

Teemu Joensuu, Tomi Eronen

Taajuusmuuttajan ohjauksen suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka, Elektroniikka

Insinöörityö

26.11.2013

Tekijät Otsikko	Teemu Joensuu, Tomi Eronen Taajuusmuuttajan ohjauksen suunnittelu
Sivumäärä Aika	32 sivua + liite 26.11.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka, elektroniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka, elektroniikka
Ohjaajat	lehtori Eero Kupila lehtori Janne Mäntykoski
<p>Tämän insinööriyön tavoitteena on käyttöönottaa Metropolia Ammattikorkeakoulun opetuskäyttöön hankittu Semikron AN-8005-taajuusmuuttaja. Tulevaisuuden tavoitteena on ohjata taajuusmuuttajalla oikosulkumoottoria. Taajuusmuuttajan ohjaus toteutettiin rakentamalla käyttöliittymä LabVIEW-ohjelmalla käyttäen hyväksi mbed lpc1768-mikrokontrolleria. Opetuskäytön takia käyttöliittymä pyrittiin rakentamaan mahdollisimman selkeäksi sekä havainnollistavaksi.</p> <p>Ensinnä työssä on esitelty taajuusmuuttajan rakennetta, niissä käytettäviä komponentteja ja perehdytty pulssinleveysmodulaatioon. Taajuusmuuttaja on sähkölaite, jolla voidaan säätää sitä syöttävän sähköverkon jännitteen taajuutta sekä amplitudia. Yleisimmin taajuusmuuttaja onkin kytkettynä valtakunnallisen sähköverkon ja sähkömoottorin tai generaattorin välille.</p> <p>Taajuusmuuttajissa komponentteina käytetään diodeja, tyristereita ja transistoreita. Käytettyin yhdistelmä on diodeilla rakennettu tasasuuntaaja ja IGBT:llä valmistettu vaihtosuuntaaja.</p> <p>Pulssinleveysmodulaatio on modulointitapa, jonka avulla muutetaan signaalin pulssisuhdetta, jolloin kuorman jännite muuttuu. Pulssileveysmodulaatiota käytetään nykyään hyvin paljon sulautetuissa järjestelmissä.</p> <p>Työn loppuosassa on esitelty tarkemmin laitteistossa käytettäviä komponentteja ja niistä koostuva mittauskytkentä.</p> <p>Insinööriyön lopputuloksena rakennettiin taajuusmuuttajan säätöohjelma ja signaalin vahvistuspiiri. Ohjelmasta ei saatu vielä tarpeeksi vakaata, että sillä voisi ohjata oikosulkumoottoria.</p>	
Avainsanat	taajuusmuuttaja, PWM, mbed, Semikron, LabVIEW

Authors Title	Teemu Joensuu, Tomi Eronen Designing of the Frequency Converter Control.
Number of Pages Date	32 pages + appendix 26 November 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering, Electronics
Specialisation option	Electrical Power Engineering, Electronics
Instructors	Eero Kupila, Senior Lecturer Janne Mäntykoski, Senior Lecturer.
<p>The aim of this thesis was to take into use the Semikron AN-8005 frequency converter, which was purchased for educational use of Metropolia university of applied sciences, and possibly control an induction motor with it. Controlling of the frequency converter was accomplished by building a user interface in LabVIEW and using the mbed lpc1768 micro-controller. Because of the educational use, the user interface was sought to be built as clear and visualizing as possible.</p> <p>First the thesis introduces the structure of the frequency converter, components that are used in it, and the pulse-width modulation (PWM). A frequency converter is an electronic device which can be used to control frequency and amplitude of the voltage feed. Most commonly frequency converter is connected between the national grid and an electric motor or generator.</p> <p>Components that are used in the frequency converter are diodes, thyristors and transistors. The most common combination is a rectifier that is built with diodes and an inverter that is built with IGBTs.</p> <p>Pulse-width modulation is a modulation method which can be used to change the signal's pulse ratio causing loads voltage to change. It is used a lot in embedded systems.</p> <p>At the end of the thesis, equipment used in the measuring circuit and their function are introduced more specifically.</p> <p>As a result of the thesis, frequency converter's controlling program and signal's amplification circuit was built. The final program was not stable enough to control an induction motor.</p>	
Keywords	Frequency converter, PWM, mbed, Semikron, LabVIEW

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Taajuusmuuttaja	2
2.1	Tasasuuntaaja	3
2.2	Taajuusmuuttajan välipiiri ja vaihtosuuntaaja	3
2.3	Yleisimpiä taajuusmuuttajissa käytettäviä komponentteja	6
2.4	Pulssinleveysmodulaatio	10
3	Semikron AN-8005-taajuusmuuttaja	13
4	Mbed lpc1768-mikrokontrolleri	14
4.1	Mikrokontrollerin ja tietokoneen välinen yhteys	15
5	Vahvistuspiiri	17
6	Piirilevyn suunnittelu	22
7	Taajuusmuuttajan ohjauksen ohjelmointi	23
8	Mittauskytkentä ja mittaustulokset	27
9	Johtopäätökset	31
	Lähteet	32

Liitteet

Liite. Taajuusmuuttajan komponenttien teknisiä tietoja

Lyhenteet

ARM	Advanced RISC Machines. Maailman eniten valmistettu 32-bittinen mikroprosessoriarkkitehtuuri.
CSI	Current Source Inverter. Virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja.
GTO	Gate Turn Off. Hilalta sammutettavat tyristorit.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor. Suuritehoinen bipolaaritransistori, jonka hila on eristetty.
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor.
LCI	Load Commutated Inverter. Kuormakommutoitu taajuusmuuttaja.
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor. Kanavatransistori.
PWM	Pulse-Width Modulation. Modulointi tapa, jossa kuorman jännitettä säädetään muuttamalla pulssisuhdetta.
RPC	Remote Procedure Call. Prosessien välinen kommunikaatio
VSI	Voltage Source Inverter. Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja.

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoitteena on käyttöönottaa Metropolia ammattikorkeakoulun opetuskäyttöön hankittu Semikron AN-8005-taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttaja on sähkölaite, jolla voidaan säätää sitä syöttävän sähköverkon jännitteen taajuutta sekä amplitudia.

Taajuusmuuttajan ohjaus toteutettiin rakentamalla käyttöliittymä National Instrumentsin kehittämällä LabVIEW-ohjelmointiympäristöllä käyttäen hyväksi mbed lpc1768-mikrokontrolleria. Opetuskäytön takia käyttöliittymä pyrittiin rakentamaan mahdollisimman selkeäksi ja havainnolliseksi. Taajuusmuuttajan ohjaukseen luotiin pulssinleveysmoduloidut ohjaussignaalit, jotka vahvistettiin erillisellä piirillä. Vahvistuspiiri suunniteltiin Multisim-ohjelmalla ja piirilevy suunniteltiin PADS-ohjelmalla.

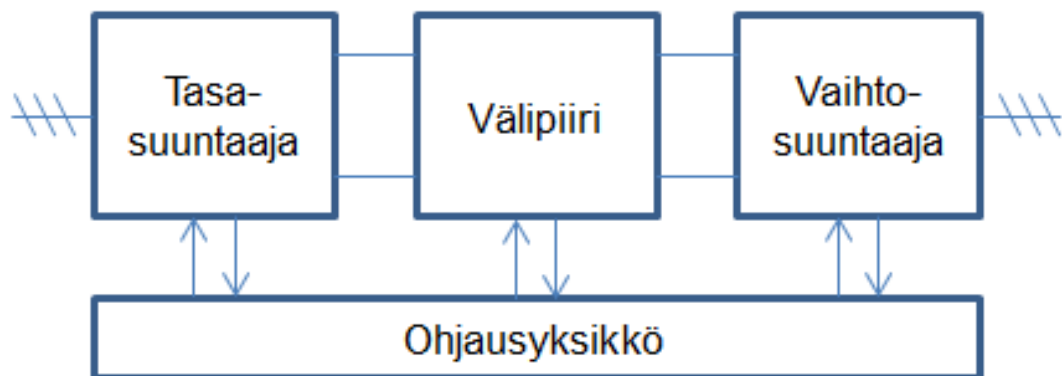
Pulssinleveysmodulaatio on modulaatiotapa, jossa muutetaan signaalin pulssisuhdetta. Pulssinleveysmodulaatio on laajalti käytössä sulautetuissa järjestelmissä, joissa sähkönkulutus halutaan saada mahdollisimman pieneksi.

Nykyään teollisuus kuluttaa 42 % kaikesta maailman sähköstä ja tästä osasta $\frac{2}{3}$ kuluttavat sähkömoottorit. Maailmassa on 300 miljoonaa sähkömoottoria ja luku kasvaa vuosittain 10 %. Älykkäillä ohjausjärjestelmillä voidaan tehostaa moottoreiden toimintaa ja vähentää sähkönkulutusta jopa 60 %.

2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on sähkölaite, jolla voidaan säätää sitä syöttävän sähköverkon jännitteen taajuutta ja amplitudia. Taajuuden muuttaminen on ainoa tapa säätää moottorin pyörimisnopeutta portaattomasti. Yleisimmin taajuusmuuttaja onkin kytkettynä valtakunnallisen sähköverkon ja sähkömoottorin tai -generaattorin välille. Tällaisessa käytössä moottoria voidaan pyörittää halutulla pyörimisnopeudella riippumatta syöttävän verkon taajuudesta. Tällöin saadaan tehostettua moottorilla suoritettavaa prosessia huomattavasti.

Taajuusmuuttajia on kahdentyyppisiä, suoria sekä välipiirillisiä. Suorissa taajuusmuuttajissa syöttävä sähkö pilkotaan suoraan puolijohdekytkimillä halutun taajuiseksi ja jännitteiseksi vaihtosähköksi tai tasajännite katkotaan matalammaksi tasajännitteeksi. Tällaisia ovat matriisimuuttaja sekä syklokonvertteri, mutta näistä varsinkaan matriisimuuttaja ei ole yleisessä käytössä käytännön rajoitusten takia. Matriisimuuttajassa lähtöjännite voi olla maksimissaan vain 86 % syöttöverkon jännitteestä ja syklokonvertterissa käyttökelpoinen lähtötaajuus on maksimissaan vajaa puolet syöttävän verkon taajuudesta. [1, s. 50 - 52; 2, s. 136 – 138.]

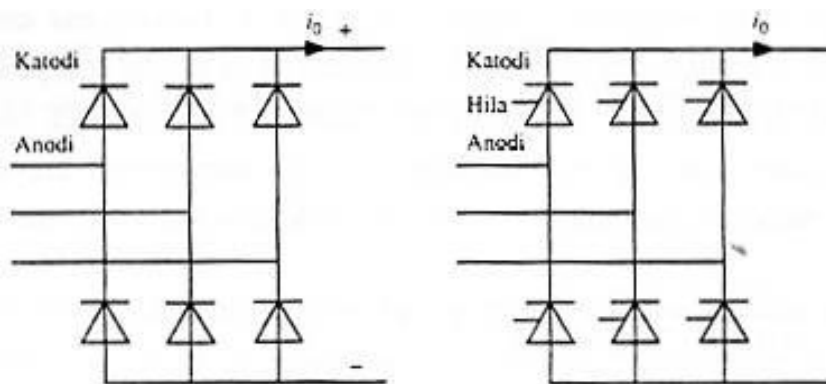


Kuva 1. Taajuusmuuttajan rakenne

Välipiirillisissä taajuusmuuttajissa sähkö muutetaan ensin tasasähköksi tasasuuntaajan avulla ja sitten taas vaihtosähköksi vaihtosuuntaajalla. Yleensä käytetään välipiirillisiä taajuusmuuttajia (kuva 1), jotka koostuvat kolmesta pääosasta: tasasuuntaajasta, tasajännitevälipiiristä sekä vaihtosuuntaajasta.

2.1 Tasasuuntaaja

Taajuusmuuttajassa ensimmäisenä oleva tasasuuntaaja muuttaa syöttöverkon vaihtojännitteen aaltoilevaksi tasajännitteeksi. Aaltoilevuutta voidaan pienentää suodattimen avulla. Tasasuuntaus voidaan toteuttaa tyristoreilla, diodeilla, tehotransistoreilla tai näiden yhdistelmillä, mutta diodeilla toteutettu tasasuuntaaja on yksinkertaisin sekä yleisin käytetty vaihtoehto, jota käytetään lähes poikkeuksetta nykyisissä elektroniikkalaitteissa. Kuvassa 2 esitetään kaksi yleisintä rakennusvaihtoehtoa tasasuuntaajalle. Diodeilla toteutettua tasasuuntaajaa kutsutaan ohjaamattomaksi tasasuuntaajaksi ja tyristoreilla tai tehotransistoreilla toteutettua vaihtoehtoa kutsutaan täysinohjatuksi.



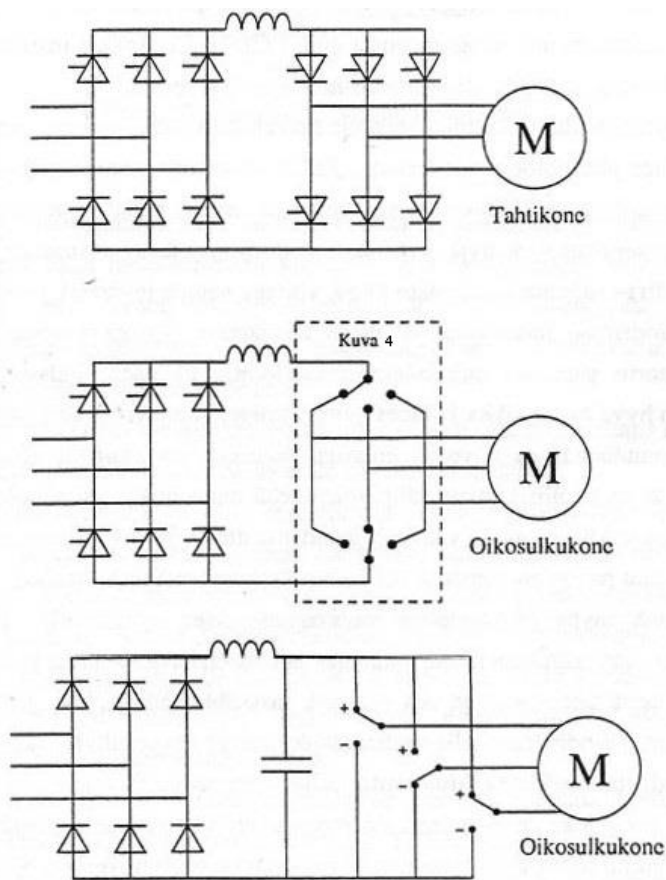
Kuva 2. Diodisilta ja tyristorisilta [1, s. 42.]

Diodisillan etuja ovat sen hyvä tehokerroin sekä automaattinen toiminta. Tyristorisillan etuja ovat säädettävyys ja vaihtosuuntausmahdollisuus. Diodisillan huono puoli on ohjausmahdollisuuden puuttuminen, ja virta voi kulkea vain yhteen suuntaan. Usein näillä haitoilla ei ole kuitenkaan suurta merkitystä. Tyristorisillalla haittana on huono tehokerroin lähtöjännitteen ollessa lähellä nollaa. [1, s. 40 - 44.]

2.2 Taajuusmuuttajan välipiiri ja vaihtosuuntaaja

Taajuusmuuttajat voidaan lajitella välipiirien perusteella jänniteohjattuihin ja virtaohjattuihin. Virtaohjattu taajuusmuuttaja syöttää moottoriin sellaisen virran, jolla saadaan moottorin napoihin haluttu jännite. Virtavälipiiri muodostuu tasoituskuristimesta, jolla pienennetään tasavirran aaltoisuutta. Yleisemmin käytetyssä jänniteohjatussa taajuusmuuttajassa on kondensaattori, jolla yritetään pienentää tasajännitteen aaltoisuutta.

ta. Jännitevälipiirin kondensaattorin ja tasasuuntaajan välissä saattaa olla myös tasoituskuristin. Kuvassa 3 esitetään kaikki välipiiritaajuusmuuttajan vaihtoehdot.



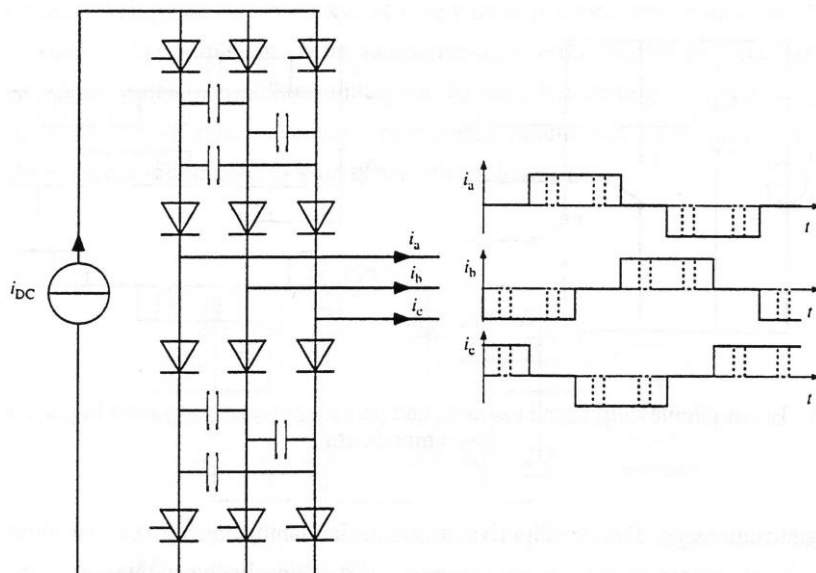
Kuva 3. Erilaisia välipiiritaajuusmuuttajia; kuormakommutoitu-, virtavälipiiri- sekä jännitevälipiiritaajuusmuuttaja [1, s. 49.]

Välipiirin tehtävänä on erottaa tasasuuntaaja ja vaihtosuuntaaja toisistaan ja toimia taajuusmuuttajan hyvin pienenä energiavarastona. Jos yhtäkkiä tarvitaan enemmän energiaa, kuin välipiiristä on saatavilla, se joudutaan ottamaan verkosta aiheuttaen epätasaisuutta verkon jännitteeseen. Tämä epätasaisuus saattaa häiritä muiden verkokäyttäjien laitteita.

Virtaohjattu välipiiri voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla. Yksinkertaisin on kuormakommutoitu taajuusmuuttaja eli LCI (Load Commutated Inverter). LCI koostuu vain kahdesta tyristorisillasta, jotka ovat kytketty verkon ja tahtikoneen välille. Siltoja yhdistää välipiirin tasoituskuristin. Moottorikäytössä verkonpuoleinen silta toimii tasasuuntaa-

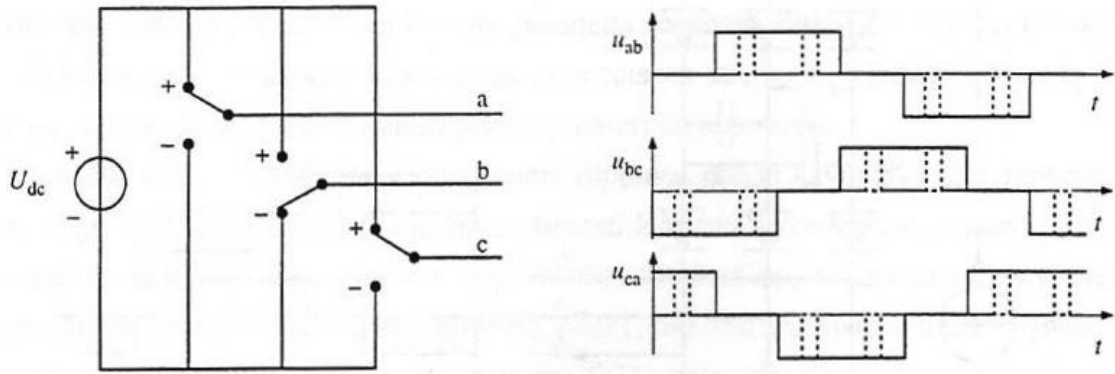
jana ja koneen puoleinen toimii vaihtosuuntaajana. Generaattorikäytössä osat vaihtuvat toisin päin.

LCI-kytkennän huonona puolena on tyristorien epäluotettava kommutointi pienillä nopeuksilla. Tämä tekee vääntömomentista varsin nykivää, koska verkonpuoleisella sillalla joudutaan ohjaamaan välipiirin virta noltaan aina, kun seuraava koneenpuoleisen sillan tyristori pitää sytyttää ja johtava sammuttaa. Tämä joudutaan tekemään tyypillisesti 5 - 10 %:n nopeuksilla. Tästä johtuen LCI ei sovellu käyttöihin joissa vaaditaan suurta vääntömomenttia pienillä kierrosnopeuksilla. LCI-kytkennän pääsovelluksia ovatkin yli 1 MW:n tehoiset ja yli 100 $1/\text{min}$ pyörivät kompressor-, pumppu- ja puhallinkäytöt.



Kuva 4. Virtavälipiirivaihtosuuntaaja [1, s. 47.]

Toinen tapa rakentaa virtavälipiiri on korvata LCI:n koneen puoleinen tyristorisilta kuvan 4 kytkennällä. Tällä tavalla rakennettu kytkentä soveltuu hyvin oikosulkumoottori käyttöön. Tästä muuttajasta käytetään englanninkielistä lyhennettä CSI (Current Source Inverter). Kuormakommutoidun taajuusmuuttajan tapaan CSI toimii sekä moottorina että generaattorina. Kondensaattoreiden takia välipiirin virtaa ei tarvitse katkoa pienilläkään nopeuksilla, mikä tekee vääntömomentista paljon tasaisempaa kuin LCI:llä. Kytkentä mahdollistaa myös pulssinleveysmodulaation eli PWM:n käytön, jolla voidaan parantaa ominaisuuksia jonkin verran.



Kuva 5. Jännitevälipiiritaajuusmuuttaja [1, s. 48.]

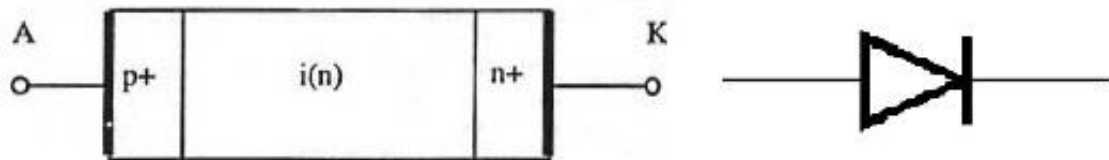
Kolmas ja nykyisin käytetyin taajuusmuuttajatyyppejä on kuvassa 5 esitetty jännitevälipiiritaajuusmuuttaja VSI (Voltage Source Inverter), jossa käytetään diodisiltaa tuottamaan välipiirin tasajännite. Jännitevälipiiriä käyttämällä joudutaan hyödyntämään pulssinleveysmodulaatiota säädettäessä moottorin jännitettä, koska diodisiltaa ei voida ohjata. Pulssileveysmodulointia käyttäen voidaan lähtöjännitteen keskiarvoa säätää melkein viiveettä muuttamalla pulssien leveyksiä. Tämän takia vaihdevirrasta saadaan lähes sinimuotoinen.

Jos konetta halutaan jarruttaa enemmän kuin muuttajan ja koneen häviöt mahdollistavat, tulee välipiiriin lisätä jarruvastus ja sitä syöttävä tasasähkökatkoja. Diodisilta estää jarrutustehon vaihtosuuntauksen syöttöverkkoon. Diodisillan tilalle voidaan myös vaihtaa vastarinnankytetty tyristorisilta tai verkkovaihtosuuntaaja, joka on identtinen vaihtosuuntaajan kanssa. Verkkovaihtosuuntaajan etuna on diodi- ja tyristorisilloja sinimuotoisempi verkkovirta. [1, s. 46 - 50.]

2.3 Yleisimpiä taajuusmuuttajissa käytettäviä komponentteja

Tehoelektroniikka tarkoittaa elektroniikkaa, jossa käsitellään suuria tehoja eli jännitteet ja virrat ovat suuria. Tehoelektroniikkapiirit käyttävät puolijohdekomponentteja kytkimänä, jolloin niillä kontrolloidaan tai muutetaan virtaa tai jännitettä. Tyypillisiä tehoelektroniikan sovelluksia ovat vaihtojännitteen muuntaminen tasajännitteeksi, tasajännitteen muuntaminen vaihtojännitteeksi ja vaihtojännitesignaalin amplitudin ja taajuuden muuntaminen eriarvoiseksi.

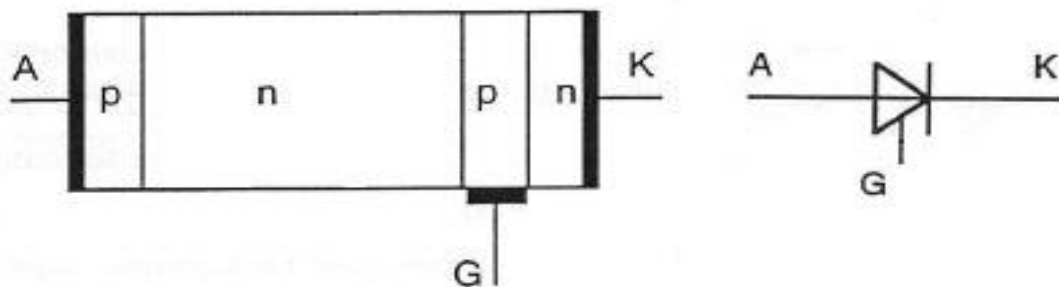
Diodi on yksinkertainen puolijohdekomponentti, joka päästää virtaa vain toiseen suuntaan. Diodia ei voida ohjata, joten sen johtavuus määräytyy piirin virroista sekä jännitteistä. Diodi johtaa, kun sen läpi menevä virta on positiivinen ja estää virran kulun diodin jännitteen ollessa negatiivinen.



Kuva 6. Diodin rakenne sekä piirrosmerkki [3, s. 26.]

Tehoelektronikassa käytettävät tehodiodit ovat yleensä pin-seostettuja. Pin-diodi on kolmikerroksinen versio pn-diodista, jonka p ja n kerrosten välissä oleva keskus (kuva 6) on heikosti seostettua n-tyyppistä piitä. Heikosti seostetulla alueella kasvatetaan diodin jännitteenkestoisuutta. Tämän takia estotilassa diodin vuovirta ei kasva paljon, mutta päästötilassa pin-diodi ei eroa merkittävästi tavallisesta pn-diodista. [3, s. 26 - 27; 4, s. 6 - 7.]

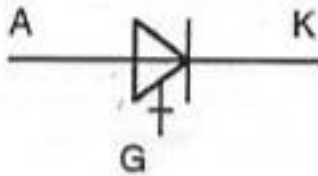
Toisin kuin diodia, tyristoria voidaan ohjata. Tyristori saadaan johtavaan tilaan antamalla tarpeeksi pitkä virtapulssi hilalle, joka saa hilan ja katodin välisen liitoksen (kuva 7) johtavaan tilaan. Tyristori on johtavassa tilassa niin kauan, kunnes anodin ja katodin välinen virta pienenee alle tyristorille ominaisen pitovirran. Kun kuormavirta pienenee alle pitovirran, tyristori siirtyy johtamattomaan tilaan. Kuormavirtaa pienennetään usein kasvattamalla estosuuntaista jännitettä.



Kuva 7. Tyristorin rakenne sekä piirrosmerkki [3, s. 47.]

Tyristori on nelikerroskomponentti, jossa keskellä olevat alueet ovat heikommin seostettuja kuin ulommat alueet. Sekä anodin että katodin puoleiset liitokset pystyvät vahvistamaan virtaa.

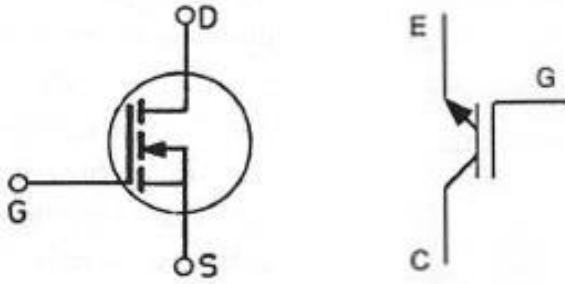
GTO (Gate Turn Off) tyristorit ovat hilalta sammutettavia tyristoreita. Ensimmäiset GTO-tyristorit keksittiin 60-luvun alkupuolella, mutta niiden virtakestoisuus oli liian pieni. Vasta 70-luvulla parantunut valmistustekniikka salli suurtehoalueen GTO-tyristoreille. Hilalta sammutettavat tyristorit ovat tyristoreita, jotka voidaan sytyttää hilalta positiivisella virtapulssilla sekä sammuttaa negatiivisella virtapulssilla. GTO:n sammutus voidaan tehdä normaalin tyristorin tavoin, mutta siinä pitää ottaa huomioon, että estojännitekestoisuus voi olla todella pieni. GTO-tyristorin piirrosmerkki esitetään kuvassa 8



Kuva 8. GTO-tyristorin piirrosmerkki [3, s. 52]

IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) on 1996 julkistettu tyristori. Se on periaatteeltaan sama kuin GTO-tyristori, mutta sen negatiivinen virta kasvatetaan hyvin nopeasti anodivirran suuruiseksi. Tällöin katodivirta pienenee nolnaan hyvin nopeasti, josta seuraa parempi jännitekestoisuus.

GTO-tyristorien hila vie paljon puolijohdepintaa, joten sen virtakestoisuus ei ole yhtä hyvä kuin tavallisilla tyristoreilla. Niiden hinta on pysynyt korkeana, koska niiden valmistaminen on vaikeaa. IGBT on syrjäyttänyt alle 450 V:n GTO-tyristorit. GTO:n ja IGCT:n pääasialliset käyttökohteet ovat alle 300 - 1000 Hz:n kytkentätaajuuksilla toimivat suurtehoiset ja erityisesti keskijännitteiset sovellukset. [3, s. 45 - 61; 4, s. 7 - 8.]

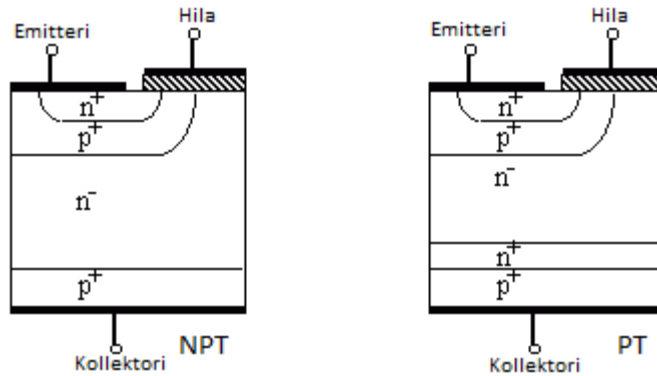


Kuva 9. Tehotransistorit MOSFET ja IGBT [3, s. 89, 99.]

Tärkeimpiä tehotransistoreja ovat kuvassa 9 esitetyt kanava- ja IGBT-transistorit. Kanavatransistoreita (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET) on useaa eri tyyppiä, joista tavallisin on avaustyyppinen n-kanava MOSFET. MOSFET:n rakenteen huonona puolena on hilan ja lähteen välisen jännitteen yhtäkkinen kasvu virran kasvaessa. Mutta oikein ohjattuna, kytkentähäviöt ovat MOSFET:lla pienet ja pystytään käyttämään suuriakin kytkentätaajuuksia.

IGBT:n (Insulated Gate Bipolar Transistor) rakenne on melkein samanlainen kuin MOSFET:n. Rakenteeseen on ainoastaan lisätty p-tyyppin puolijohdealue *drain*-alueen jatkoksi. Tämän avulla saadaan pidettyä IGBT:n jännitehäviöt pieninä, luokkaa 2 - 3 V nimellisvirralla, sekä kohtalaisen kytkentätaajuuden 5 - 150 kHz.

IGBT saadaan johtavaan tilaan samalla tavalla kuin tyristorikin, kun hilan ja emitterin välinen jännite kasvatetaan arvoon 10 - 15 V. Toisinkuin tyristori, IGBT pystytään sammuttamaan halutulla hetkellä muuttamalla ohjausjännite hilan ja emitterin välillä nollassi. IGBT:tä ohjataan sen MOSFET-osan hilalla G (kuva 9). MOSFET ohjaa IGBT:n kollektorin ja emitterin välillä olevan pnp-transistorin kantavirtaa. Komponentissa kulkeva virta koostuu pnp-transistorin aukkovirrasta ja MOSFET:in elektronivirrasta.



Kuva 10. NPT- ja PT-tyyppisen IGBT:n rakenne [5.]

IGBT:tä on valmistettu PT (Punch Through) ja NPT (Non-Punch Through) -tekniikalla (kuva 10). PT-rakenne tehdään epitaksiaalisesti kasvattamalla kuten MOSFET-transistoritkin. Epitaksiaalinen kasvatus on kuitenkin hyvin kallista ja hidasta. Sen takia heikosti seostetun n-alueen paksuus on minimoitu käyttämällä alueen kollektoripuolella voimakkaasti seostettua n-puskurikerrosta.

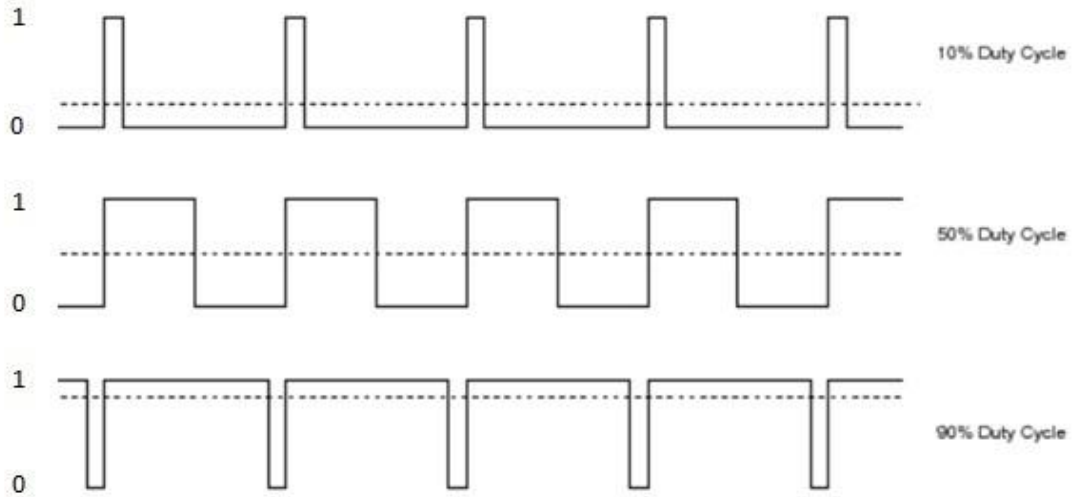
NPT-rakenne tehdään diffusoimalla muiden suurjännitekomponenttien tapaan. Tällöin n-alueen paksuutta ei tarvitse minimoida eikä puskurikerrosta tarvita. NPT-rakenteen etuja ovat oikosulkuvirran rajoittuminen hilajännitteen määräämään arvoon, jännitehäviön positiivinen lämpötilariippuvuus, jälkivirran suuruuden riippumattomuus lämpötilasta ja pienet kytkentähäviöt. NPT-rakennetta käytetään lähes aina yli 600 V:n komponenteissa.

IGBT:n edut ovat helppo ohjattavuus, pieni jännitehäviö, ja kohtalainen kytkentätaajuus. Useilta valmistajilta on saatavilla IGBT-sarjoja, joista hitaimmat soveltuvat moottorikäyttöön ja nopeimmat hakkuriteholähteisiin. IGBT:n tärkeimmät käyttökohteet ovat moottorikäyttöjen taajuusmuuttajissa. Jatkuvasti kasvaneen virta- ja jännitekestoisuuden takia IGBT on myös tunkeutunut GTO-tyristorien hallitsemille alueille. [3, s. 89 - 103; 4, s. 8 - 9.]

2.4 Pulssinleveysmodulaatio

Pulssinleveysmodulaatio (Pulse Width Modulation, PWM) on modulointitapa, jonka avulla muutetaan signaalin pulssisuhdetta, jolloin kuormaan menevä jännite muuttuu.

Sitä käytetään nykyään hyvin paljon sulautetuissa järjestelmissä, koska nykyään sähkön kulutus halutaan saada mahdollisimman pieneksi.

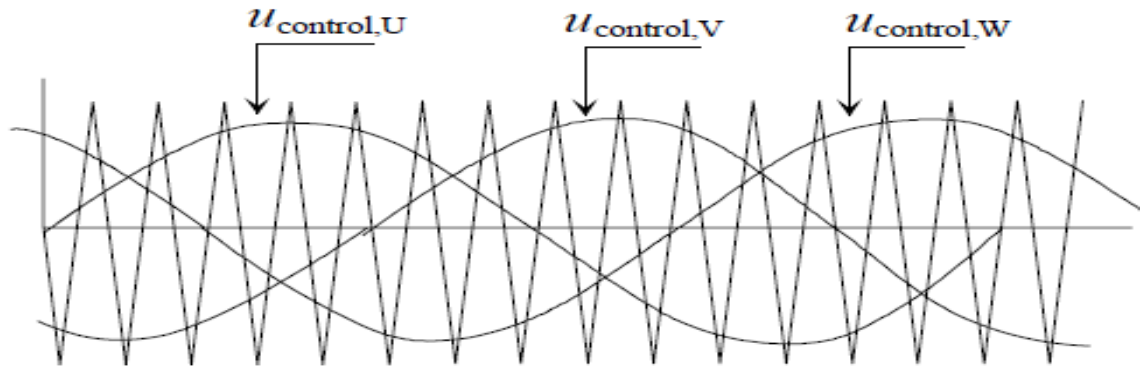


Kuva 11. Signaalin jakson suhde eli *Duty cycle* [6.]

Kuvassa 11 on havainnollistettu pulssinleveysmodulaatiota. Pulssinleveysmodulaatiossa syötetyn virran määrää rajoitetaan katkomalla signaalia ja kytkemällä se takaisin hyvin nopealla tahdilla. 1 ja 0-jaksojen suhde määrää lopullisen virran, joka pääsee laitteelle. 1-jakson aikana signaali on päällä ja 0-jakson aikana pois päältä. Mitä suurempi 1-jakso on verrattuna 0-jaksoon, sitä suurempi teho syötetään kuormaan. 1- ja 0-jaksojen suhdetta kutsutaan *duty cycleksi*, joka ilmoitetaan prosenttilukuna. *Duty cycle* lasketaan kaavalla

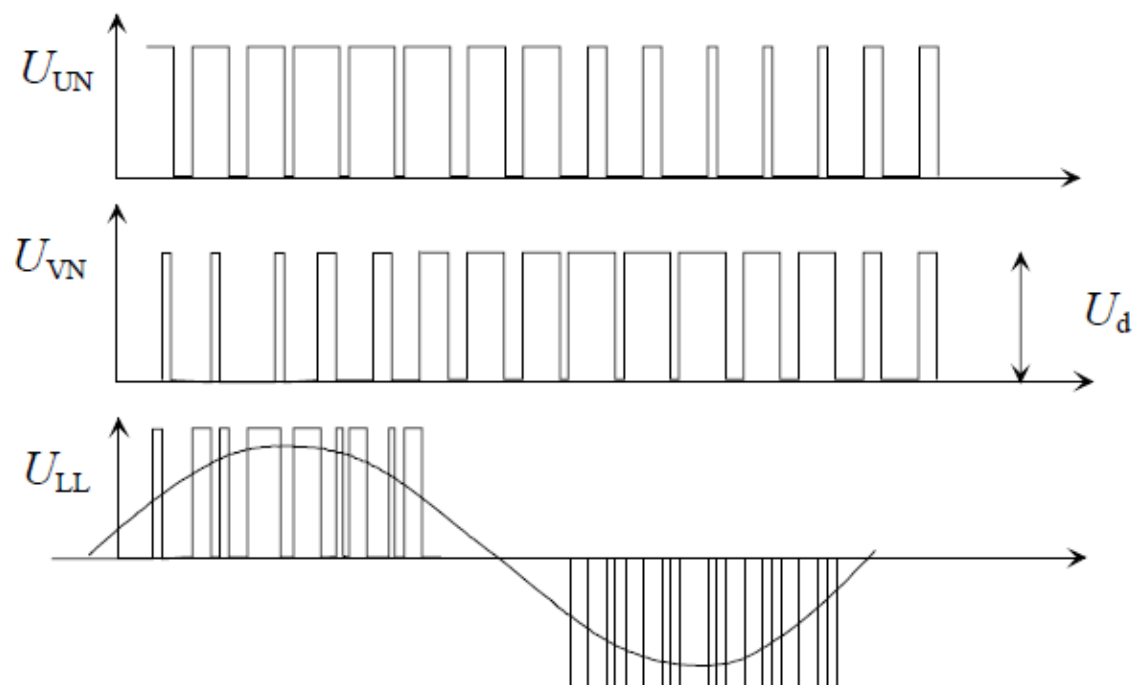
$$D = \frac{t}{T}, \quad (1)$$

jossa t = 1-jaksonaika sekä T = 1- ja 0-jaksojen yhteenlaskettu aika.



Kuva 12. Kolmioaalto- ja siniaaltomuotoiset jännitteet

Pulssinleveysmodulaatio on tehokas tapa kontrolloida analogisia piirejä mikroprosessorin digitaalisilla ulostuloilla, kuten tässä työssä on tehty. PWM-signaali saadaan toteutettua vertailemalla kolmioaalto-signaalia siniaaltosignaaliin (kuva 12). Vertailusta saadaan arvoksi 1 siniaallon ollessa kolmioaaltoa suurempi ja 0, kun siniaalto on kolmioaaltoa pienempi. Tulokseksi saadaan kuvassa 13 esitettävän muotoista jännitettä. Siniaaltosignaalin amplitudin ei tule olla kolmioaaltoa suurempi. Kolmioaaltoa taajuutta muuttamalla määrätään myös PWM-signaalin kytkentätaajuus.

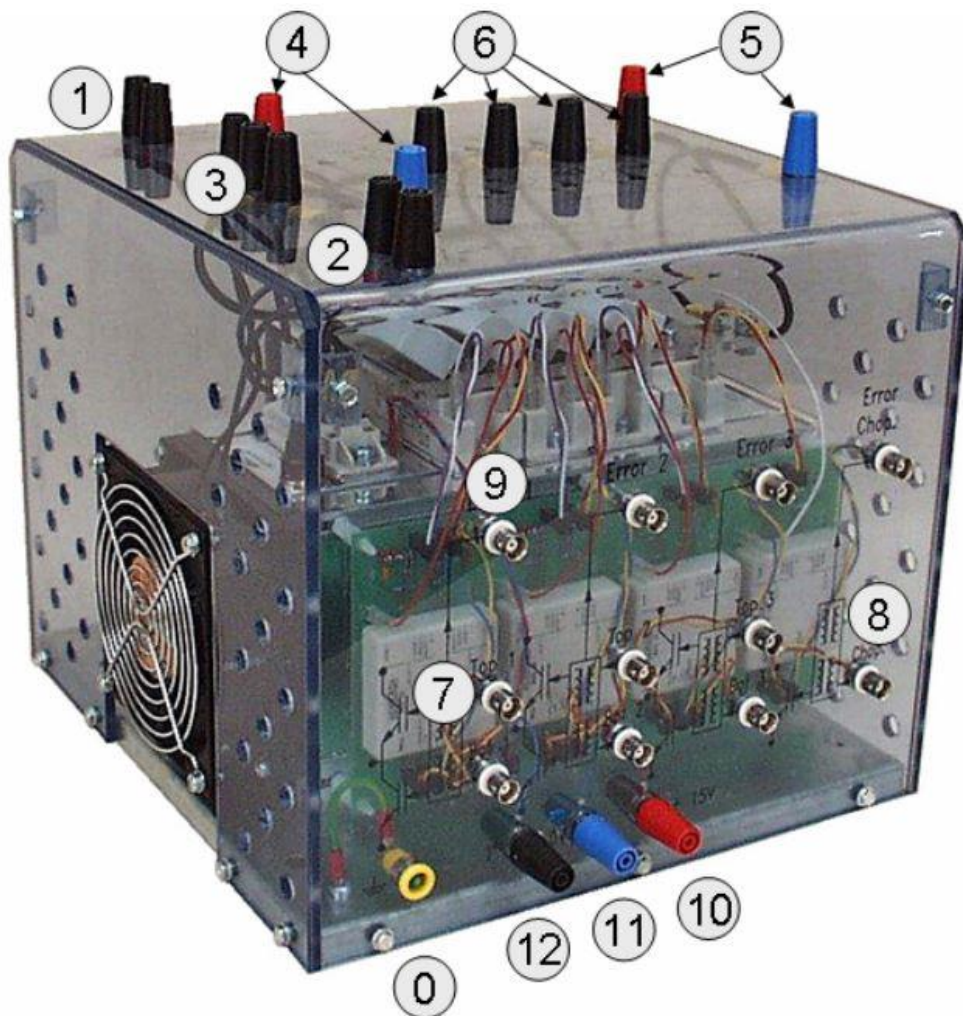


Kuva 13. Kahden vaiheen välinen sekä nollan ja eri vaiheiden väliset PWM-signaalit

Kolmivaiheista PWM-signaalia muodostettaessa tulee yhtä kolmioaaltosignaalia verrata kolmeen 120°:een vaihe-erossa olevaan siniaaltosignaaliin. Jokaisen vaiheen vertailu tapahtuu omassa vertailijassaan. [7, s. 206 - 207.]

3 Semikron AN-8005-taajuusmuuttaja

Tässä työssä käytettävä taajuusmuuttaja on Semikronin opetuskäyttöön tarkoitettu AN-8005. Semikron on yksi kansainvälisesti johtavista tehopuolijohdekomponenttien valmistajista, jonka liikevaihto oli 545 miljoonaa euroa vuonna 2010. Semikron on yksityinen saksalainen yritys, joka perustettiin vuonna 1951. Yrityksellä on 3 600 työntekijää maailmanlaajuisesti, ja heistä 1 300 työskentelee pääkonttorissa Saksan Nürnbergissä. [8.]



Kuva 14. Semikron AN-8005-opetusjärjestelmä [9.]

Kuvassa 14 on esitetty Semikron AN-8005 opetusjärjestelmä sekä numeroitu sen liitännät. Semikron AN-8005 koostuu yhdestä kuusipulssisuuntaajamoduulista mallia SKD 51/14, kolmesta IGBT-moduulista SKM 50 GB 123 D sekä näiden välissä olevista 2 200 μF :n kondensaattoreista. Jokaista IGBT-moduulia ohjaa yksi Semikronin SKHI 22 AR ajuri. Ajurin päätarkoituksena on vahvistaa hiloja syötettävät virrat hilalle sopiviksi muutaman ampeerin virtapiikeiksi. Ajurin toinen tarkoitus on pienentää tulosignaalin kohinaa. Tarkemmat tiedot komponenteista löytyvät liitteestä. Taulukossa 1 nähdään kuvassa 12 esitetyt liitännät ja niiden jännitteet sekä virrat.

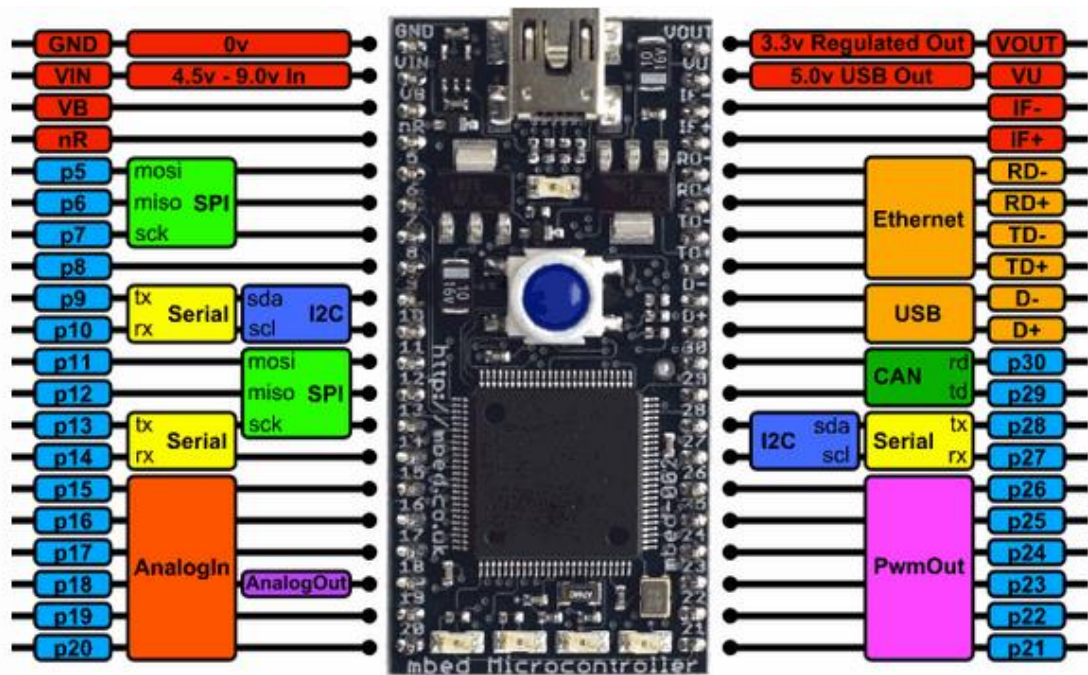
Taulukko 1. Semikronin liitännät [9.]

Liitin	Tehtävä	Jännite	Maksimi virta
0	Maa	0 V	30 A
1	Tuulettimen virran syöttö	230 / 50 Hz	1 A
2	Lämpörele	15 V	5 A
3	Tasasuuntaajan syöttö	230 / 400 V	30 A
4	Tasasuuntaajan lähtö	600 VDC	30 A
5	Vaihtosuuntaajan syöttö	600 VDC	30 A
6	Vaihtosuuntaajan ja jarrukatkojan lähtö	400 VAC / 600 VDC	30 A
7	IGBT hilojen syöttö	0 / 15V, 0 V = auki, 15 V = kiinni	1 A
8	Jarrukatkojan syöttö	0 / 15V, 0 V = auki, 15 V = kiinni	1 A
9	Virhelähtö	0 / 15V	1 A
10	15 V Ajurin virran syöttö	15 V	5 A
11	0V Ajurin virran syöttö	0 V	5 A
12	Lämpötila anturi	0 - 5 V	1 A

Ylikuumentumisvaaran takia on tärkeää haihduttaa puolijohteista syntyvä lämpö. Tämän takia ne on kiinnitetty alumiiniselle jäähdytyslevylle, jotta energian siirrosta syntyvät häviöt siirtyvät alumiiniin. Alumiinista energia puretaan ilmaan tuulettimen avulla. Tuulettimeen syötetään oma 230 V:n vaihejännite.

4 Mbed lpc1768-mikrokontrolleri

Työssä käytettiin taajuusmuuttajan ohjaukseen mbed lpc1768-mikrokontrolleria. Mbed lpc1768 on kehitysalusta, joka tarjoaa kokeneille sulatettujen järjestelmien kehittäjille tehokkaan sekä tuottavan alustan. Mikrokontrollerilla on helppo toteuttaa sovelluksia, jotka perustuvat ARM-mikroprosessoriarkkitehtuuriin. ARM (Advanced Risc Machines) on 32-bittinen mikroprosessoriarkkitehtuuri, joka on nykyään suosittu sulautettujen järjestelmien suorittimissa.



Kuva 15. Mbed lpc1768-mikrokontrolleri [10.]

Mbed lpc1768 on suunniteltu erilaisten laitteiden prototyyppien toteuttamiseen, erityisesti niiden, joissa tarvitaan Ethernet- tai USB-yhteyttä tai Flash-muistin käyttöä. Kuvasta 15 voitiin nähdä yleisesti käytettävät käyttäjärajapinnat ja niiden sijainnit. [10.]

4.1 Mikrokontrollerin ja tietokoneen välinen yhteys

Insinööriyössä käytettiin mikrokontrollerin ja tietokoneen välisessä USB-yhteydessä hyväksi RPC:tä. RPC (Remote Procedure Call) on prosessien välinen kommunikaatio, joka sallii tietokoneohjelman aliohjelman tai proseduurin välittää verkon yli kutsuja argumentteineen ja palauttaa etäällä suoritettujen proseduurien tulokset. Proseduurin muuttaminen etäproseduuriksi liittyy yleensä työmäärään tai keskitettyyn suureen tietomäärään.

Mbed pystyy vastaanottamaan ja tulkitsemaan RPC-käskyjä ja tällä saadaan rajapinnan luontia yksinkertaistettua. RPC-käskyt ovat ennalta määritellyjä ja ne voidaan lähettää millä tahansa siirtotavalla, joka pystyy lähettämään tekstiä.

Jotta RPC toimii USB yhteyden yli, tarvitsee käskyt vastaanottaa USB-portista ja syöttää ne RPC-funktiolle. Tämä voidaan tehdä mbedin *compiler*-ohjelmalla, johon kirjoitetaan esimerkkikoodi 1.

```
#include "mbed.h"
#include "rpc.h"
Serial pc(USBTX, USBRX);
int main() {
    // setup the classes that can be created dynamically
    Base::add_rpc_class<AnalogIn>();
    Base::add_rpc_class<AnalogOut>();
    Base::add_rpc_class<DigitalIn>();
    Base::add_rpc_class<DigitalOut>();
    Base::add_rpc_class<DigitalInOut>();
    Base::add_rpc_class<PwmOut>();
    Base::add_rpc_class<Timer>();
    Base::add_rpc_class<SPI>();
    Base::add_rpc_class<BusOut>();
    Base::add_rpc_class<BusIn>();
    Base::add_rpc_class<BusInOut>();
    Base::add_rpc_class<Serial>();
    // receive commands, and send back the responses
    char buf[256], outbuf[256];
    while(1) {
        pc.gets(buf, 256);
        rpc(buf, outbuf);
        pc.printf("%s\n", outbuf);
    }
}
```

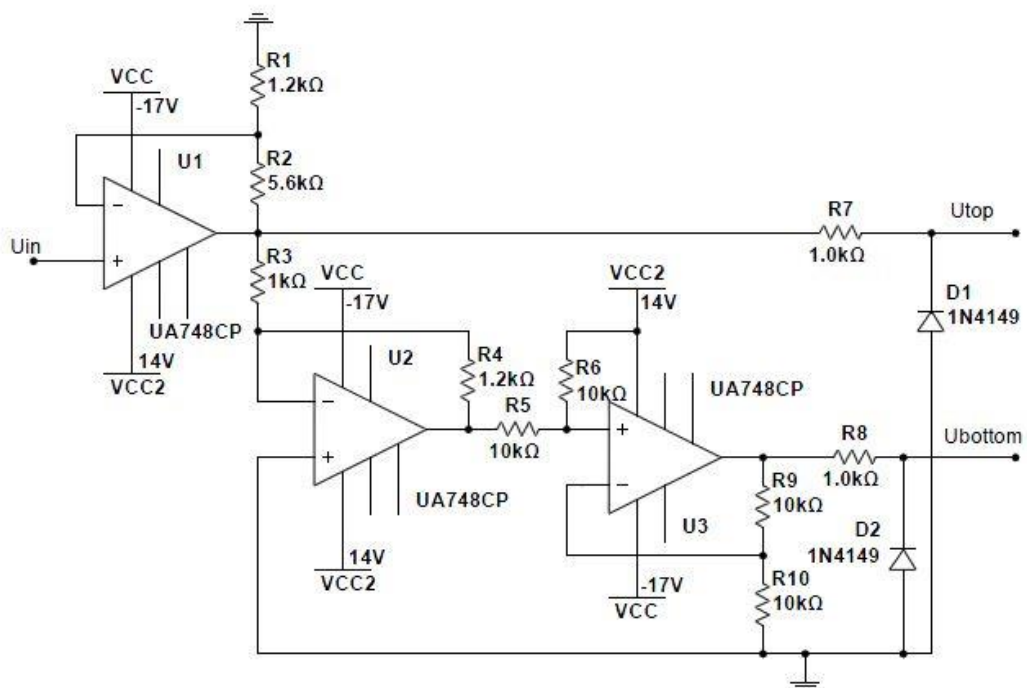
Esimerkkikoodi 1. Mbedille asennettavat RPC:n asetukset [11.]

Ohjelma luo asetustiedoston, joka siirretään mikrokontrollerille. Kun tiedosto on siirretty mikrokontrollerille, voidaan käyttää RPC:tä.

5 Vahvistuspiiri

Taajuusmuuttajan IGBT:t vaativat 10 - 15 V:n ohjaussignaalin toimiakseen. Kuitenkin saavuttaakseen parhaimman hyötysuhteen, tarvitaan noin 15 V:n ohjaussignaali. Ongelmana on, että mbed-mikrokontrollerista saadaan ulos enintään 3,3 V. Jännite joudutaan vahvistamaan erillisellä elektroniikkapiirillä. Ohjaussignaalin tulee olla pulssimuotoista ja niitä tulee olla kaksi vastakkaisvaiheista. Tämän seurauksena ohjaussignaali joudutaan vahvistamaan ja invertoimaan vahvistuspiirillä.

Ensimmäinen versio vahvistuspiiristä rakennettiin käyttämällä operaatiovahvistimia. Piiri suunniteltiin ja simuloitiin National Instruments Multisim-ohjelmalla, jonka jälkeen se rakennettiin koekytkentälevylle. Koska yhdessä piirissä on vain kaksi ulostuloa, joista saadaan yhteen IGBT-moduuliin tarvittavat ohjausjännitteet, tarvitaan yhteensä kolme kuvioissa 1 ja 2 nähtävää piiriä.



Kuvio 1. Operaatiovahvistimilla rakennettu vahvistuspiiri

Vahvistuspiirissä ensimmäinen vahvistin U1 vahvistaa sisään tulevan signaalin kaavalla

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) * V_{in} = \left(1 + \frac{5,6 \text{ k}\Omega}{1,2 \text{ k}\Omega}\right) * 3,3 \text{ V} = 18,7 \text{ V} \quad (2)$$

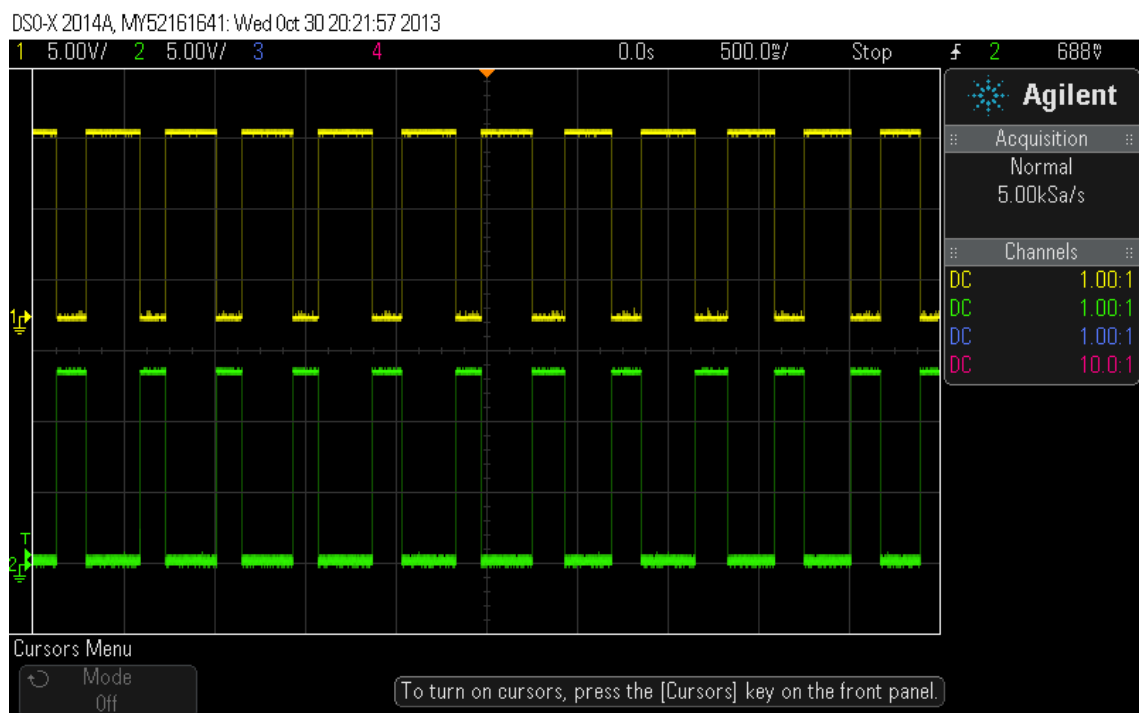
Vahvistimelle syötettävät käyttöjännitteet rajoittavat ulostulojännitteen maksimissaan 14 volttiin. Ensimmäisen vahvistimen ulostulosta otetaan IGBT:n yläpuolen ohjaussignaali ja syötetään se vahvistimelle U2, joka inverttoi signaalin kaavalla

$$V_{out} = -\frac{R4}{R3} * V_{in} = -\frac{1,2 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} * 14 \text{ V} = -16,8 \text{ V} \quad (3)$$

Kolmas vahvistin toimii jännitteiden summaajana, jotta signaali saadaan vaihtelevaan 0 - 15 V. Toiselta vahvistimelta tulevaan signaalin lisätään kolmannelle vahvistimelle U3 syötettävä 14 V:n käyttöjännite.

$$V_{out} = \frac{R6}{R5} * (V_{in} + VCC2) = \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} * (-16,8 \text{ V} + 14 \text{ V}) = -2,80 \text{ V} \quad (4)$$

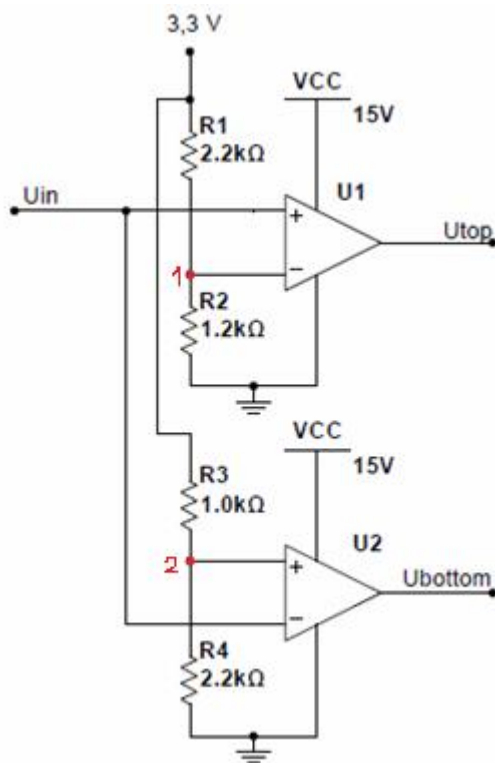
Kytkenän lopussa olevilla resistansseilla R7 sekä R8 rajoitetaan virtaa. Diodit ovat suojadiodeja.



Kuva 16. Ylä- ja alapuolen ohjaussignaalit

Kuvasta 16 voitiin nähdä kytkennästä saadut ohjaussignaalit, jotka vaihtelevat 0 - 13 V. Signaaleissa näkyy myös pientä kohinaa, joka ilmenee paksumpana viivana. Yläpuolen ohjaussignaalin ollessa päällä on alapuolen ohjaussignaalin oltava pois päältä ja päinvastoin.

Operaatiovahvistimien häviöiden takia vahvistimilla joudutaan vahvistamaan signaalia enemmän kuin vahvistimien käyttöjännitteet antavat. Häviöiden takia 15 V:n jännitettä oli hyvin vaikea toteuttaa. Operaatiovahvistimet päätettiin vaihtaa *rail-to-rail*-operaatiovahvistimiin. *Rail-to-rail*-operaatiovahvistimilla saadaan tasan 15 V ja 0 V ulos ja piiristä saadaan paljon yksinkertaisempi ja tarvitaan vähemmän komponentteja, kuten kuviosta 2 nähdään.



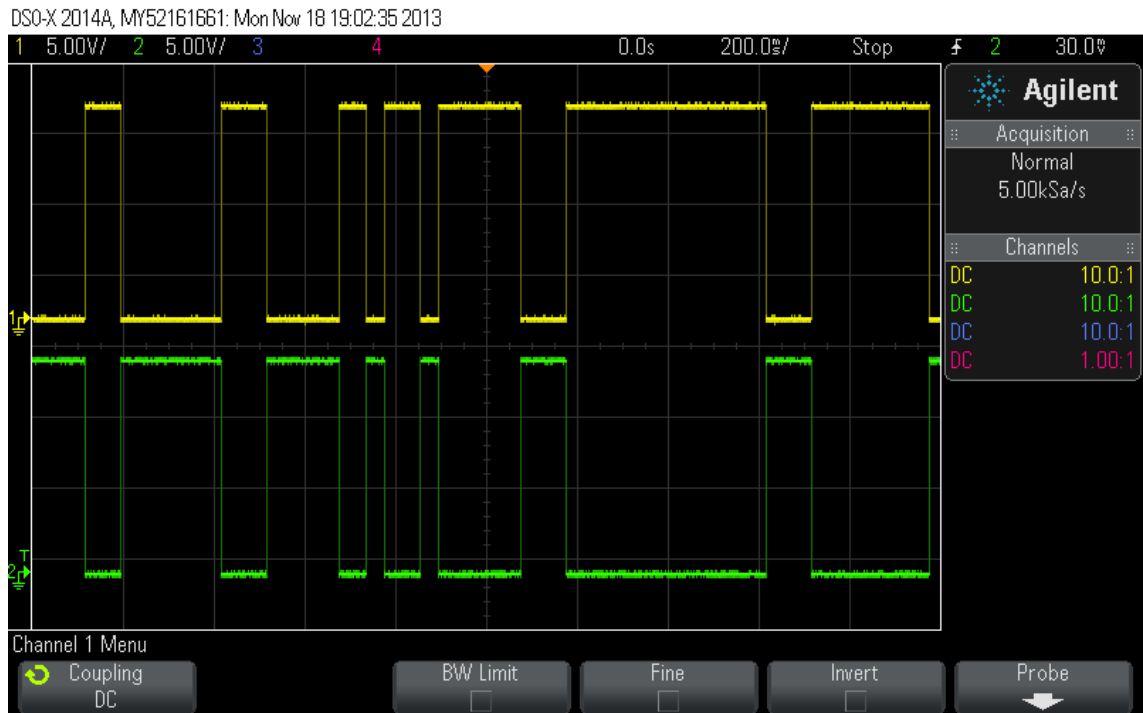
Kuvio 2. *Rail-to-rail*-operaatiovahvistimilla rakennettu vahvistuspiiri

Rail-to-rail-operaatiovahvistimet toimivat piirissä vertailijoina, joista ylempi on ei-kääntävä vahvistin ja alempi on kääntävä vahvistin. Ylempi vahvistin toimii sisään tulevan jännitteen ollessa suurempi kuin pisteessä 1 oleva jännite ja alempi toimii, kun sisään tuleva jännite on pienempi kuin pisteessä 2 oleva jännite. Pisteessä 1 oleva maksimijännite voidaan laskea kaavalla

$$U_1 = U * \frac{R_1}{R_1+R_2} = 3,3 \text{ V} * \frac{2,2 \text{ k}\Omega}{2,2 \text{ k}\Omega+1,2 \text{ k}\Omega} \approx 2,14 \text{ V} \quad (5)$$

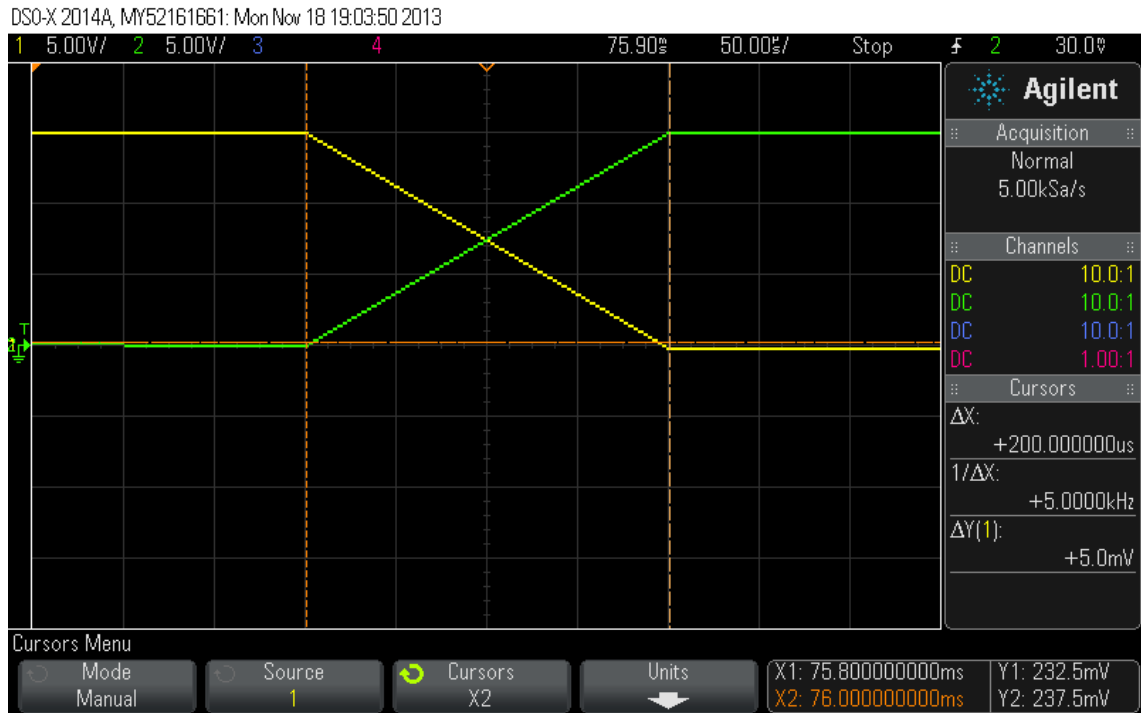
ja pisteessä 2 oleva maksimijännite voidaan laskea kaavalla

$$U_2 = U * \frac{R_3}{R_3+R_4} = 3,3 \text{ V} * \frac{1,0 \text{ k}\Omega}{1,0 \text{ k}\Omega+2,2 \text{ k}\Omega} \approx 1,03 \text{ V}. \quad (6)$$



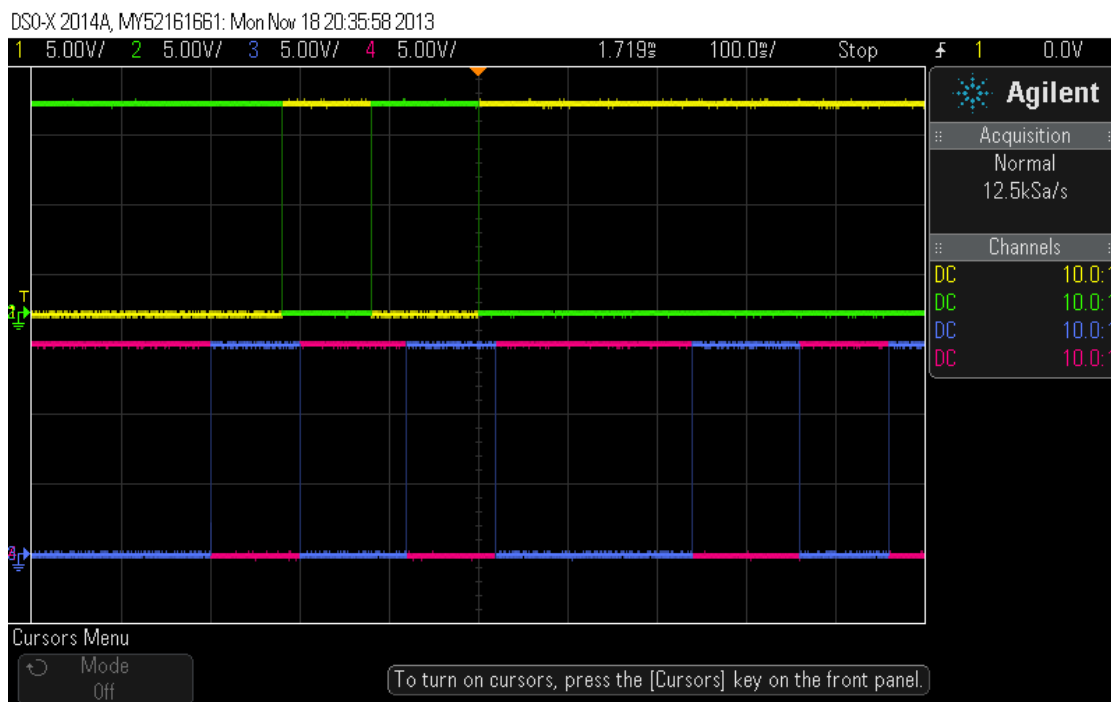
Kuva 17. Ylä- ja alapuolen signaalit uudella piirillä

Kuvassa 17 on esitetty kytkennästä saadut ohjaussignaalit, jotka vaihtelevat nyt 0 - 15 V. Alempi vahvistin johtaa, kun jännite on alle 1,03 V ja ylempi johtaa, kun jännite on yli 2,14 V. Vaikka jännitteissä on voltin ero, ei viivettä ehdi syntyä (kuva 18). Kummatkin signaalit vaihtavat tilaansa täsmälleen samaan aikaan.



Kuva 18. Ohjaussignaalin ylä- ja alahaaran kytkentäaika

Kuvasta 18 voitiin nähdä mittauskytkennällä aikaansaatu ohjaussignaalin kytkentäaika. Kytkentäajan on oltava pieni, jotta IGBT-moduulin ylä- ja alaventtiilit eivät ole yhtä aikaa johtavassa tilassa, mikä aiheuttaisi oikosulun.



Kuva 19. Kahden vaiheen signaalit

Kuvassa 19 on esitetty kahden eri vaiheen ylä- ja alapuolen signaalit. Signaalit vaihtelevat eri vaihe-eroissa.

6 Piirilevyn suunnittelu

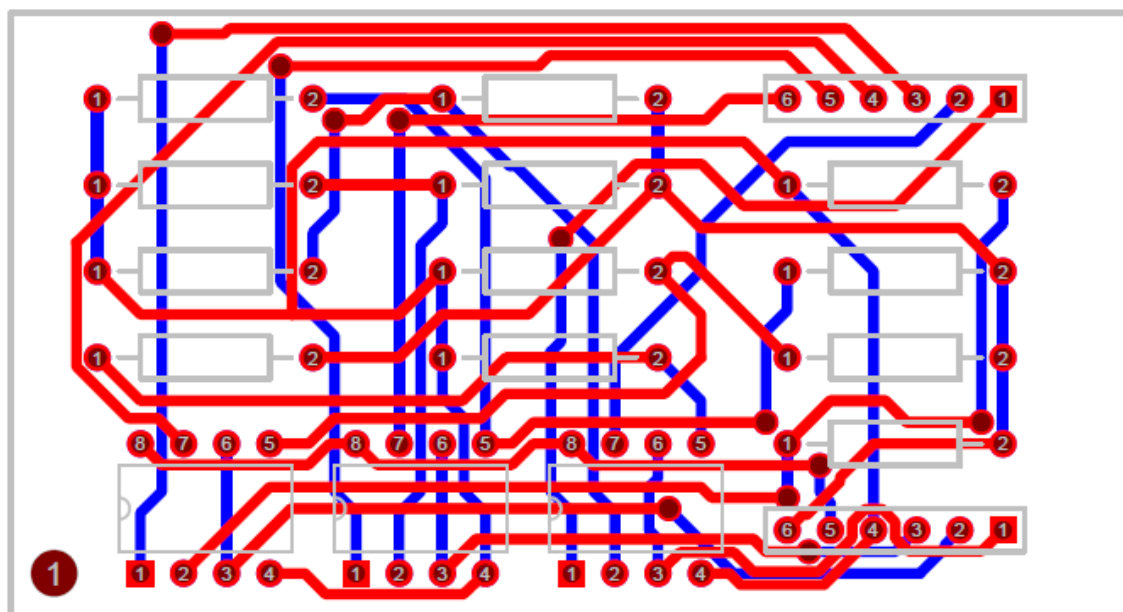
Piirilevyn valmistuksessa päädyttiin käyttämään Mentor Graphics PADS Layout-ohjelmaa. Toinen vaihtoehto olisi ollut käyttää National Instruments Ultiboard-ohjelmaa, jolloin komponentit olisi pystynyt siirtämään suoraan Multisim-ohjelmasta piirilevynsuunnitteluohjelmaan. Työhön valittiin PADS ohjelmat, koska sen käytöstä oli aiempaa kokemusta.

Vahvistuspiiri jouduttiin rakentamaan ensin uudestaan PADS Logic-ohjelmalla, jonka jälkeen komponentit siirrettiin helposti PADS Layout-piirilevynsuunnitteluohjelmaan. Piirilevylle rakennettiin kaikkien kolmen vaiheen vahvistuspiirit ja komponenteiksi valittiin läpiladottavat. Toisiinsa yhteydessä olevat komponentit sijoitettiin mahdollisimman lähekkäin toisiaan, jotta piirilevystä saataisiin selkeä ja siisti. Kun komponentit oli järjestetty, piirrettiin piirilevyn ääriviivat komponenttien ympärille. Oppilaitoksessa käytettävän jyrsimen piirilevyaihion koko on 300 mm * 200 mm, joten piirilevyn koon on oltava

tätä pienempi. Ohjelmassa käytetään millimetrien sijasta tuuman tuhannesosia, joten ne joudutaan muuttamaan millimetreiksi kaavalla

$$1 \text{ mil} = \frac{25,4 \text{ mm}}{1000} = 0,0254 \text{ mm}. \quad (7)$$

Suunnitellun piirilevyn kooksi tuli 66,0 mm * 35,6 mm.



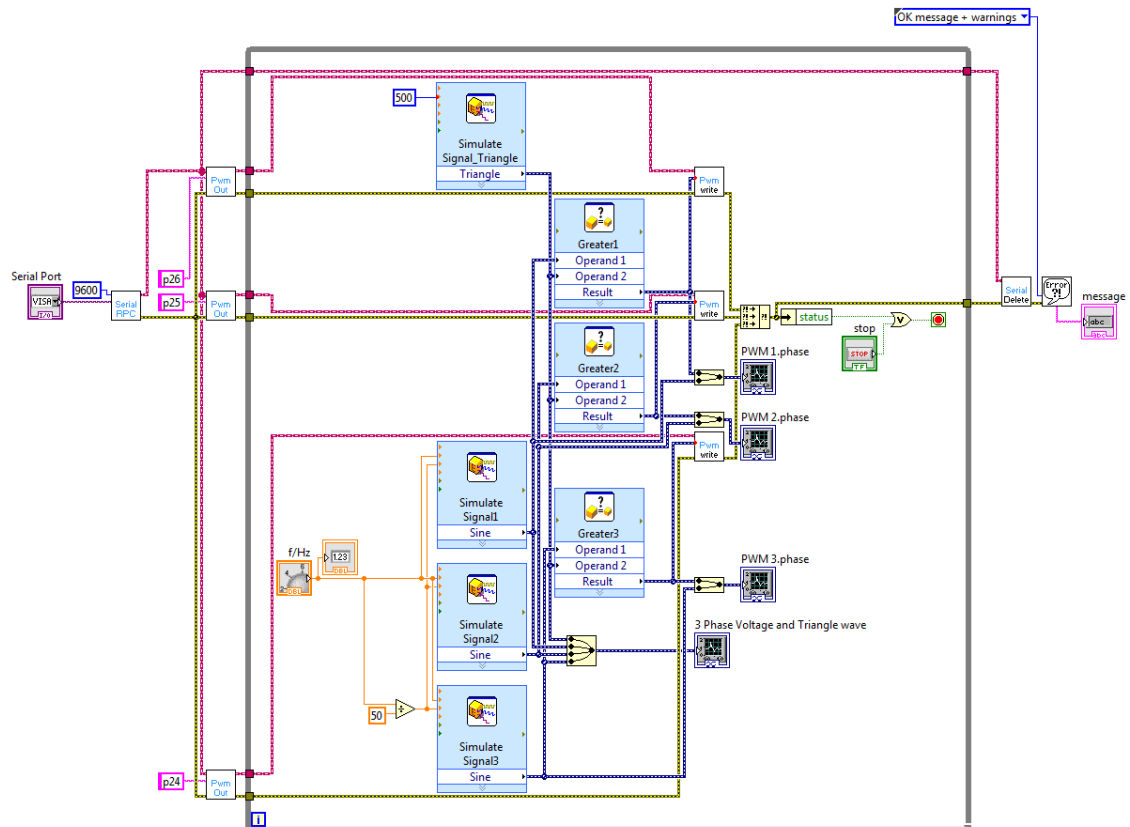
Kuvio 3. Suunniteltu piirilevy

Jotta pystyttiin käyttämään ohjelman tarjoamaa automaattista reititystä, piti määrittää johdinreittien leveys ja niiden välinen etäisyys toisistaan. Automaattiohjelma reitittää komponentit niin, etteivät vedot mene päällekkäin. Kuviossa 3 esitettiin ohjelmalla saatu piirilevymalli. Punaiset vedot ovat piirilevyn yläpinnalla ja siniset ovat alapuolella.

7 Taajuusmuuttajan ohjauksen ohjelmointi

Käytettävän taajuusmuuttajan ohjaus päätettiin toteuttaa National Instrumentsin kehittämällä LabVIEW-ohjelmointiympäristöllä. National Instruments on yhdysvaltalainen 1976 perustettu automaattisten testauslaitteiden sekä virtuaalisten mittauslaitteohjelmistojen tuottaja. Yrityksen liikevaihto oli 1,14 mrd. dollaria vuonna 2012. National Instrumentsin asiakkaana toimii yli 35 000 yritystä sekä yritys työllistää noin 7 100 työntekijää 50 maassa. [12.]

LabVIEW tarjoaa käyttäjilleen monipuolisia ja helppoja rakennuspalikoita, joilla pystyy helposti rakentamaan mitä monimutkaisimpia ohjelmia. Ne toimivat kyllä National Instrumentsin laitteilla, mutta valitettavasti ne eivät tunnista mbedin mikrokontrolleria. Tämän takia mbed on joutunut rakentamaan käyttäjille valmiita rakennuspalikoita, joilla mahdollistetaan kommunikointi LabVIEW'n ja mikrokontrollerin välillä. Nämä eivät kuitenkaan ole yhtä monipuolisia kuin LabVIEW'n tarjoamat vaihtoehdot.



Kuvio 4. Käyttöliittymän lohkokaavio

Säätöohjelma (kuvio 4) on toteutettu mbedin tarjoamien esimerkkien avulla. Esimerkeistä otettiin käyttötarkoitukseen sopivimmat elementit pohjan luomiseksi, joilla pystytään kommunikoimaan mikrokontrollerin kanssa. Pohja muokattiin sopimaan kolmelle vaiheelle ja ulostulosignaalit rakennettiin pulssinleveysmodulaation teorian pohjalta. Säädetävää kolmivaiheista siniaaltoa verrataan 500 Hz:n taajuiseen kolmioaaltoon. Jokaista vaihetta verrataan erikseen kolmioaaltoon. Vertailijat antavat arvoja 0 tai 1 riippuen, onko siniaalto suurempi kuin kolmioaalto. Vertailijoiden lähdöt ovat kytketty mbedin tekemiin valmiisiin rakennuspalikoihin, jotka syöttävät signaalit halutuille mikro-

kontrollerin ulostuloille. Jotta ohjelmaa pystyttäisiin säätämään ohjelman päällä ollessa, säätö tapahtuu *while*-silmukan sisällä.

Ohjelmassa käytetyt *simulate signal*-rakennuspalikat tuottivat kuitenkin ongelmia. Jokaisessa 10:nessä hertsissä simuloidut signaalit pysähtyivät ja ulos saatavan signaalin taajuus muuttui nolllaksi.

Taajuusmuuttajan taajuutta pystyttiin ohjaamaan kuviossa 4 esitetyllä ohjelmalla, mutta taajuusmuuttajalla ei pystytä ohjaamaan vielä oikosulkumootoria. Maksimissaan taajuusmuuttajasta saatiin ulos 3 Hz:n taajuisia vaihtosähköä, kun säätöohjelman mukaan taajuuden olisi pitänyt olla lähempänä 50 Hz. Tämän arveltiin johtuvan säätöohjelman *simulate signal*-rakennuspalikoista. Jokaisessa 10:nessä hertsissä simuloidut signaalit pysähtyivät ja ulos saatavan signaalin taajuus muuttui nolllaksi. Muutenkin säädettäessä taajuutta, kulmanopeus muuttui radikaalisesti.

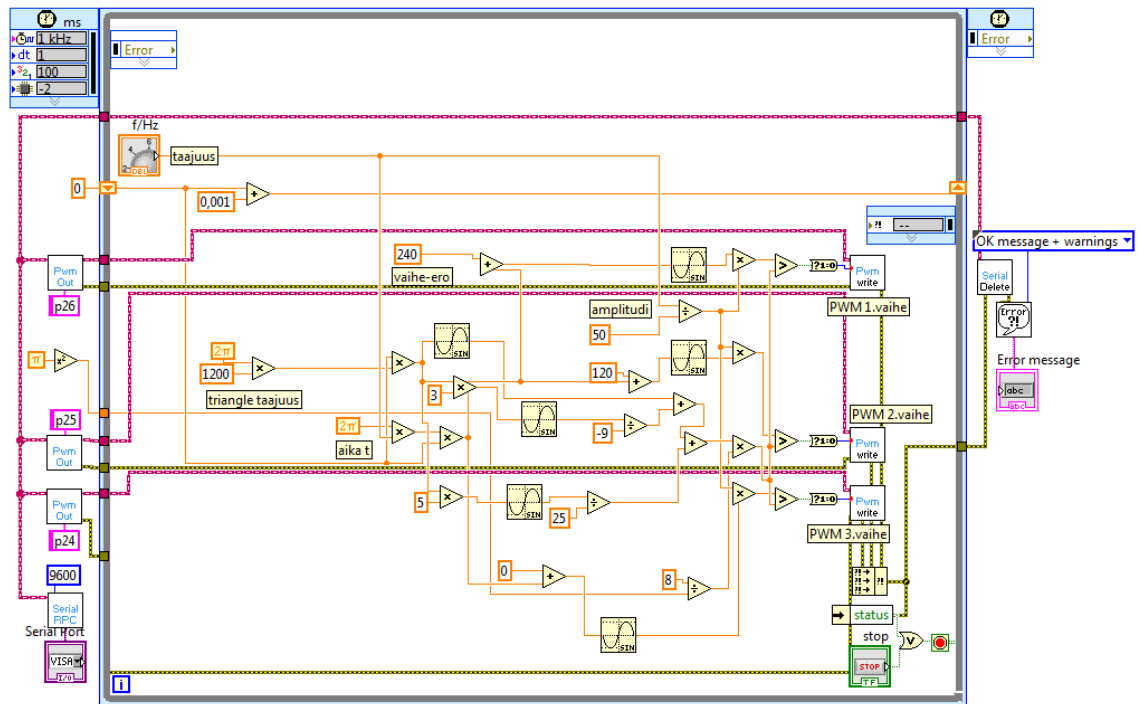
Sini- ja kolmioaallon rakennus päädyttiin vaihtamaan kaavoiksi. Siniaallon kaava on

$$\text{sine}(t) = A * \sin(2 * \pi * f * t + \varphi), \quad (8)$$

jossa A on amplitudi, f on taajuus, t on aika ja φ on vaihe-ero. Kolmioaallon kaava on

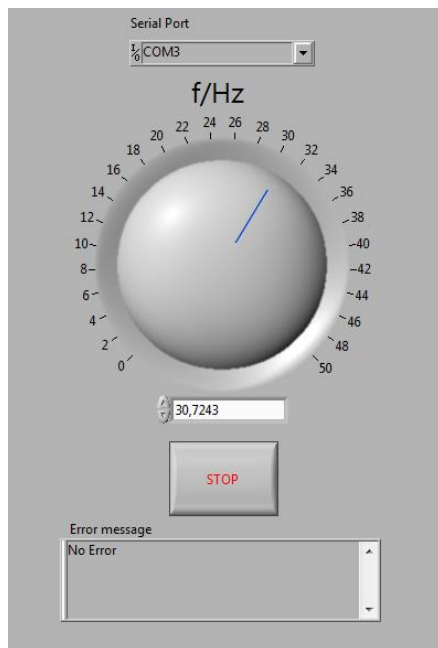
$$\text{triangle}(t) = \frac{8}{\pi^2} * \left(\sin(\omega t + \varphi) - \frac{1}{9} * \sin(3\omega t + \varphi) + \frac{1}{25} \sin(5\omega t + \varphi) \right), \quad (9)$$

jossa ω on kulmanopeus. Kaavoilla rakennettu ohjelma esitetään kuviossa 5.



Kuvio 5. Uuden käyttöliittymän lohkokkaavio

Jotta taajuusmuuttajaa pystytään käyttämään oikosulkumoottorin kanssa, jännitteen on pienennettävä samassa suhteessa taajuuden kanssa. Tämä on toteutettu ohjelmassa jakamalla annettu taajuus 50:llä, jolloin saadaan amplitudi vaihtelevaan 0 - 1.

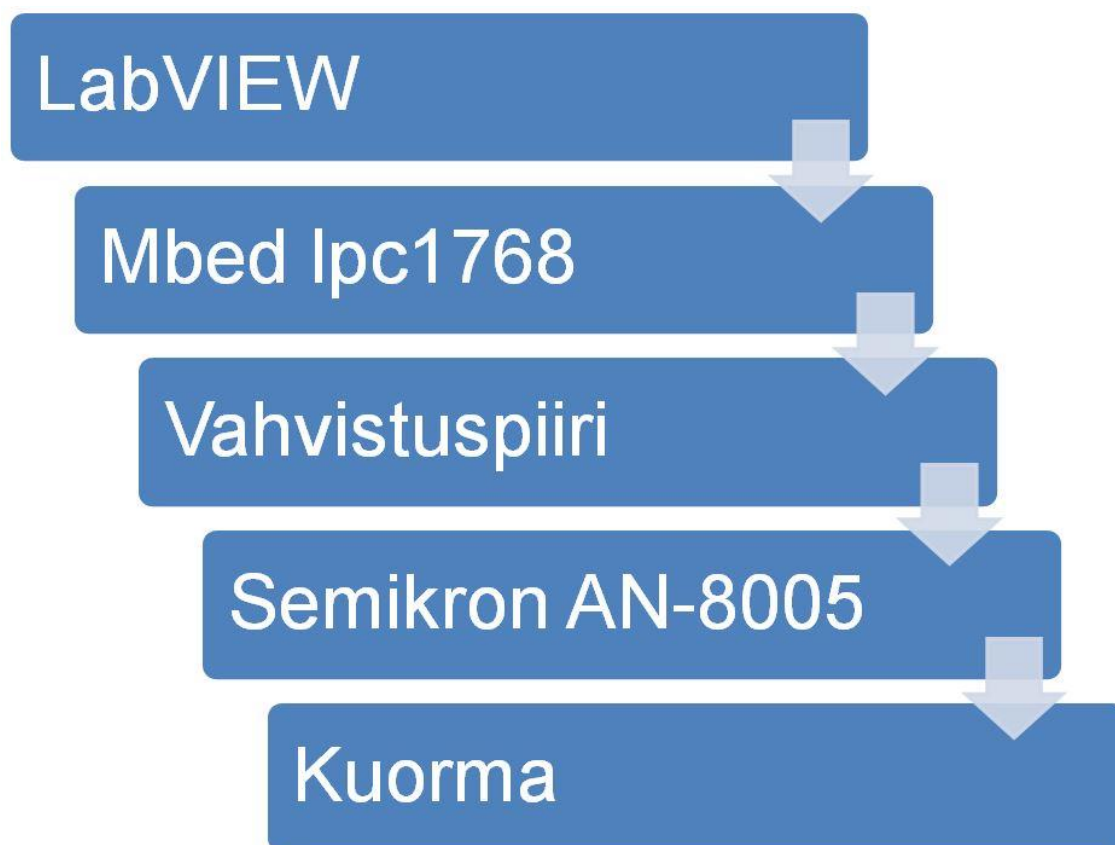


Kuva 20. Ohjauksen ohjauspaneeli

Koska ohjelma on tulossa opetuskäyttöön, ohjelman ulkoasu on yritetty saada mahdollisimman yksinkertaiseksi. Ohjauspaneelissa (kuva 20) on taajuudensäätö, virheviesti sekä kenttä, johon valitaan käytössä oleva virtuaalinen sarjaportti. Graafisia kuvaajia ei laitettu ohjauspaneeliin, koska ne olisivat saattaneet hidastaa ohjelmaa

8 Mittauskytkentä ja mittaustulokset

Kuvassa 21 nähtävä kytkennän lohkokkaavio käsittää tietokoneen, jossa on LabVIEW-ohjelmistolla rakennettu käyttöliittymä, joka ohjaa mbed-mikrokontrolleria. Käyttöliittymässä vertaillaan kolmea sinimuotoista signaalia yhteen kolmiomuotoiseen signaaliin, josta muodostuu pulssimuotoinen ohjaussignaali.



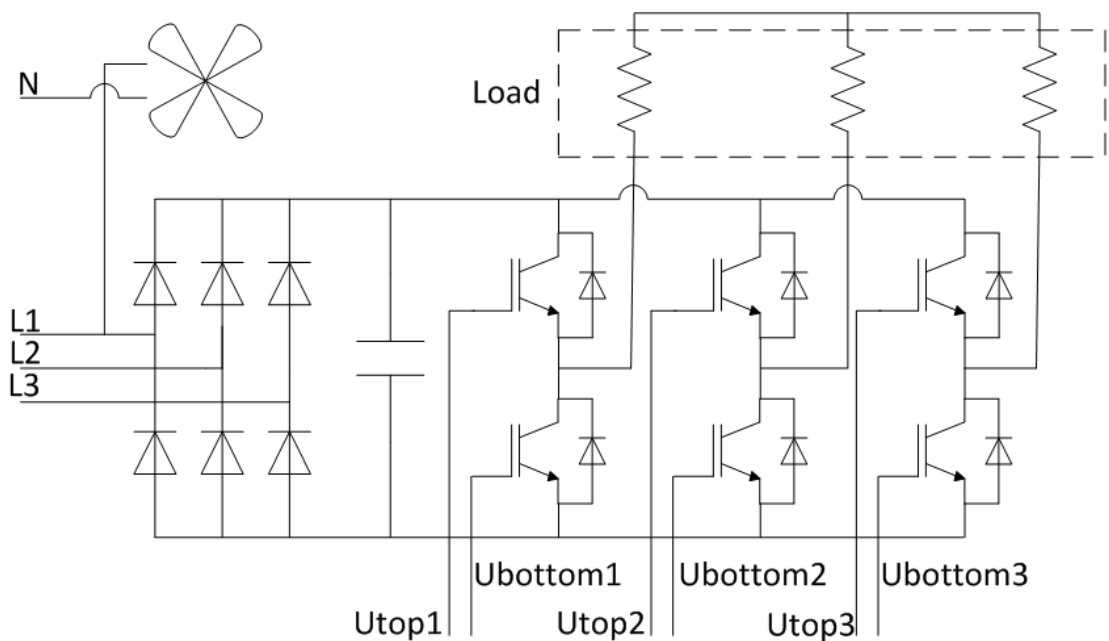
Kuva 21. Lohkokaavio

Ohjaussignaali syötetään mbed-mikrokontrollerin ulostuloon, joka ohjataan vahvistuspiirille. Vahvistuspiiri tarvitaan, koska mbedin ulostulo on vain 3,3 V ja ohjausjännite tulee olla 10 - 15 V. Vahvistuspiirin signaali jaetaan, vahvistetaan ja invertoidaan kah-

deksi vastakkaisvaiheiseksi signaaliksi. Signaali syötetään taajuusmuuttajalle, josta se voidaan syöttää kuorman.

Mittauskytkentään tarvittiin

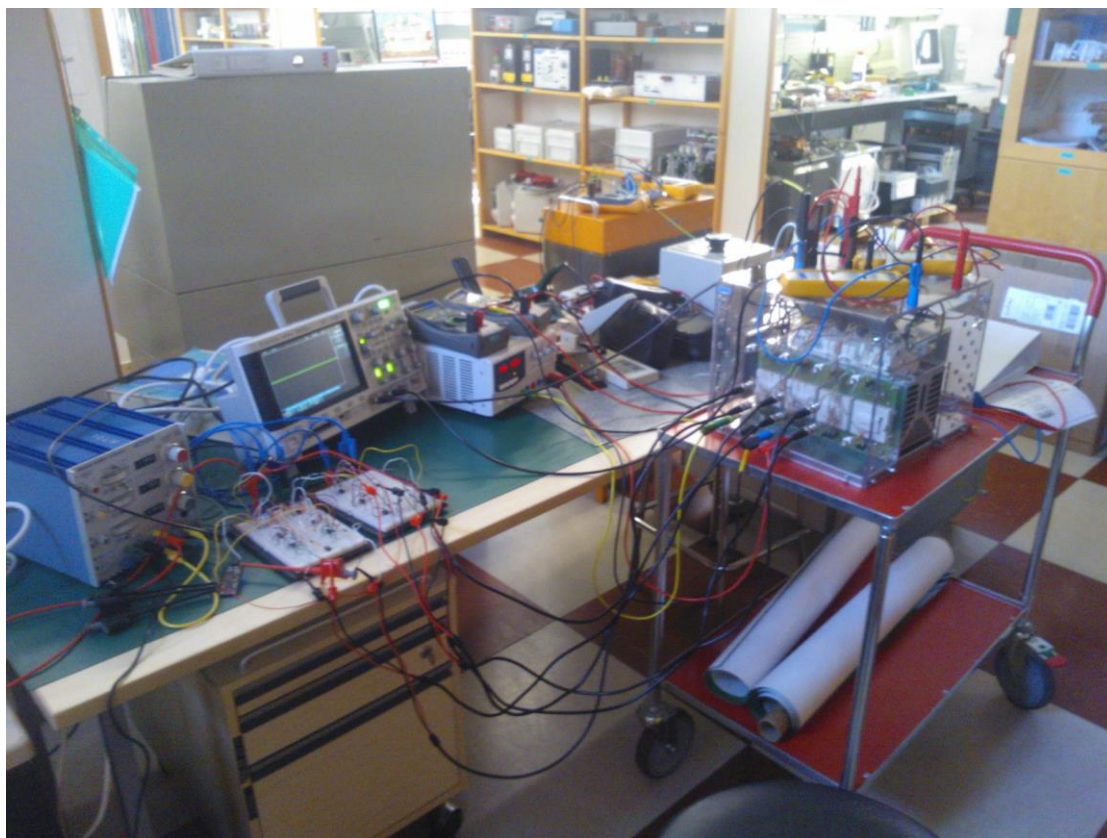
- tietokone
- mbed lpc1768-mikrokontrolleri
- vahvistuspiiri
- tasajännitelähde
- kolmivaihejännitelähde
- Semikron AN8005
- kolmivaihevastus
- mittareita.



Kuvio 6. Mittauskytkennän kytkentäkaavio

Kuviossa 6 esitettiin mittauskytkentä. Taajuusmuuttajaan kytkettiin 400 V:n kolmivaihejännite tasasuuntaajalle, 230 V:n vaihejännite tuulettimelle sekä 15 V tasajännite ajureille. Vaihtosuuntaajan ulostuloon kytkettiin kolmivaihevastus symmetrisen kuorman

saamiseksi. Oskilloskoopilla kuvattiin yhdessä vaiheessa olevien kahden IGBT:n jännitteet sekä taajuusmuuttajan ulostulon jännite.



Kuva 22. Mittauskytkentä

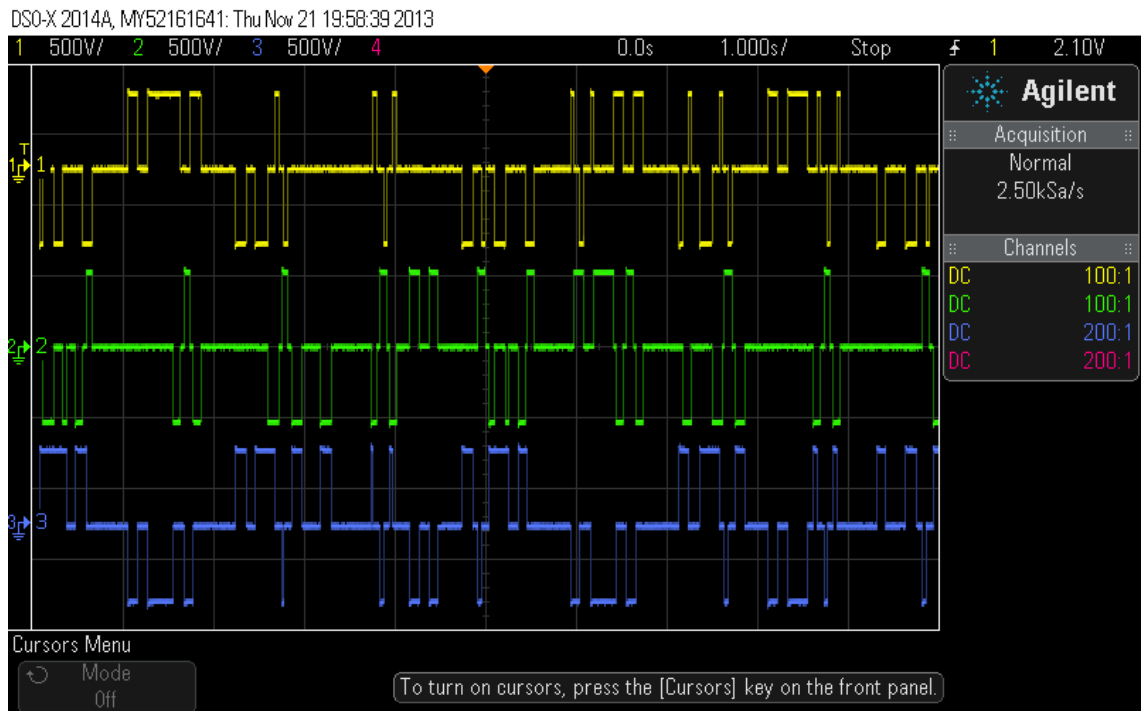
Kuvasta 22 voitiin nähdä mittauskytkentään liitetty oskilloskooppi sekä erilaisia mittareita mittaustulosten keräämiseksi. Vahvistuspiirin prototyyppi rakennettiin kahdelle koe-kytkentälevylle helpottamaan kytkennän muokattavuutta. Vahvistuspiiristä tulevat IGBT:iden hilojen ohjaussignaalit ohjattiin taajuusmuuttajaan kuudella BNC-liittimillä varustetuilla koaksiaalikaapeleilla.

Taulukko 2. Mittaustulokset

f_{ohje}/Hz	$U_{svyttö}/\text{V}$	$I_{svyttö}/\text{A}$	U_{DC}/V	$I_{2kuorma}/\text{A}$	$U_{Vkuorma}/\text{V}$
40	391	1,5	545	1,0	167

Taajuusmuuttajaa kuormitettaessa saatiin tulokseksi taulukossa 2 esitetyt arvot. Arvot eivät ole kuitenkaan tarkkoja, koska laitteiston toiminta oli epäluotettavaa. Varsinkin

kuorman virta- ja jännitearvot vaihtelivat paljon. Kuorman virta oli 0,7 - 1,3 A ja jännite oli 0 - 184 V. Vaiheiden jännitteet esitetään kuvassa 23.



Kuva 23. Kuorman vaihejännitteet

Taajuusmuuttajasta saatiin ulos noin 170 V:n vaihtojännite, jolla oli keskimäärin 4 Hz:n taajuus. Taajuus vaihteli hyvin epätasaisesti, kun taajuutta yritettiin säätää ohjelmalla.

9 Johtopäätökset

Taajuusmuuttajan ohjaus saatiin toteutettua, mutta se on edelleen epäluotettava. Jännitepiikkien takia sovellusta ei vielä voi käyttää moottorikäytössä ja ulos saatava taajuus on liian pieni. Taajuus vaihteli hyvin vähän, kun taajuutta säädettiin ohjelmalla. Moottorin jännitettä ei saatu pienennettyä, vaikka siniaallon amplitudia väheni taajuuden laskiessa. Kolmioaallon taajuutta yritettiin kasvattaa, mutta sillä ei ollut juurikaan vaikutusta. Kuorman jännitteiden 120°:een vaihe-ero on huonosti havaittavissa, vaikka taajuusmuuttajan ohjaussignaaleissa vaihe-ero näkyy selkeästi.

Ohjelmaa voisi parantaa rakentamalla kaksi kolmioaaltoa lisää ja laittamalla kolmioaalot eri vaiheisiin. Laitteistoa voisi jatkossa kehittää siten, että pulssinleveysmodulointua signaalia muodostettaisiin ilman kolmioaalto-signaalin ja siniaalto-signaalin vertailua mbedin omilla pwm-rakennuspalikoilla. Rakennuspalikoilla säädettäisiin ainoastaan signaalin pulssisuhdetta. Toinen vaihtoehto, mitä voi yrittää, on ohjelman kirjoittaminen C++:lla.

Vahvistuspiirin vaihtamisella saatiin piiriä yksinkertaistettua ja ohjauspulssin amplitudi lähemmäs 15 V. Vahvistuspiiri oli kytkennässä rakennettu koekytkentälevylle, jotta se oli helposti muokattavissa. Tämä johti kuitenkin siihen, että vahvistuspiiri ei ollut niin luotettava kuin pitäisi, koska sekä komponentit että johtimet saattoivat irrota. Tähän olisi auttanut, jos olisimme ehtineet rakentaa valmiin piirilevyn. Valitettavasti aika ei tähän riittänyt.

Päänvaivaa aiheutti myös VISA-ajurin jatkuva kaatuilu työn alkupuolella. VISA-ajuria tarvitaan LabVIEW'n ja mbed lpc1768:n välisen yhteyden saamiseksi. Kaatumisen takia ohjelma tai jopa tietokone oli jouduttava käynnistämään uudelleen. Työn loppupuolella ajuri kaatuili onneksi enää hyvin harvoin ohjelman ollessa pääasiassa valmis.

Työ oli sopivan haasteellinen ja työssä yhdistyi hyvin sekä sähkötekniikan että elektronikan osaaminen. Työssä onnistuttiin kohtalaisen hyvin. Taajuusmuuttajan ohjaus saatiin toteutettua vastoin käymisestä huolimatta, mutta ohjauksessa on vielä parantamisen varaa..

Lähteet

- 1 Niiranen, Jouko. 1999. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Helsinki: Otatieto Oy.
- 2 Mäkinen, Markku & Kallio, Raimo. 2004. Teollisuuden sähköasennukset. Keuruu: Otava.
- 3 Niiranen, Jouko. 1997. Tehoelektroniikan komponentit. Helsinki: Otatieto Oy.
- 4 Hart, Daniel. 2011. Power Electronics. New York: McGraw-Hill.
- 5 Details on IGBTs Basics. Verkkodokumentti. <<http://www.engineerdir.com/dictionary/catalog/5440/>>. Luettu 13.11.2013
- 6 PWM PIC : Pulse Width Modulation. 2011. PWM for the PIC Microcontroller (or any microcontroller). Verkkodokumentti. <<http://www.best-microcontroller-projects.com/pwm-pic.html>>. Luettu 28.10.2013.
- 7 Thorborg, Kjeld. 1988. Power Electronics. Cambridge: Prentice Hall International (UK) Ltd.
- 8 Semikronin lehdistötiedote. 11.7.2011. Verkkodokumentti. <http://www.semikron.com/skcompub/en/press-442_semikron_geared_for_further_growth_-4620.htm>. Luettu 6.11.2013
- 9 Semikron AN-8005 Application Note. 2008. Verkkodokumentti. <http://www.semikron.com/skcompub/ko/AN-8005_Techning_System.pdf>. Luettu 1.11.2013
- 10 Mbed lpc1768 mikrokontrollerin esite. 2009. Verkkodokumentti. <<http://www.nxp.com/documents/leaflet/LPC1768.pdf>>. Luettu 16.10.2013.
- 11 Mbed Interfacing using RPC. 2013. Verkkodokumentti. <<http://mbed.org/cookbook/Interfacing-Using-RPC>>. Luettu 16.10.2013
- 12 National Instrumentsin esite. 2012. Verkkodokumentti. <<http://www.ni.com/pdf/company/en/350009F-01-03188-Corp-Brochure-FGr.pdf>>. Luettu 6.11.2013.

Taajuusmuuttajan komponenttien teknisiä tietoja

Ajurin SKHI 22 AR tekniset tiedot

SKHI 22 A / B H4 (R) ...



SEMIDRIVER™

Hybrid Dual IGBT Driver

SKHI 22 A / B H4 (R)

Preliminary Data

Features

- Double driver for halfbridge IGBT modules
- SKHI 22A H4 is compatible to old SKHI 22 H4
- SKHI 22B H4 has additional functionality
- CMOS compatible inputs
- Short circuit protection by V_{CE} monitoring and switch off
- Drive interlock top / bottom
- Isolation by transformers
- Supply under voltage protection (13V)
- Error latch / output

Typical Applications

- Driver for IGBT modules in bridge circuits in industrial applications
- DC bus voltage up to 1200 V

1) see fig. 6

2) At $R_{CE} = 36 \text{ k}\Omega$, $C_{CE} = 470 \text{ pF}$,
 $R_{VCE} = 1 \text{ k}\Omega$

Absolute Maximum Ratings

Symbol	Conditions	Values	Units
V_S	Supply voltage prim.	18	V
V_{IH}	Input signal volt. (High) SKHI 22A H4	$V_S + 0,3$	V
	SKHI 22B H4	$5 + 0,3$	V
I_{OUT_PEAK}	Output peak current	8	A
I_{OUT_AVMAX}	Output average current	40	mA
f_{max}	max. switching frequency	50	kHz
V_{CE}	Collector emitter voltage sense across the IGBT	1700	V
dv/dt	Rate of rise and fall of voltage secondary to primary side	50	kV/ μ s
V_{ISO10}	Isolation test voltage input - output (2 sec. AC)	4000	Vac
V_{ISO12}	Isolation test voltage output 1 - output 2 (2 sec. AC)	1500	V
R_{Gonmin}	Minimum rating for R_{Gon}	3	Ω
$R_{Goffmin}$	Minimum rating for R_{Goff}	3	Ω
$Q_{out/pulse}$	Max. rating for output charge per pulse	4 ¹⁾	μ C
T_{op}	Operating temperature	-40 ... +85	$^{\circ}$ C
T_{stg}	Storage temperature	-40 ... +85	$^{\circ}$ C

Characteristics

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

Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Units
V_S	Supply voltage primary side	14,4	15	15,6	V
I_{SO}	Supply current primary side (no load)		80		mA
	Supply current primary side (max.)			290	mA
V_i	Input signal voltage SKHI 22A H4 on/off		15 / 0		V
	SKHI 22B H4 on/off		5 / 0		V
V_{IT+}	Input threshold volt. (High) SKHI 22A H4	10,9	11,7	12,5	V
	SKHI 22B H4	3,5	3,7	3,9	V
V_{IT-}	Input threshold volt. (Low) SKHI 22A H4	4,7	5,5	6,5	V
	SKHI 22B H4	1,5	1,75	2,0	V
R_{in}	Input resistance SKHI 22A H4		10		k Ω
	SKHI 22B H4		3,3		k Ω
$V_{G(on)}$	Turn on gate voltage output		+ 15		V
$V_{G(off)}$	Turn off gate voltage output		- 7		V
R_{GE}	Internal gate-emitter resistance		22		k Ω
f_{ASIC}	Asic system switching frequency		8		MHz
$t_{d(on)IO}$	Input-output turn-on propagation time	0,85	1	1,15	μ s
$t_{d(off)IO}$	Input-output turn-off propagation time	0,85	1	1,15	μ s
$t_{d(eri)}$	Error input-output propagation time		0,6		μ s
$t_{PERRRESET}$	Error reset time		9		μ s
t_{TD}	Top-Bot Interf. Dead Time SKHI 22A H4	3,3		4,3	μ s
	SKHI 22B H4	no interlock		4,3	μ s
V_{CEsat}	Reference voltage for V_{CE} -monitoring		5 ²⁾	10	V
C_{ps}	Coupling capacitance primary secondary		12		pF
MTBF	Mean Time Between Failure $T_a = 40^{\circ}\text{C}$		2,0		10^6 h
w	weight		45		g

This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.

Kuusipulssisuuntaajan SKD 51 tekniset tiedot.

SKD 51



Power Bridge Rectifiers

SKD 51

Features

- Glass passivated silicon chips
- Fast-on terminals for pcb solder or plug on connections
- Sturdy insulated metal base plate
- Low thermal impedance through use of direct copper bonded aluminum substrate
- Blocking voltage up to 1800V
- High surge currents
- UL recognized, file no. E63 532

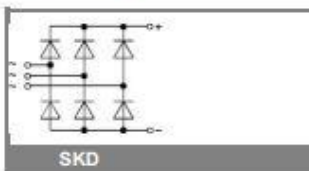
Typical Applications

- Three phase rectifier for power supplies
- Input rectifier for variable frequency drives
- Rectifier for DC motor field supplies
- Battery charger rectifiers
- Recommended snubber network:
RC: 0.1 μ F, 50 Ω ($P_R = 1$ W)

1) For solder connection. Permissible current for plug connection see DIN IEC 760E and DIN 46249 part 1

2) Freely suspended or mounted on an insulator

3) Mounted on a painted metal sheet of min. 250 x 250 x 1 mm



V_{RSM} V	V_{RRM}, V_{DRM} V	$I_D = 50^{(1)}$ A (full conduction) ($T_c = 127$ °C)
500	400	SKD 51/04
900	800	SKD 51/08
1300	1200	SKD 51/12
1500	1400	SKD 51/14
1700	1600	SKD 51/16
1900	1800	SKD 51/18

Symbol	Conditions	Values	Units
I_D	$T_c = 127$ °C	50	A
	$T_c = 45$ °C; isolated ²⁾	7	A
	$T_c = 45$ °C; chassis ³⁾	18	A
	$T_c = 45$ °C; R4A/120	27	A
	$T_c = 45$ °C; P5A/100	31	A
I_{FSM}	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	775	A
	$T_{vj} = 150$ °C; 10 ms	700	A
PI	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms	3000	A ² s
	$T_{vj} = 150$ °C; 8,3 ... 10 ms	2450	A ² s
V_F	$T_{vj} = 25$ °C; $I_F = 75$ A	max. 1,45	V
$V_{(RO)}$	$T_{vj} = 150$ °C	0,8	V
r_T	$T_{vj} = 150$ °C	8,5	m Ω
I_{RD}	$T_{vj} = 25$ °C; $V_{DD} = V_{DRM}, V_{RD} = V_{RRM}$	max. 0,2	mA
	$T_{vj} = 150$ °C; $V_{RD} = V_{RRM}$	4	mA
t_{tr}	$T_{vj} = 25$ °C; $I_F = I_R = 1$ A	5	μ s
$R_{th(j-c)}$	per diode	1,1	K/W
	total	0,183	K/W
$R_{th(j-a)}$	total	0,1	K/W
$R_{th(j-w)}$	isolated ²⁾ (chassis ³⁾)	9 (3,15)	K/W
		+40 ... +150	°C
T_{vj}		+40 ... +125	°C
T_{stg}			
V_{test}	a. c. 50 Hz; r.m.s.; 1 s / 1 min.	3600 (3000)	V
M_s	to heatsink	4,5 \pm 15 %	Nm
M_t			
m		97	g
Case		G 51	

IGBT-moduulin SKM 50 GB 123 D tekniset tiedot.



SEMIKRON

Absolute Maximum Ratings		Values ... 123 D	Units
Symbol	Conditions ¹⁾		
V _{CES}		1200	V
V _{CGR}	R _{GE} = 20 kΩ	1200	V
I _C	T _{case} = 25/80 °C	50 / 40	A
I _{CM}	T _{case} = 25/80 °C; t _p = 1 ms	100 / 80	A
V _{GES}		± 20	V
P _{tot}	per IGBT, T _{case} = 25 °C	310	W
T _j (T _{stg})		- 40 ... +150 (125)	°C
V _{isol}	AC, 1 min.	2 500	V
humidity	DIN 40 040	Class F	
climate	DIN IEC 68 T.1	40/125/56	
Diodes			
I _F = - I _C	T _{case} = 25/80 °C	50 / 40	A
I _{FM} = - I _{CM}	T _{case} = 25/80 °C; t _p = 1 ms	100 / 80	A
I _{FSM}	t _p = 10 ms; sin.; T _j = 150 °C	550	
I ² _t	t _p = 10 ms; T _j = 150 °C	1500	A ² s

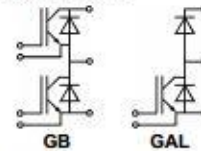
Characteristics		min.	typ.	max.	Units
Symbol	Conditions ¹⁾				
V _{(BR)CES}	V _{GE} = 0, I _C = 1 mA	≥ V _{CES}	-	-	V
V _{GE(th)}	V _{GE} = V _{CE} , I _C = 2 mA	4,5	5,5	6,5	V
I _{CES}	V _{GE} = 0 } T _j = 25 °C V _{CE} = V _{CES} } T _j = 125 °C	-	0,3	1	mA
I _{GES}	V _{GE} = 20 V, V _{CE} = 0	-	-	200	nA
V _{CEsat}	I _C = 40 A } V _{GE} = 15 V; I _C = 50 A } T _j = 25 (125) °C	-	2,5(3,1)	3(3,7)	V
V _{CEsat}	I _C = 50 A } T _j = 25 (125) °C	-	2,7(3,5)	-	V
g _{ts}	V _{CE} = 20 V, I _C = 40 A	-	30	-	S
C _{CHC}	per IGBT	-	-	350	pF
C _{ies}	V _{GE} = 0	-	3300	4000	pF
C _{oes}	V _{CE} = 25 V	-	500	600	pF
C _{res}	f = 1 MHz	-	220	300	pF
L _{CE}		-	-	30	nH
t _{a(on)}	V _{CC} = 600 V	-	70	-	ns
t _r	V _{GE} = + 15 V / - 15 V ³⁾	-	60	-	ns
t _{a(off)}	I _C = 40 A, ind. load	-	400	-	ns
t _r	R _{Con} = R _{Goff} = 27 Ω	-	45	-	ns
E _{on} ⁵⁾	T _j = 125 °C	-	7	-	mWs
E _{off} ⁵⁾		-	4,5	-	mWs
Diodes ⁸⁾					
V _F = V _{EC}	I _F = 40 A } V _{GE} = 0 V; I _F = 50 A } T _j = 25 (125) °C	-	1,85(1,6)	2,2	V
V _F = V _{EC}	I _F = 50 A } T _j = 25 (125) °C	-	2,0(1,8)	-	V
V _{TO}	T _j = 125 °C	-	-	1,2	V
r _T	T _j = 125 °C	-	-	22	mΩ
I _{RRM}	I _F = 40 A; T _j = 25 (125) °C ²⁾	-	23(35)	-	A
Q _{rr}	I _F = 40 A; T _j = 25 (125) °C ²⁾	-	2,3(7)	-	μC
Thermal Characteristics					
R _{thjc}	per IGBT	-	-	0,4	°C/W
R _{thjc}	per diode	-	-	0,7	°C/W
R _{thch}	per module	-	-	0,05	°C/W

SEMITRANS® M IGBT Modules

SKM 50 GB 123 D
SKM 50 GAL 123 D



SEMITRANS 2



Features

- MOS input (voltage controlled)
- N channel, Homogeneous Si
- Low inductance case
- Very low tail current with low temperature dependence
- High short circuit capability, self limiting to 6 * I_{nom}
- Latch-up free
- Fast & soft inverse CAL diodes⁸⁾
- Isolated copper baseplate using DCB Direct Copper Bonding Technology
- Large clearance (10 mm) and creepage distances (20 mm).

Typical Applications: → B 6 - 85

- Three phase inverter drives
- Switching (not for linear use)

¹⁾ T_{case} = 25 °C, unless otherwise specified

²⁾ I_F = - I_C, V_R = 600 V, - di_F/dt = 800 A/μs, V_{GE} = 0 V

³⁾ Use V_{GEoff} = -5 ... -15 V

⁵⁾ See fig. 2 + 3; R_{Goff} = 27 Ω

⁸⁾ CAL = Controlled Axial Lifetime Technology.

Case and mech. data → B 6 - 86
SEMITRANS 2