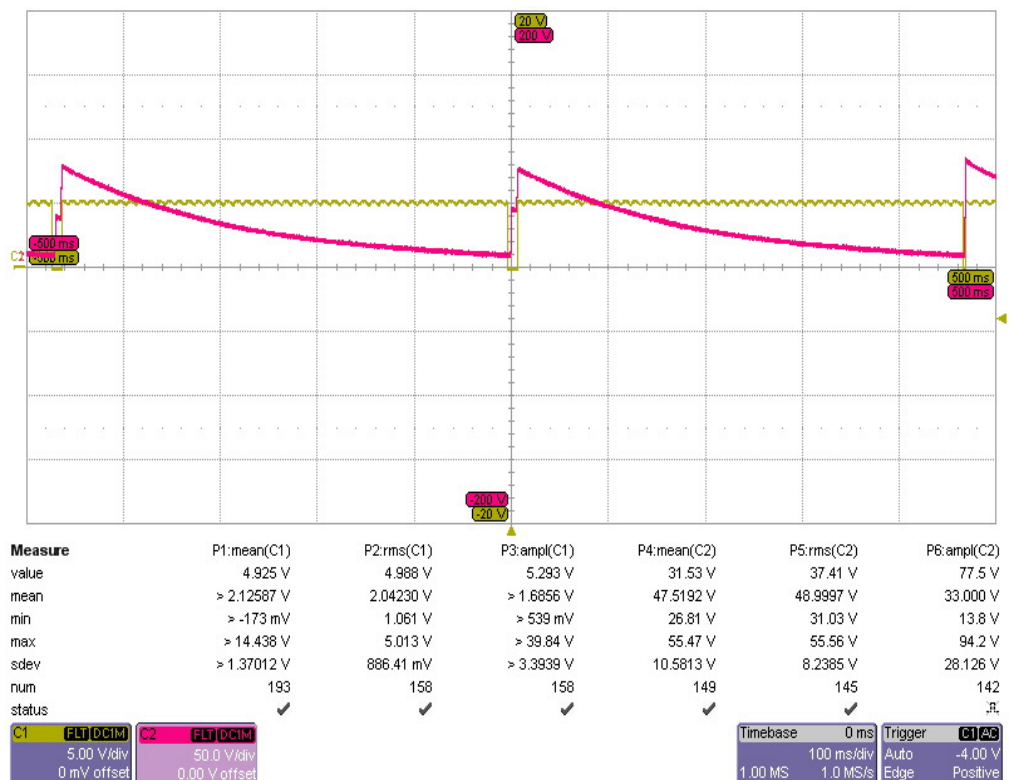
Mittaustilanteessa tyristorisillan syöttöjännitettä lähdettiin kasvattamaan hitaasti. Tyristoriden pitovirta ylittyi n. 25 V:n syöttöjännitteellä. Pitovirran ylittämisen jälkeen kondensaattori alkoi latautua. Tyristorisillan syöttöjännite nostettiin mittauksessa 40 V:n vaihtojännitteeseen, josta saatiin muodostettua kondensaattorin yli melko tasainen n. 53 V:n jännite. Jännitteen muodosta voitiin havaita kondensaattorin toimivan toivotulla tavalla (kuva 22).

4.3 Tarkkailupiiriin liittyvät mittaukset

Oskillaattoriin ja tyristorisillan toiminnan varmistamisen jälkeen mittauksissa siirryttiin tutkimaan koko piirin rajoitusominaisuuksia. Tarkkailupiiriin valvovana elimenä toimiva pieni vastus päätettiin kytkeä kuorman kanssa sarjaan. Aikaisemmin mitoitettu 10 m Ω :n shunttivastus oli kuitenkin kytkentään liian pieni, koska kuorman virtaa ei pystytty nostamaan suunniteltuun 7 A:iin. Virrankestoltaan riittävän kuorman puuttuessa, päätettiin tarkkailuvastuksen kokoa suurentaa. Tarkkailuvastukseksi valittiin aikaisemmin testivaiheessa käytetty 0,47 Ω :n vastus. Suuremmalla

vastuksella rajoittamisen aiheuttava n. 70 mV:in jännite saataisiin syntymään helpommin. Tarkkailuvastukselle tulevan jännitteen arveltiin olevan muodoltaan tarpeeksi tasaista, jotta tarkkailupiiri toimisi halutulla tavalla.

Mittauksessa nostettiin tyristorisillan syöttöjännitettä hitaasti kohti rajoitukseen vaadittavaa arvoa. Tärkeinä mittauskohteina pidettiin kuorman jännitettä ja valo-ohjatun releen ohjausjännitettä. Tarkoituksena oli tutkia, miten tarkkailupiirin lisääminen vaikutti kytkennän toimintaan. Edellisessä mittauksessa kuormana olleen 470 Ω :n vastuksen oletettiin myös hyvin soveltuvani tähän mittaukseen.



Kuva 23. Kuorman jännite ja releen ohjausjännite rajoitustilanteessa

Rajoitustilaan siirtyäkseen tehonrajoituspiirin tarkkailuvastuksen yli olevan jännitteen tuli nousta tarpeeksi korkeaksi. Tarkkailuvastus oli kuormavastuksen kanssa sarjassa, joten sen jännitteen arvo oli suoraan riippuvainen kuorman jännitteestä. Kuorman jännitettä lähdettiin kasvattamaan lisäämällä tasaisesti tyristorisillan syöttöjännitettä. Tyristorisillan syöttöjännitettä nostettiin aina 45 V:in asti, jonka jälkeen tehonrajoituspiirin havaittiin siirtyvän rajoitustilaan. Rajoitustilassa differentiaalisella vahvistimella vahvistettu tarkkailujännite (Kuva 22) saavutti komparaattorin positiivisen liipaisupisteen. Liipaisupisteen ylittämisen

jälkeen tarkkailupiirin komparaattori siirtyi positiiviseen tilaansa. Positiivisessa tilassa komparaattori ohjasi releen oikosulkemaan unistorin ohjausjännitteen värähtelypiirissä. Ilman ohjausjännitettä unistori ei enää pystynyt luomaan uusia sytytyspulsseja tyristorisillalle. Rajoituksen seurauksena tyristorisilta ei enää pystynyt välittämään jännitettä kuormaan. Kuorman jännite alkoi hitaasti laskea kohti nollassa. Laskiessaan kuorman jännite pienensi myös tarkkailuvastuksen jännitettä. Tarkkailuvastuksen jännitteen arvo putosi, kunnes komparaattori ohjausjännite saavutti negatiivisen liipaisutason. Negatiivisen liipaisutason saavutettuaan komparaattori ohjasi releen auki, jolloin tehonrajoituspiiri pyrki palaamaan takaisin normaalitilaansa. Kuvasta 23 voidaan kuitenkin havaita, että palautuminen jää vain hetkelliseksi tyristorisillan syöttöjännitteen ollessa liian korkea. Syöttöjännitettä laskemalla piiri saatiin palautumaan rajoittamattomaan tilaan.

Tarkkailupiirin lisäämisen jälkeen tehonrajoituspiiri toimi mittaustilanteessa juuri toivotulla tavalla. Tehonrajoituspiiri siirtyi hyvin nopeasti rajoitustilaan (n.20 ms) ja palautumisessa oli tarvittavaa viivettä (n. 500 ms). Mittauksissa kuorman jännite saatiin putoamaan rajoitustilanteessa hyvin lähelle nollassa, mikä on kuorman suojaamisen kannalta hyvin tärkeää. Vaikka mittaustilanteissa käytetty kuorma ei välttämättä täysin vastannutkaan induktiokuumentinta, tehonrajoituspiiri pystyttäisiin todennäköisesti helposti muuttamaan induktiokuumentimelle soveltuvaksi. Tehonrajoituspiirin toiminta oli nyt saatu hyvin lähelle suunniteltua, ja sen arveltiin pystyvän suojaamaan induktiokuumentimen MOSFET-transistoreita haitallisilta virtapiikeiltä.

5 POHDINTA JA YHTEENVETO

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli valmistaa tehoa rajoittava suojapiiri, jolla pystyttäisiin ehkäisemään induktiokuumentimen hakkuriteholähteen MOSFET-transistoreiden rikkoutuminen. Tehonrajoituspiiristä piti aluksi rakentaa kokeiltava versio reikäpiirilevyille. Testatun ensimmäisen version perusteella aiottiin valmistaa häiriösuojauseltaan parempi piirilevy, jolle piti tehdä kaikki tarvittavat EMC-mittaukset.

Suurin osa insinööriyöhön liittyneistä suunnittelu- ja rakennusprosesseista tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulun laboratoriotiloissa. Ammattikorkeakoulu pystyi hyvin tarjoamaan riittävät työskentelyvälineet ja

mittauslaitteet työn suorittamiseen. Ellego Powertec Oy toimitti suurimman osan projektissa tarvituista komponenteista. Erilaisia komponentteja tarvittiin melko paljon, koska tehonrajoituspiirin rakennetta jouduttiin muuttamaan useita kertoja.

Aluksi tehonrajoituspiirin valmistus sujui mallikkaasti. Piirin UJT-oskillaattorikytkentä saatiin nopeasti toimimaan halutulla tavalla. Oskillaattorin luomia pulsseja välittämään tarkoitettu pulssimuuntaja toimi myös moitteitta. Ongelmat kuitenkin alkoivat, kun kytkentään tuli liittää tyristorisilta. Tyristorisiltaa ei saatu mitenkään toimimaan, jolloin työssä siirryttiin tarkkailupiirin rakentamiseen.

Tarkkailupiirin ensimmäisen version avulla tehonrajoituspiiri rajoitti kuorman ottamaa virtaa vähitellen. Pohdinnan jälkeen kuitenkin arveltiin, ettei kuormaan välittyvää tehoa pystytty rajoittamaan tarpeeksi jyrkästi. Tarkkailupiirin toiminta jouduttiin siis suunnittelemaan kokonaan uudestaan. Uuden toiminnaltaan täysin erilaisen tarkkailupiirin suunnittelemiseen kului paljon aikaa, mikä oli luonnollisesti turhauttavaa.

Aikaisemmin todetut ongelmat tyristorisillan kanssa päätettiin ratkaista tilaamalla Saksasta uudet virrankestoltaan pienemmät sillat. Viikkojen odotuksen jälkeen pettymys oli valtava, koska uudetkaan sillat eivät toimineet toivotulla tavalla. Sillat lähetettiin tutkittavaksi Ellego Powertec Oy:hyn, josta ne lähetettiin takaisin Saksaan rikkiäisiksi todettuina. Yli kuukauden odotuksen jälkeen tyristorisillat lähetettiin takaisin. Syynä siltojen toimimattomuuteen oli valmistajan tekemä virhe datalehden kytkentäkuvaan. Ennalta arvaamattoman ongelman takia projektin valmistuminen viivästyi ikävällä tavalla.

Projekti alkoi edistyä huomattavasti paremmin, kun tyristorisilta oli saatu toimimaan. Tehonrajoituspiiri saatiin nopeasti rakennettua vaiheeseen, jossa sen toimintaa pystyttiin kunnolla testaamaan. Induktiokuumentimen MOSFET-transistoreiden suojaamisen kannalta oli tärkeää, että tehonrajoituspiiri pystyisi siirtymään rajoitustilaan hyvin nopeasti. Tehonrajoituspiirin mittauksissa havaittiin, että piiri on suojaamiseen vähintäänkin riittävän nopea. Rajoitustilaan siirtymisen arvioitiin kestävän n. 20 ms. Lisäksi tehonrajoituspiirin palautumisviive saatiin testikuormalla (470 Ω) luotua järkevälle tasolle (n.500 ms). Viive olisi voinut olla hiukan

pidempikin, mutta pelkän hystereesin avulla sen luominen olisi ollut käytännössä mahdotonta. Tarpeen tullessa tarkkailupiiriin tulisi lisätä erillinen kytkentä lisäviiveen luomiseksi.

Projektissa tapahtuneiden vastoinkäymisten ja viivästysten aikana induktiokuumentimen ongelmaan kehitettiin toisen insinööriyön avulla vaihtoehtoinen ratkaisu. Ratkaisun ilmettyä tehonrajoituspiiristä pyrittiin rakentamaan enemmänkin yleismallinen tehonrajoitin, joka soveltuisi myös muiden laitteiden kuin induktiokuumentimen suojaamiseen. Päätöstä tuki erityisesti piirin helppo säädettävyyden ja muunneltavuus. Piiristä pystyttiin todella helposti säätämään rajoitettavan virran arvoa, joten sen avulla pystyttäisiin suojaamaan hyvin eritehoisia laitteita. Lisäksi projektin aikana suunnitellun kahden erilaisen tarkkailupiirin avulla voitiin vaikuttaa rajoitusjyrkkyyteen.

Projektin ongelmien myötä piirin käytännön mittaukset jäivät valitettavan vähiin. Testimittauksissa tehonrajoituspiirin toimintaa ei pystytty kokeilemaan tavoitellulla 7 ampeerin virralla, koska testiin sopivaa kuormaa ei ollut. Saatavilla olleet kuormat olisivat kyseisellä virralla kuumentuneet liikaa tai palaneet mittausten yhteydessä. Ongelman takia tehonrajoituspiirin toiminta pyrittiin todistamaan pienemmillä kuormavirroilla käyttäen kuormana erisuuruisia tehovastuksia.

Valitettavasti työssä tapahtuneiden viivästyksien takia kytkentää ei myöskään ehditty rakentaa varsinaiselle piirilevylle, jossa piirin selkeyttä ja häiriönsuojausominaisuuksia olisi pystytty parantamaan. Suunniteltuja EMC-mittauksia ei ollut järkevää lähteä toteuttamaan reikälevylle tehtyyn piiriin, joten ne jätettiin tuleviin projekteihin.

Valmiiksi kehitetyn tehonrajoituspiirin häiriönsuojausominaisuuksien tulisi olla huippuluokkaa, koska liialliselta virralta suojattavat laitteet ovat usein valtavia häiriönlähteitä. Induktiokuumentimen tapauksessa ympärillä olevat laitteet joutuvat todennäköisesti varsin voimakkaaseen magneettikenttään. Tehonrajoituspiirin komponenttien sijoittelu ja kotelointi pitäisi toteuttaa todella hyvin, jotta piirin toiminta ei häiriintyisi missään tilanteissa.

Tässä opinnäytetyössä suunniteltua kuorman virran määrää tarkkailevaa tehonrajoituspiiriä voitaisiin laajentaa valvomaan myös kuorman jännitettä.

Laajennuksen avulla mahdolliset kuorman toimintaa häiritsevät jännitepiikit voitaisiin estää ja tehonrajoituksesta saataisiin kokonaisvaltaisempi.

LÄHTEET

- [1] Anttila, J, *Elektroniset peruspiirit*, Puhelinlaitostenliitto r.y., Helsinki. 1971.
- [2] Silvonen, K, *Sähkötekniikka ja elektroniikka*, Hakapaino Oy, Helsinki. 2003.
- [3] Edminster, J, *Schaum`s outlines, Theory and problems of electric circuits*, McGraw-Hill, United States. 1997.
- [4] Wikipedia, Unijunction transistor [verkkodokumentti, luettu 10.8.2008]
Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Unijunction_transistor
- [5] Wikipedia, Komparaattori [verkkodokumentti, luettu 15.10.2008]
Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Komparaattori>

LIITTEET

Liite 1. Unistorin 2N4871 datalehti

MOTOROLA SC (DIODES/OPTO) 39E D ■ 6367255 0082655 7 ■ M077

NOT RECOMMENDED FOR NEW DESIGNS T-37-21

PN Unijunction Transistors
Silicon Unijunction Transistors

... designed for pulse and timing circuits, sensing circuits, and thyristor trigger circuits. These devices feature:

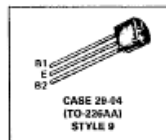
- Low Peak Point Current — 1 μ A Typical
- Low Emitter Reverse Current — 5 nA Typical
- Passivated Surface for Reliability and Uniformity
- One-Piece Injection-Molded Umblock Plastic Package for Economy and Reliability
- High η for greater bandwidth

2N4870
2N4871

PN UJT's



Boca Semiconductor Corp. □



MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
RMS Power Dissipation, Note 1	P_D	300	mW
RMS Emitter Current	I_E	50	mA
Peak-Pulse Emitter Current, Note 2	I_{EP}	1.5	Amp
Emitter Reverse Voltage	V_{EBR}	30	Volts
Interbase Voltage, Note 3	V_{B2B1}	35	Volts
Operating Junction Temperature Range	T_J	-55 to +125	$^\circ$ C
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150	$^\circ$ C

Notes: 1. Derate 3 mW/ $^\circ$ C increase in ambient temperature.
2. Duty cycle < 1%, PRF = 10 PPS (see Figure 5).
3. Based upon power dissipation at $T_A = 25^\circ$ C.

<http://www.bocasemi.com>

MOTOROLA THYRISTOR DEVICE DATA

3-22

MOTOROLA SC (DIODES/OPTO) 39E D 6367255 U082656 9 M077
 2N4870 • 2N4871

T-37-21

ELECTRICAL CHARACTERISTICS $I_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.

Characteristic	Fig. No.	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Intrinsic Standoff Ratio, Note 1 ($V_{B2B1} = 10\text{ V}$)	4, 7	η	0.65 0.70	—	0.75 0.85	—
Interbase Resistance ($V_{B2B1} = 3\text{ V}, I_E = 0$)	10, 11	R_{BB}	4	6	9.1	k ohms
Interbase Resistance Temperature Coefficient ($V_{B2B1} = 3\text{ V}, I_E = 0, T_A = -65$ to $+125^\circ\text{C}$)	11	αR_{BB}	0.10	—	0.90	%/°C
Emitter Saturation Voltage, Note 2 ($V_{B2B1} = 10\text{ V}, I_E = 50\text{ mA}$)		$V_{EB1(sat)}$	—	2.5	—	Volts
Modulated Interbase Current ($V_{B2B1} = 10\text{ V}, I_E = 50\text{ mA}$)		$I_{B2(mod)}$	—	15	—	mA
Emitter Reverse Current ($V_{B2E} = 30\text{ V}, I_{B1} = 0$)	6	I_{EB2C}	—	0.005	1	μA
Peak-Point Emitter Current ($V_{B2B1} = 25\text{ V}$)	8, 9	I_P	—	1	5	μA
Valley-Point Current, Note 2 ($V_{B2B1} = 20\text{ V}, R_{B2} = 100\text{ ohms}$)	12, 13	I_V	2 4 7	5	—	mA
Base-One Peak Pulse Voltage	2N4870 2N4871	V_{OB1}	3 5	6 8	—	Volts

Notes: 1. η , intrinsic standoff ratio, is defined in terms of the peak-point voltage, V_p , by means of the equation: $V_p = \eta V_{B2B1} + V_p$, where V_p is about 0.45 volt at 25°C in $I_E = 10\text{ mA}$ and decreases with temperature at about $2.5\text{ mV}/^\circ\text{C}$. The test circuit is shown in Figure 4. Components R_1, C_1 , and the GIT form a relaxation oscillator; the remaining circuitry serves as a peak-voltage detector. The forward drop of Diode D_1 compensates for V_p . To use, the "cal" button is pushed, and R_1 is adjusted to make the current meter, M_1 , read full scale. When the "cal" button is released, the value of η is read directly from the meter, if full scale on the meter reads 1.
 2. Use pulse technique: $PW = 300\text{ }\mu\text{s}$, duty cycle = 2% to avoid internal heating, which may result in erroneous readings.



FIGURE 1 — UNIJUNCTION TRANSISTOR SYMBOL AND NOMENCLATURE

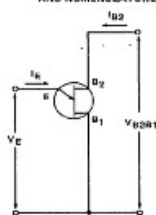
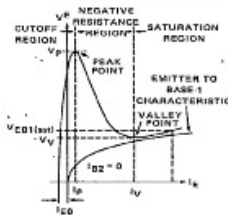


FIGURE 2 — STATIC EMITTER CHARACTERISTICS CURVES



<http://www.bocasemi.com>

MOTOROLA SC (DIODES/OPTO) 39E D ■ 6367255 0062657 0 ■ M0T7
2N4870 • 2N4871

T-37-21

FIGURE 3 - V_{OB1} TEST CIRCUIT

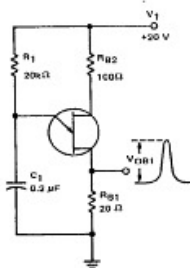


FIGURE 4 - α TEST CIRCUIT

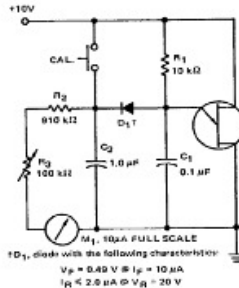
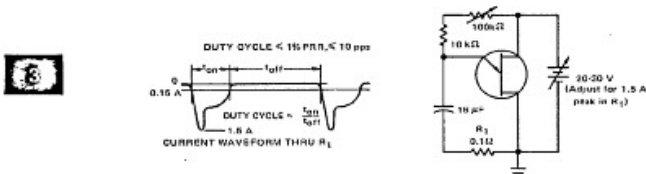


FIGURE 5 - PRR TEST CIRCUIT AND WAVEFORM



TYPICAL CHARACTERISTICS

FIGURE 6 - EMITTER REVERSE CURRENT

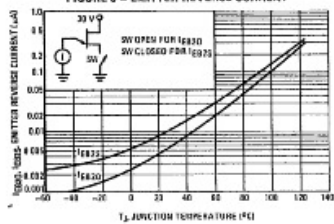
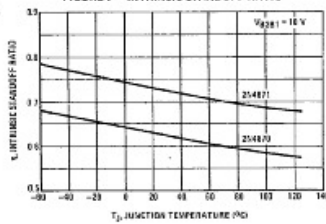


FIGURE 7 - INTRINSIC STANDOFF RATIO



<http://www.bocsemi.com>

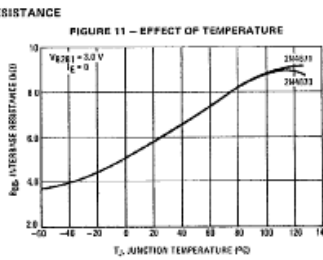
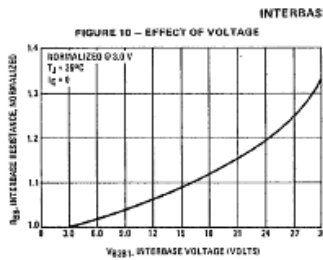
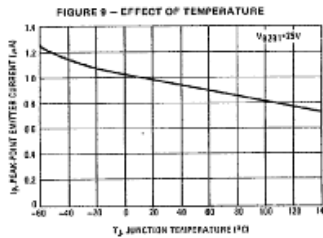
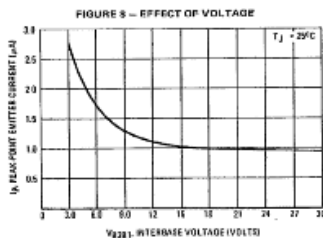
MOTOROLA THYRISTOR DEVICE DATA

MOTOROLA SC (DIODES/OPTO) 39E D 6367255 0082658 2 MOT7

2N4870 • 2N4871

T-37-21

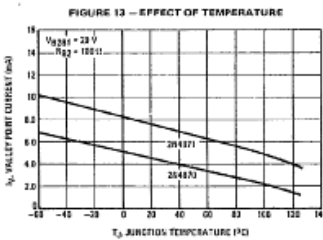
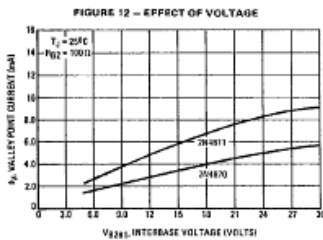
PEAK POINT CURRENT



TYPICAL CHARACTERISTICS

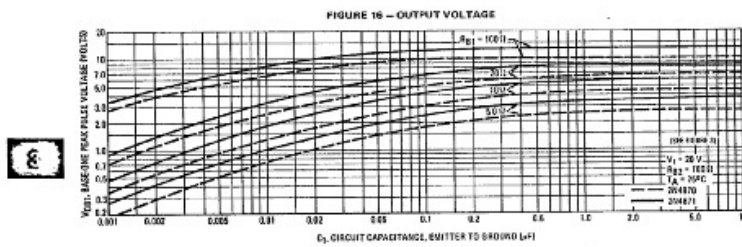
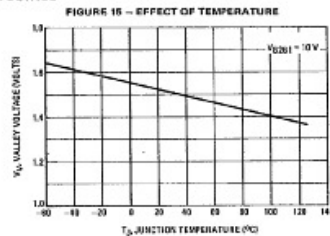
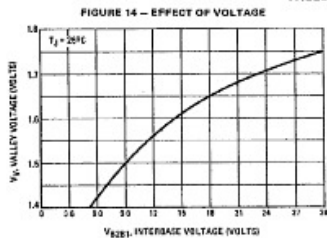
<http://www.bocasemi.com>

VALLEY CURRENT



MOTOROLA THYRISTOR DEVICE DATA

MOTOROLA SC (DIODES/OPTO) 39E D 6367255 0082659 4 NOT
 2N4870 • 2N4871
 VALLEY VOLTAGE
 T-37-21



<http://www.bocasemi.com>

Liite 2. Tyristorisillan Ixys VVZ12 datalehti

IXYS

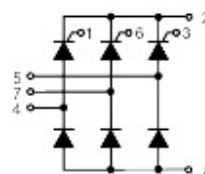
VVZ 12

Three Phase Half Controlled Rectifier Bridge

$$I_{dAVM} = 20 \text{ A}$$

$$V_{RRM} = 1200-1600 \text{ V}$$

V_{RCM} V_{CRM} V	V_{RRM} V_{CRM} V	Type
1300	1200	VVZ 12-12Io1
1500	1400	VVZ 12-14Io1
1700	1600	VVZ 12-16Io1

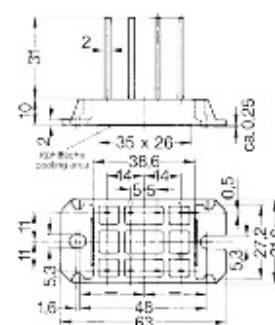


Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings	Features
I_{dAV}	$T_K = 100^\circ\text{C}$; module	15 A	<ul style="list-style-type: none"> Package with DCB ceramic base plate Isolation voltage 3600 V~ Planar passivated chips Soldering terminals UL registered E 72873
I_{dAVM}	module	20 A	
I_{TRMS}, I_{TRMS}	per leg	12 A	
I_{TSM}, I_{TSM}	$T_{VC} = 45^\circ\text{C}$; $V_{CR} = 0$	1 = 10 ms (50 Hz), sine 1 = 8.3 ms (60 Hz), sine	110 A 115 A
	$T_{VC} = T_{VSM}$; $V_{CR} = 0$	1 = 10 ms (50 Hz), sine 1 = 8.3 ms (60 Hz), sine	100 A 105 A
Pt	$T_{VC} = 45^\circ\text{C}$; $V_{CR} = 0$	1 = 10 ms (50 Hz), sine 1 = 8.3 ms (60 Hz), sine	60 A ² s 55 A ² s
	$T_{VC} = T_{VSM}$; $V_{CR} = 0$	1 = 10 ms (50 Hz), sine 1 = 8.3 ms (60 Hz), sine	50 A ² s 45 A ² s
$(di/dt)_r$	$T_{VC} = T_{VSM}$; $f = 400 \text{ Hz}$, $t_r = 200 \mu\text{s}$ $V_{CR} = 2/3 V_{CRM}$ $I_C = 0.3 \text{ A}$; $di_C/dt = 0.3 \text{ A}/\mu\text{s}$	repetitive, $I_T = 50 \text{ A}$	150 A/ μs
$(dv/dt)_cr$	$T_{VC} = T_{VSM}$; $V_{CR} = 2/3 V_{CRM}$ $R_{CR} = \infty$; method 1 (linear voltage rise)		1000 V/ μs
V_{RCM}			10 V
P_{OH}	$T_{VC} = T_{VSM}$ $t_r = 30 \mu\text{s}$ $t_f = 500 \mu\text{s}$ $t_v = 10 \text{ ms}$	$\leq 10 \text{ W}$ $\leq 5 \text{ W}$ $\leq 1 \text{ W}$	
P_{OAVM}		0.5 W	
T_{VU}		-40 ... +125	$^\circ\text{C}$
T_{VM}		125	$^\circ\text{C}$
T_{M}		-40 ... +125	$^\circ\text{C}$
V_{SO}	50/60 Hz, RMS $I_{SO} \leq 1 \text{ mA}$	1 = 1 min 1 = 1 s	3000 V~ 3600 V~
M_d	Mounting torque	(M5) (10-32 UNF)	2-2.5 Nm 18-22 lb.in.
Weight	typ.		28 g

Data according to IEC 60747 and refer to a single thyristor diode unless otherwise stated.
IXYS reserves the right to change limits, test conditions and dimensions.

© 2000 IXYS All rights reserved

Dimensions in mm (1 mm = 0.0394")



1-2

Symbol	Test Conditions	Characteristic Values
I_{R1}, I_D	$V_R = V_{CRM}; V_D = V_{CRM}$ $T_{jw} = T_{jwd}$ $T_{jw} = 25^\circ\text{C}$	≤ 5 mA ≤ 0.3 mA
V_{PT}, V_T	$I_P, I_T = 30$ A, $T_{jw} = 25^\circ\text{C}$	≤ 2 V
V_{T0} t_T	For power-loss calculations only ($T_{jw} = 125^\circ\text{C}$)	1.1 V 30 m μ s
V_{GT}	$V_D = 6$ V; $T_{jw} = 25^\circ\text{C}$ $T_{jw} = -40^\circ\text{C}$	≤ 1.0 V ≤ 1.2 V
I_{GT}	$V_D = 6$ V; $T_{jw} = 25^\circ\text{C}$ $T_{jw} = -40^\circ\text{C}$ $T_{jw} = 125^\circ\text{C}$	≤ 65 mA ≤ 80 mA ≤ 50 mA
V_{GD} I_{GD}	$T_{jw} = T_{jwd}$ $T_{jw} = T_{jwd}$ $V_D = 2/3 V_{CRM}$ $V_D = 2/3 V_{CRM}$	≤ 0.2 V ≤ 5 mA
I_L	$I_G = 0.3$ A; $t_G = 30$ μ s $di_G/dt = 0.3$ A/ μ s $T_{jw} = 25^\circ\text{C}$ $T_{jw} = -40^\circ\text{C}$ $T_{jw} = 125^\circ\text{C}$	≤ 150 mA ≤ 200 mA ≤ 100 mA
I_H	$T_{jw} = 25^\circ\text{C}; V_D = 6$ V; $R_{\theta jw} = \infty$	≤ 100 mA
t_{9d}	$T_{jw} = 25^\circ\text{C}; V_D = 1/2 V_{CRM}$ $I_G = 0.3$ A; $di_G/dt = 0.3$ A/ μ s	≤ 2 μ s
t_d Q_d	$T_{jw} = 125^\circ\text{C}; I_T = 15$ A, $t_p = 300$ μ s, $-di/dt = 10$ A/ μ s $V_D = 100$ V, $dv/dt = 20$ V/ μ s, $V_D = 2/3 V_{CRM}$	typ. 150 μ s 75 μ C
$R_{\theta jC}$	per thyristor (diode); DC current per module	2.5 K/W 0.42 K/W
$R_{\theta jA}$	per thyristor (diode); DC current per module	3.1 K/W 0.52 K/W
d_s	Creeping distance on surface	7 mm
d_a	Creepage distance in air	7 mm
a	Max. allowable acceleration	50 m/s ²

Liite 3. Optoerottimen Vishay SFH610A datalehti



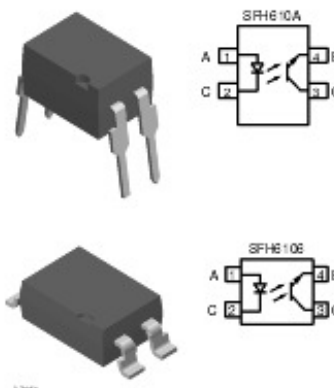
SFH610A / SFH6106

Vishay Semiconductors

Optocoupler, High Reliability, 5300 V_{RMS}

Features

- Good CTR Linearity Depending on Forward Current
- Isolation Test Voltage, 5300 V_{RMS}
- High Collector-Emitter Voltage, V_{CEO} = 70 V
- Low Saturation Voltage
- Fast Switching Times
- Low CTR Degradation
- Temperature Stable
- Low Coupling Capacitance
- End-Stackable, .100" (2.54 mm) Spacing
- High Common-Mode Interference Immunity



Agency Approvals

- UL File #E52744 System Code H or J

- DIN EN 60747-5-2(VDE0884)
DIN EN 60747-5-5 pending
Available with Option 1
- CSA 93751
- BSI IEC60950 IEC60965

Description

The SFH610A (DIP) and SFH6106 (SMD) feature a high current transfer ratio, low coupling capacitance and high isolation voltage. These couplers have a GaAs infrared diode emitter, which is optically coupled to a silicon planar phototransistor detector, and is incorporated in a plastic DIP-4 or SMD package.

The coupling devices are designed for signal transmission between two electrically separated circuits.

The couplers are end-stackable with 2.54 mm spacing.

Creepage and clearance distances of > 8.0 mm are achieved with option 6. This version complies with IEC 60950 (DIN VDE 0805) for reinforced insulation up to an operation voltage of 400 V_{RMS} or DC. Specifications subject to change.

Order Information

Part	Remarks
SFH610A-1	CTR 40 - 80 %, DIP-4
SFH610A-2	CTR 63 - 125 %, DIP-4
SFH610A-3	CTR 100 - 200 %, DIP-4
SFH610A-4	CTR 160 - 320 %, DIP-4
SFH6106-1	CTR 40 - 80 %, SMD-4
SFH6106-2	CTR 63 - 125 %, SMD-4
SFH6106-3	CTR 100 - 200 %, SMD-4
SFH6106-4	CTR 160 - 320 %, SMD-4
SFH610A-1-X006	CTR 40 - 80 %, DIP-4 400 mil (option 6)
SFH610A-2-X006	CTR 63 - 125 %, DIP-4 400 mil (option 6)
SFH610A-3-X006	CTR 100 - 200 %, DIP-4 400 mil (option 6)
SFH610A-3-X007	CTR 100 - 200 %, SMD-4 (option 7)
SFH610A-4-X006	CTR 160 - 320 %, DIP-4 400 mil (option 6)

For additional information on the available options refer to Option Information.

SFH610A / SFH6106



Vishay Semiconductors

Absolute Maximum Ratings

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

Stresses in excess of the absolute Maximum Ratings can cause permanent damage to the device. Functional operation of the device is not implied at these or any other conditions in excess of those given in the operational sections of this document. Exposure to absolute Maximum Rating for extended periods of the time can adversely affect reliability.

Input

Parameter	Test condition	Symbol	Value	Unit
Reverse voltage		V_R	6.0	V
DC Forward current		I_F	60	mA
Surge forward current	$t \leq 10\text{ }\mu\text{s}$	I_{FSM}	2.5	A
Power dissipation		P_{diss}	100	mW

Output

Parameter	Test condition	Symbol	Value	Unit
Collector-emitter voltage		V_{CE}	7.0	V
Emitter-collector voltage		V_{EC}	7.0	V
Collector current		I_C	50	mA
	$t \leq 1.0\text{ ms}$	I_C	100	mA
Power dissipation		P_{diss}	150	mW

Coupler

Parameter	Test condition	Symbol	Value	Unit
Isolation test voltage between emitter and detector, refer to climate DIN 40046, part 2, Nov. 74		V_{ISO}	5000	V_{RMS}
Creepage			≥ 7.0	mm
Clearance			≥ 7.0	mm
Insulation thickness between emitter and detector			≥ 0.4	mm
Comparative Tracking Index per DIN IEC 112/VDEO 303, part 1			≥ 175	
Isolation resistance	$V_{IC} = 500\text{ V}$, $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	R_{IC}	$\geq 10^{12}$	Ω
	$V_{IC} = 500\text{ V}$, $T_{amb} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	R_{IC}	$\geq 10^{11}$	Ω
Storage temperature range		T_{stg}	-55 to +150	$^{\circ}\text{C}$
Ambient temperature range		T_{amb}	-55 to +100	$^{\circ}\text{C}$
Junction temperature		T_J	100	$^{\circ}\text{C}$
Soldering temperature	max. 10 s. dip soldering distance to seating plane $\geq 1.5\text{ mm}$	T_{sld}	260	$^{\circ}\text{C}$



SFH610A / SFH6106

Vishay Semiconductors

Electrical Characteristics

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

Minimum and maximum values are testing requirements. Typical values are characteristics of the device and are the result of engineering evaluation. Typical values are for information only and are not part of the testing requirements.

Input

(IR GaAs)

Parameter	Test condition	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit
Forward voltage	$I_F = 60\text{ mA}$	V_F		1.25	1.65	V
Reverse current	$V_R = 6.0\text{ V}$	I_R		0.01	10	μA
Capacitance	$V_R = 0\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}$	C_O		13		pF
Thermal resistance		$R_{thj\alpha}$		750		K/W

Output

(Si Phototransistor)

Parameter	Test condition	Part	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit
Collector-emitter capacitance	$V_{CE} = 5\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}$		C_{CE}		5.2		pF
Thermal resistance			$R_{thj\alpha}$		500		K/W
Collector-emitter leakage current	$V_{CE} = 10\text{ V}$	SFH610A-1 SFH6106-1	I_{CEO}		2.0	50	nA
		SFH610A-2 SFH6106-2	I_{CEO}		2.0	50	nA
		SFH610A-3 SFH6106-3	I_{CEO}		5.0	100	nA
		SFH610A-4 SFH6106-4	I_{CEO}		5.0	100	nA

Coupler

Parameter	Test condition	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit
Collector-emitter saturation voltage	$I_C = 10\text{ mA}, f = 1.0\text{ MHz}$	V_{CEsat}	0.4	0.25		V
Coupling capacitance		C_C		0.4		pF

Current Transfer Ratio

Parameter	Test condition	Part	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit
I_C/I_F	$I_F = 10\text{ mA}, V_{CE} = 5.0\text{ V}$	SFH610A-1 SFH6106-1	CTR	40		80	%
		SFH610A-2 SFH6106-2	CTR	63		125	%
		SFH610A-3 SFH6106-3	CTR	100		200	%
		SFH610A-4 SFH6106-4	CTR	160		320	%
	$I_F = 1.0\text{ mA}, V_{CE} = 5.0\text{ V}$	SFH610A-1 SFH6106-1	CTR	13	30		%
		SFH610A-2 SFH6106-2	CTR	22	45		%
		SFH610A-3 SFH6106-3	CTR	34	70		%
		SFH610A-4 SFH6106-4	CTR	56	90		%

SFH610A / SFH6106

Vishay Semiconductors

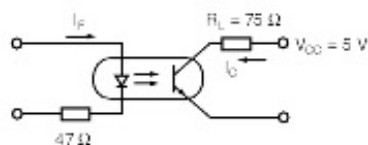


Switching Non-saturated

Parameter	Current	Rise time	Fall time	Turn-on time	Turn-off time	Cut-off frequency
Test condition	$V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $R_L = 75\ \Omega$					$V_{CC} = 5.0\text{ V}$
Symbol	I_F	t_r	t_f	t_{on}	t_{off}	F_{CO}
Unit	mA	μs	μs	μs	μs	kHz
	10	2.0	2.0	3.0	2.3	25.0

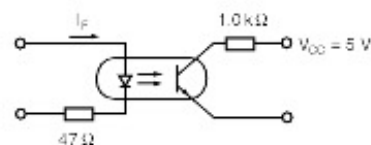
Switching Saturated

Parameter	Current	Rise time	Fall time	Turn-on time	Turn-off time
Symbol	I_F	t_r	t_f	t_{on}	t_{off}
Unit	mA	μs	μs	μs	μs
SFH610A-1 SFH6106-1	20	2.0	1.1	3.0	1.0
SFH610A-2 SFH6106-2	10	3.0	1.4	4.2	2.3
SFH610A-3 SFH6106-3	10	3.0	1.4	4.2	2.3
SFH610A-4 SFH6106-4	5.0	4.6	1.5	6.0	2.5

Typical Characteristics ($T_{amb} = 25\ ^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

486 14/03

Fig. 1 Linear Operation (without Saturation)



486 14/03

Fig. 2 Switching Operation (with Saturation)



SFH610A / SFH6106

Vishay Semiconductors

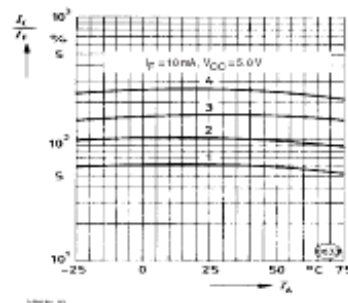


Fig. 3 Current Transfer Ratio (CTR) vs. Temperature

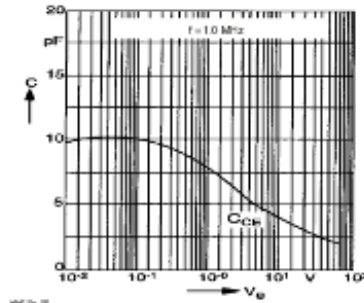


Fig. 6 Transistor Capacitance (typ.) vs. Collector-Emitter Voltage

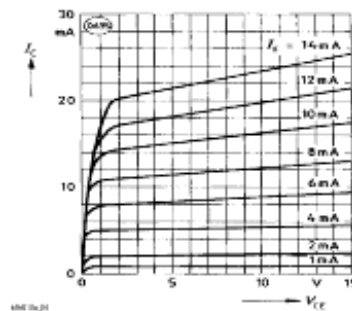


Fig. 4 Output Characteristics (typ.) Collector Current vs. Collector-Emitter Voltage

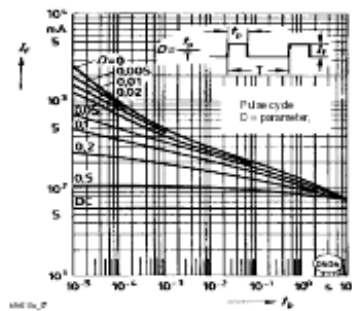


Fig. 7 Permissible Pulse Handling Capability Forward Current vs. Pulse Width

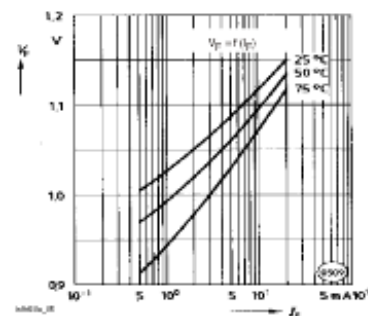


Fig. 5 Diode Forward Voltage vs. Forward Current

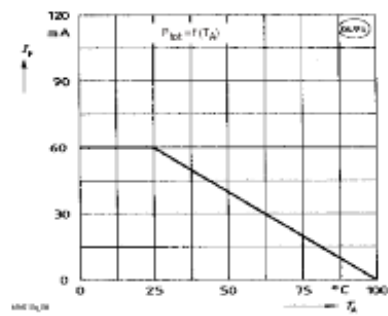


Fig. 8 Permissible Power Dissipation vs. Temperature

SFH610A / SFH6106

Vishay Semiconductors

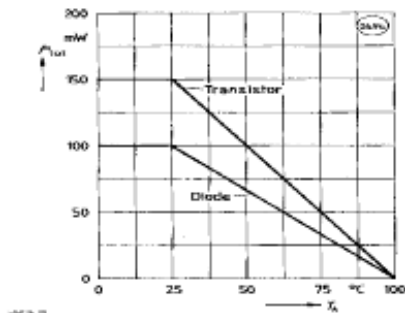
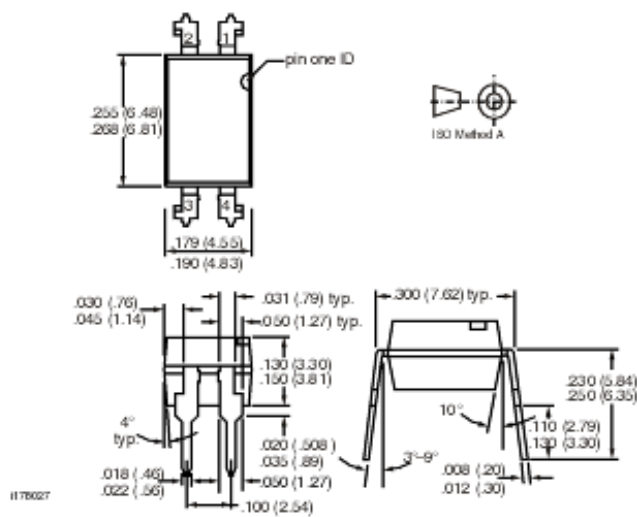


Fig. 9 Permissible Diode Forward Current vs. Ambient Temperature

Package Dimensions in Inches (mm)

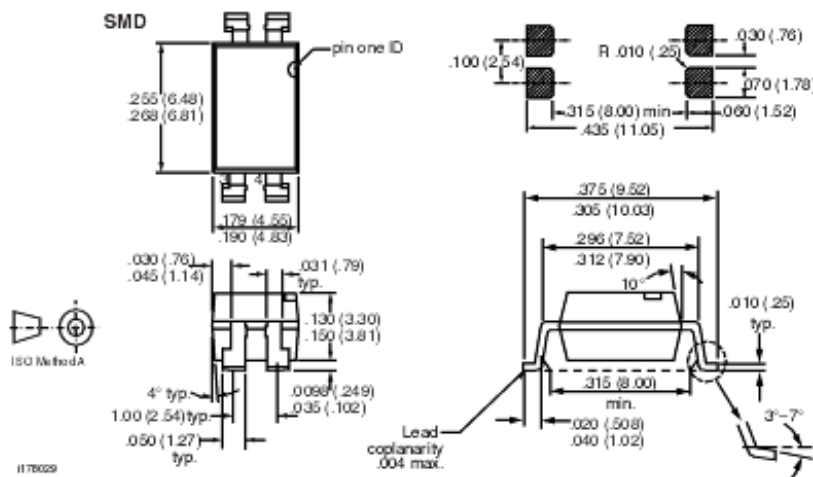




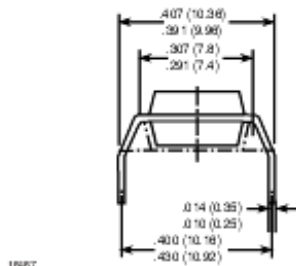
SFH610A / SFH6106

Vishay Semiconductors

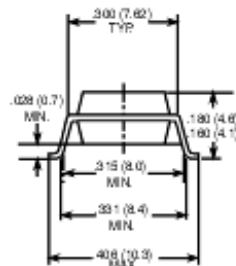
Package Dimensions in Inches (mm)



Option 6



Option 7



SFH610A / SFH6106



Vishay Semiconductors

Ozone Depleting Substances Policy Statement

It is the policy of Vishay Semiconductor GmbH to

1. Meet all present and future national and international statutory requirements.
2. Regularly and continuously improve the performance of our products, processes, distribution and operating systems with respect to their impact on the health and safety of our employees and the public, as well as their impact on the environment.

It is particular concern to control or eliminate releases of those substances into the atmosphere which are known as ozone depleting substances (ODS).

The Montreal Protocol (1987) and its London Amendments (1990) intend to severely restrict the use of ODSs and forbid their use within the next ten years. Various national and international initiatives are pressing for an earlier ban on these substances.

Vishay Semiconductor GmbH has been able to use its policy of continuous improvements to eliminate the use of ODSs listed in the following documents.

1. Annex A, B and list of transitional substances of the Montreal Protocol and the London Amendments respectively
2. Class I and II ozone depleting substances in the Clean Air Act Amendments of 1990 by the Environmental Protection Agency (EPA) in the USA
3. Council Decision 88/540/EEC and 91/690/EEC Annex A, B and C (transitional substances) respectively.

Vishay Semiconductor GmbH can certify that our semiconductors are not manufactured with ozone depleting substances and do not contain such substances.

We reserve the right to make changes to improve technical design and may do so without further notice.

Parameters can vary in different applications. All operating parameters must be validated for each customer application by the customer. Should the buyer use Vishay Semiconductors products for any unintended or unauthorized application, the buyer shall indemnify Vishay Semiconductors against all claims, costs, damages, and expenses, arising out of, directly or indirectly, any claim of personal damage, injury or death associated with such unintended or unauthorized use.

Vishay Semiconductor GmbH, P.O.B. 3535, D-74025 Heilbronn, Germany
Telephone: 49 (0)7131 67 2831, Fax number: 49 (0)7131 67 2423

Liite 4. Valo-ohjatus releen IR PVT412 datalehti

International
IR Rectifier

Data Sheet No. PD 60040E

Series PVT412

Microelectronic Power IC

HEXFET® Power MOSFET Photovoltaic Relay
 Single Pole, Normally Open,
 0-400V, 140mA AC/DC

General Description

The PVT412 Series Photovoltaic Relay is a single-pole, normally open solid-state relay that can replace electromechanical relays in many applications. It utilizes International Rectifier's proprietary HEXFET power MOSFET as the output switch, driven by an integrated circuit photovoltaic generator of novel construction. The output switch is controlled by radiation from a GaAlAs light emitting diode (LED) which is optically isolated from the photovoltaic generator.

These SSRs are specifically designed for worldwide telecom applications. PVT412L employs an active current-limiting circuitry enabling it to pass FCC Part 68 and other regulatory agency current surge requirements when overvoltage protection is provided. PVT412 does not employ the current-limiting circuitry and offers lower on-state resistance.

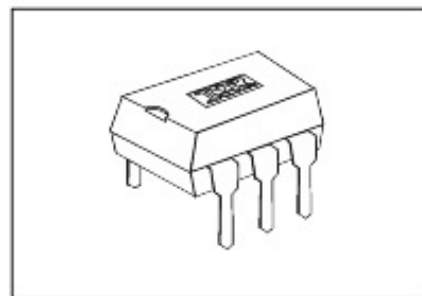
Series PVT412 Relays are packaged in a 6-lead molded DIP package with either through-hole or surface mount ("gull-wing") terminals. It is available in standard plastic shipping tubes or on tape-and-reel. Please refer to part identification information opposite.

Applications

- On/Off Hook switch
- Dial-Out relay
- Ring relay
- General switching

Features

- HEXFET Power MOSFET output
- Bounce-free operation
- 4,000 V_{ISO} I/O isolation
- Load current limiting
- Linear AC/DC operation
- Solid-State Reliability
- UL recognized and BABT certified
- ESD Tolerance:
 - 4000V Human Body Model
 - 500V Machine Model

**Part Identification**

PVT412L	current limit, through-hole
PVT412LS	current limit, surface-mount
PVT412LS-T	current limit, surface-mount, Tape and Reel
PVT412	no current limit, through-hole
PVT412S	no current limit, surface-mount
PVT412S-T	no current limit, surface-mount, Tape and Reel

(HEXFET is the registered trademark for International Rectifier Power MOSFETs)

Series PVT412

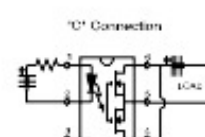
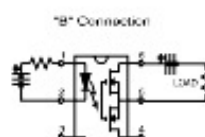
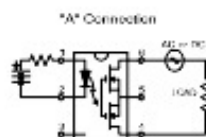
International
IGR RectifierElectrical Specifications ($-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +85^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified)

INPUT CHARACTERISTICS	Part Numbers		Units
	PVT412L	PVT412	
Minimum Control Current (see figures 1 and 2)	3.0		mA
Maximum Control Current for Off State Resistance	0.4		mA
Control Current Range/Caution current limit input LED (see figure 6)	3.0 to 25		mA
Maximum Reverse Voltage	7.0		V

OUTPUT CHARACTERISTICS	PVT412L		PVT412	Units
	0 to 1400			
Operating Voltage Range	0 to 1400			V _{DC} or AC peak
Maximum Load Current @ $T_A = +40^{\circ}\text{C}$ 5mA Control (see figures 1 and 2)	A Connection	120	140	mA (AC or DC)
	B Connection	130	150	mA (DC)
	C Connection	200	210	mA (DC)
Maximum On State Resistance @ $T_A = +25^{\circ}\text{C}$ For 50mA Pulsed Load, 5mA Control (see figure 4)	A Connection	35	27	Ω
	B Connection	18	14	Ω
	C Connection	9	7	Ω
Maximum Off State Leakage @ $T_A = +25^{\circ}\text{C}$, 140V (see figure 5)	1.0			μA
Current Limit @ $T_A = +25^{\circ}\text{C}$ For 5mA Control Current:				
	Connection	A	C	n/A
	Minimum	130	260	mA
	Maximum	220	440	mA
Complies with FCC Part 68 Surge Requirements*	yes		yes	
Maximum Turn On Time @ $T_A = +25^{\circ}\text{C}$ (see figure 7)				
For 50mA, 100 V _{DC} load, 5mA Control	2.0			ns
Maximum Turn Off Time @ $T_A = +25^{\circ}\text{C}$ (see figure 7)				
For 50mA, 100 V _{DC} load, 5mA Control	0.5			ns
Maximum Thermal Offset Voltage @ 5mA Control	0.5			μV
Maximum Output Capacitance @ 50V _{DC}	12			pF

GENERAL CHARACTERISTICS	ALL MODELS		
Minimum Dielectric Strength, Input/Output	4000		V _{RMS}
Minimum Insulation Resistance, Input/Output @ $T_A = +25^{\circ}\text{C}$, 50%RH, 100V _{DC}	10^{12}		Ω
Maximum Capacitance, Input/Output	1.0		pF
Maximum Pin Soldering Temperature (10 seconds maximum)	+260		
Ambient Temperature Range:	Operating	40 to +85	$^{\circ}\text{C}$
	Storage	40 to +100	

Connection Diagrams



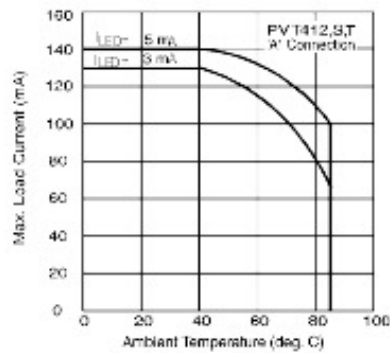


Figure 1. Current Derating Curves*

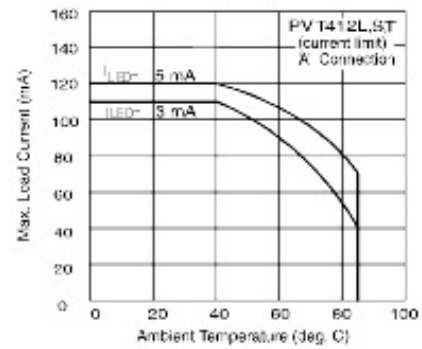


Figure 2. Current Derating Curves*

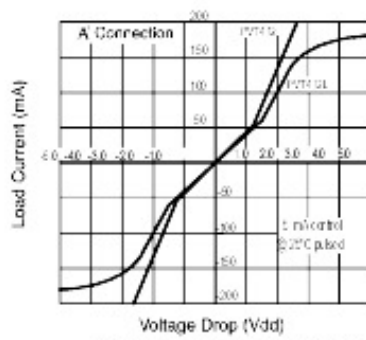


Figure 3. Linearity Characteristics

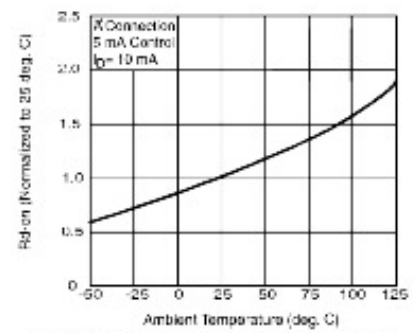


Figure 4. Typical Normalized On Resistance

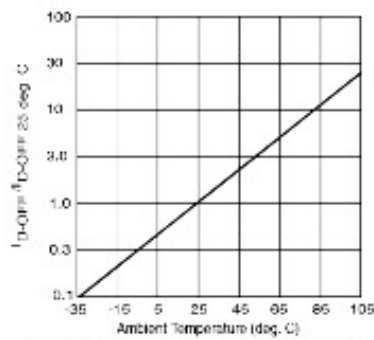


Figure 5. Typical Normalized Off-State Leakage

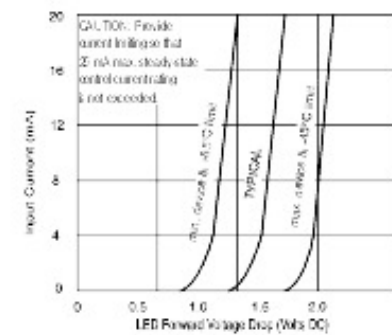


Figure 6. Input Characteristics (Current Controlled)

* Derating of B' and C' connection at +85°C will be 70% of that specified at +40°C and is linear from +40°C to +85°C.

Series PVT412

International
IGR Rectifier

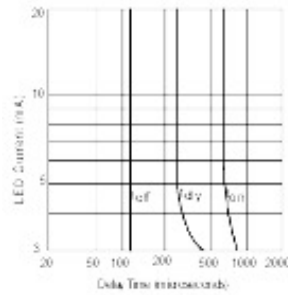


Figure 7. Typical Delay Times

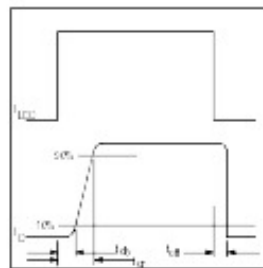


Figure 8. Delay Time Definitions

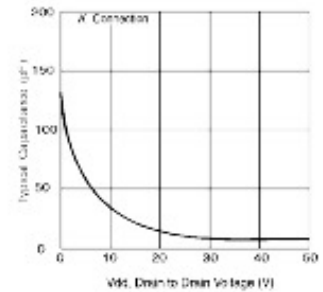
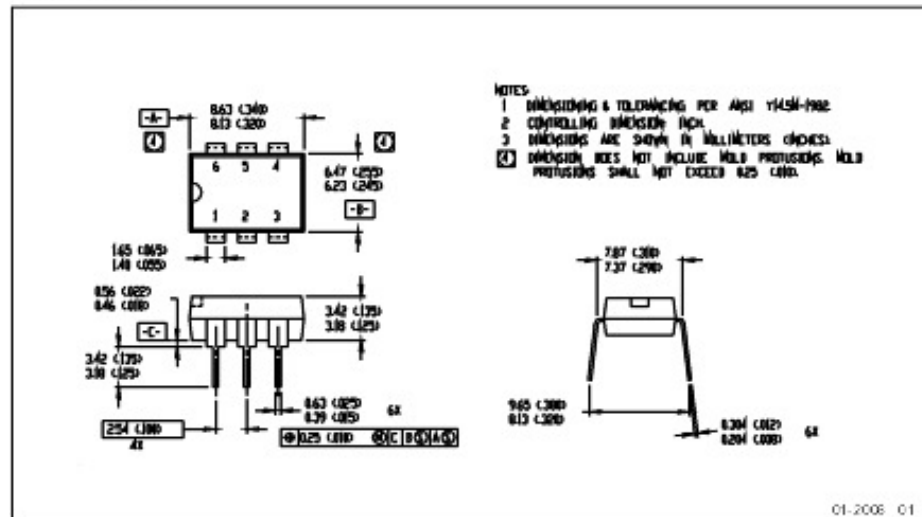
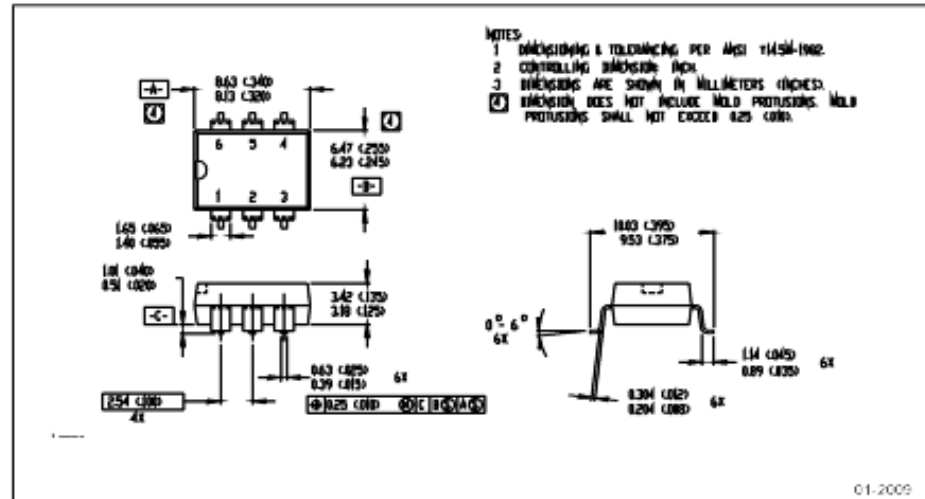


Figure 9. Typical Output Capacitance

Case Outlines



Case Outlines



IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., D. Segundo, California 90245 Tel: (310) 252-7105
 IR EUROPEAN REGIONAL CENTRE: 439/445 Godstone Rd., Whyteleafe, Surrey CR3 0BL, United Kingdom
 Tel: +44 (0)20 8645 8000
 IR JAPAN: K&H Bldg., 2F, 30-4 Nishi-Ikebukuro 3-Chome, Toshima-Ku, Tokyo, Japan 171-0021 Tel: 8133 983 0086
 IR HONG KONG: Unit 308, 17F, New East Ocean Centre, No. 9 Science Museum Road, Tsimshatsui East, Kowloon
 Hong Kong Tel: (852) 2903 7380
 Data and specifications subject to change without notice. 8/5/2000