

# MOOTTOREIDEN OHJAUS

Torninosturin pienoismalli

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Tietokone-elektronikka  
Opinnäytetyö  
Lokakuu 2009  
Risto Väisänen

Lahden ammattikorkeakoulu  
Tietotekniikan koulutusohjelma

VÄISÄNEN, RISTO:

Moottoreiden ohjaus  
Torninosturin pienoismalli

Tietokone-elektroniikan opinnäytetyö, 40 sivua, 6 liitesivua

Lokakuu 2009

## TIIVISTELMÄ

---

Tämä opinnäytetyö käsittelee torninosturin pienoismallin DC-moottoreiden ohjausta. Työn tarkoitus oli oppia mahdollisimman paljon moottoreiden ohjauksesta ja piirilevysuunnittelusta. Työ käsittelee jo olemassa olevan torninosturin pienoismallin tutkimista ja sen pohjalta moottoreiden ohjauksen suunnittelua. Ohjauksen suunnittelu aloitettiin tutustumalla torninosturin pienoismalliin. Opinnäytetyön tarkoitus oli syventyä moottoreiden ohjaukseen mikro-ohjain sovelluksessa sekä piirilevysuunnittelun eri työvaiheisiin.

Rakennettuun torninosturin pienoismalliin tutustumisen jälkeen suunniteltiin H-silta ja sitä ohjaava mikro-ohjain piirikortti. Moottoreiden ohjaus koostuu sekä digitaalisesta että analogisesta elektroniikasta. DC-moottoreiden pyörimissuuntaa vaihdellaan H-siltojen avulla, joiden ohjaus toteutetaan Atmega8L -mikro-ohjain kytkennällä. Käyttöliittymäksi on suunniteltu ohjain, joka sisältää kaksi potentiometriä ja kaksi painiketta.

Opinnäytetyössä on esitetty, kuinka laitteen kustannuksia voidaan vähentää huomioimalla ne jo suunnitteluvaiheessa. Lopuksi on pohdittu piirilevysuunnittelua valmistuksen kannalta sekä korttien testausta ja ohjelmointia.

Avainsanat: mikro-ohjain, H-silta, DC-moottori

Lahti University of Applied Sciences  
Degree Programme in Information Technology

VÄISÄNEN, RISTO:

Controlling DC motors  
Scale model of a tower crane

Bachelor's Thesis in Computer Electronics, 40 pages, 6 appendices

October 2009

## ABSTRACT

---

The aim of this thesis was to study about controlling of DC motors and designing of printed circuit boards. The practical objective is to design the control of the DC motors of a tower crane.

The project started by investigating the scale model of the tower crane. The next step was to design an H-bridge and Atmega8L microcontroller based circuit board to control the H-bridge. The user interface that was designed is a controller which contains two potentiometers and two buttons.

The thesis demonstrates how it is possible to get lower costs by paying attention to costs at the design stage. It also examines what is good to take in to account about printed circuit board manufacturing when designing printed circuit boards. The thesis also deals with testing circuit boards and programming the microcontroller.

Key words: microcontroller, H-bridge, DC-motor

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	TORNINOSTURIN PIENOISMALLI	2
3	UUSI TOTEUTUS	3
4	DC-MOOTTORIN OMINAISUUDET	4
4.1	Torninosturin pienoismallin DC-moottorit	5
5	OHJAINKORTTI	6
5.1	Ohjainkortin jännitetulo	7
5.2	Oskillaattori	8
5.3	Ohjainkortin liitännät	9
5.3.1	Ohjelmointiliitäntä	9
6	OHJAIMEN SUUNNITTELU	10
6.1	Kytkinvärähtelyt ja niiden poisto	10
6.2	Kytkimet	11
6.3	Playstation -ohjaimen kotelo	12
6.4	Mikro-ohjaimen AD-muunnin	14
6.5	AD-muuntimen häiriöt ja niiden poisto	15
7	H-SILTA	16
7.1	H-siltojen suunnittelu	17
7.2	H-sillan toteutus	18
7.3	Transistoreiden jäähdytys	19
7.4	Optoerotin	20
7.5	Valmis H-silta	22
7.6	H-siltojen kotelointi	23
8	PIIRILEVYJEN VALMISTUSKUSTANNUKSET	24
8.1	Panelointi	24
8.2	Piirilevyjen kerrokset	25
8.3	Piirilevyjen poraus	26
8.4	Piirilevyn reititys	26

9	PIIRILEVYJEN SUUNNITTELU	27
9.1	Komponenttien asettelu	28
9.2	Automaattinen reititin	29
9.3	Kohdistusmerkit	30
9.4	Silkscreen	30
9.5	Design rule check	31
10	KOMPONENTTIEN TILAUS JA KUSTANNUKSET	31
11	TESTAUS JA PROTOTYYPIN RAKENNUS	32
12	OHJELMOINTI	33
13	KEHITYSIDEOITA	34
14	YHTEENVETO	36
	LÄHTEET	38
	LIITTEET	40

## 1 JOHDANTO

Tämän työn tavoitteena on tutkia jo valmiiksi rakennettua torninosturin pienoismallia ja suunnitella sen pohjalta moottoreiden ohjaus. Tarkoituksena on tutkia mitä täytyy tehdä, jotta siitä saataisiin toimiva. Torninosturin pienoismallin tutkimisen jälkeen on suunniteltu piirikaaviot, valittu komponentit sekä suunniteltu piirilevyt.

Nykypäivän elektroniikkasuunnittelussa ja valmistuksessa kustannukset ovat suuressa roolissa, joten myös kustannusten huomioiminen moottoreiden ohjauksen suunnittelussa on tarpeen. Opinnäytetyössä on mietitty miten kustannuksissa voidaan säästää sekä suunnittelu- että valmistusvaiheessa. Suunnitteluvaiheessa on hyvä huomioida myös testauksen ja valmistuksen tavoitteet ja rajoitukset.

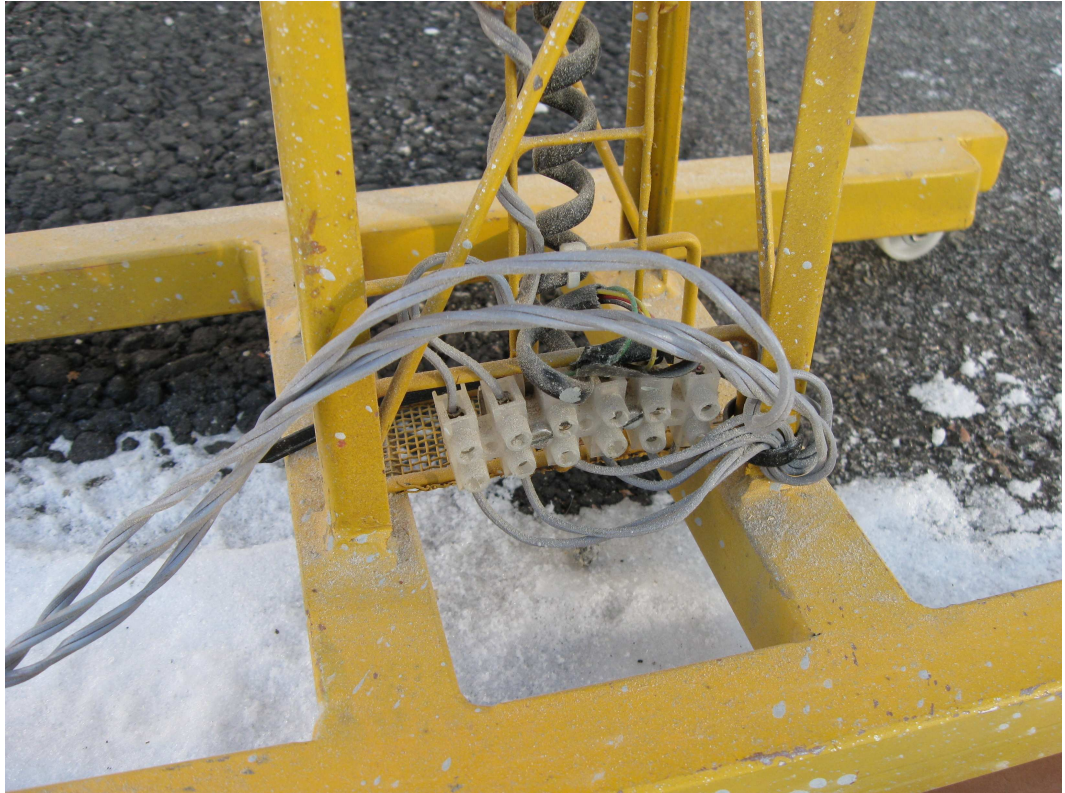
## 2 TORNINOSTURIN PIENOISMALLI

Torninosturin pienoismallin korkeus on 161cm ja puomin pituus kärjestä kärkeen on 161cm (Kuvio 1). Torninosturin pienoismalli on rakennettu noin 15 vuotta sitten. Torninosturin mekaanisen toteutuksen on tehnyt Kauko Väisänen.



KUVIO 1. Torninosturin pienoismalli.

Torninosturissa on kolme DC-moottoria, joilla ohjataan nosturin eri toimintoja. Toimintoja ovat puominkääntö, nostokelkan kuljetus edestakaisin sekä nostokoukun nostaminen ja laskeminen. Tällä hetkellä torninosturin moottoreiden ohjaus on toteutettu kytkemällä muuntajalta tuleva 6V suoraan DC-moottoreiden napoihin (Kuvio 2 ja 4).



KUVIO 2. Alkuperäinen kytkentä jännitelähteestä piikkiriman kautta moottoreille.

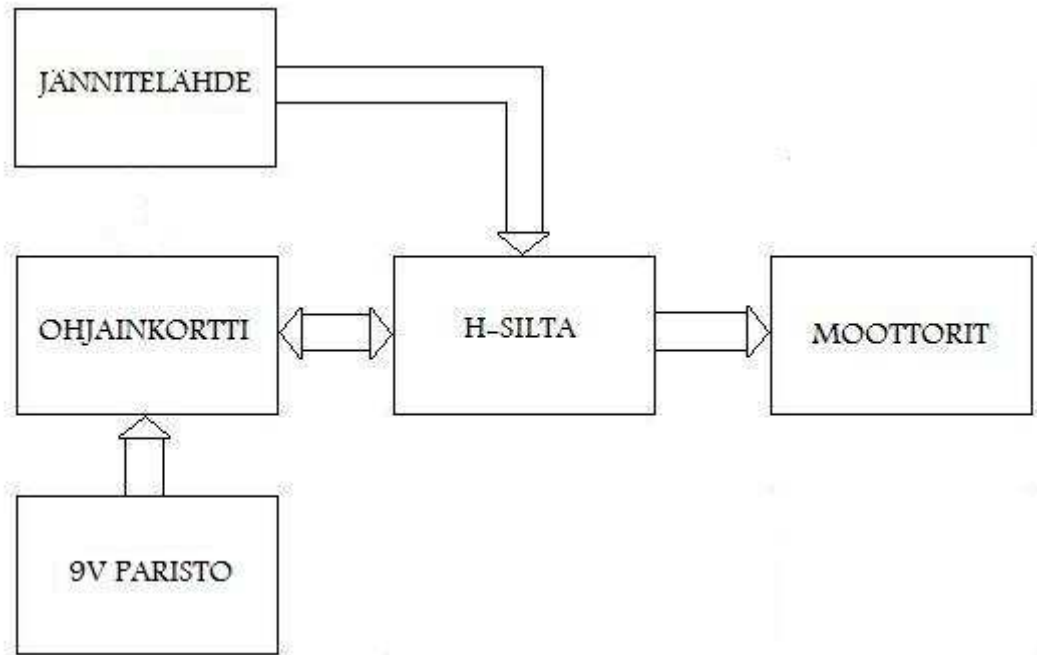
### 3 UUSI TOTEUTUS

Torninosturin pienoismallin suunnitteluun on tarkoituksena käyttää ilmaisia ohjelmistoja. Käyttöjärjestelmäksi olen valinnut ilmaisen Ubuntun, joka on yksi monista ilmaisista Linux jakeluista. Piirilevyn suunnitteluun olen käyttänyt Cadsoftin valmistamaa EAGLE ohjelmistoa, joka tulee sanoista Easily Applicable Layout Editor.

Torninosturin pienoismallin moottoreiden ohjaus toteutetaan suunnittelemalla kaksi erillistä piirilevyä, ohjainkortti sekä H-sillat sisältävä piirilevy.

Ohjainkortti sijoitetaan playstation-ohjaimen sisään. H-silloille jännite otetaan erillisestä jännitelähteestä. Ohjainkortille jännite otetaan 6F22 -tyyppisestä 9 V:n litiumparistosta. H-siltojen piirilevyiltä vedetään johdotukset torninosturin pienoismallin moottoreille (Kuvio 3).





KUVIO 3. Lohkokaavio uudesta toteutuksesta.

Torninosturin pienoismallin uudessa toteutuksessa käytetään hyödyksi jo torninosturissa kiinni olevia DC-moottoreita.

#### 4 DC-MOOTTORIN OMINAISUUDET

DC-moottorin etuja ovat edullinen hinta sekä hyvä vääntömomentti. DC-moottorit eivät sovellu erityisen tarkkaan paikoittamiseen ilman takaisinkytkentää ja ohjausta. DC-moottorissa on vain kaksi johtoa, eli + ja – navat. Moottorin pyörimissuunta saadaan muutettua kääntämällä napaisuutta. Moottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää syöttöjännitettä säätämällä, eli kun jännite laskee, niin myös pyörimisnopeus pienenee. Kun moottorille syötettävää jännitettä pienennetään, niin myös moottorin momentti pienenee. Käynnistettäessä DC-moottori nollanopeudesta moottori ottaa enemmän virtaa ja muodostuu virtapiikki. Pysäytystilanteessa, kun moottorilta katkaistaan virta, mutta roottori vielä pyörii massan momentilla, moottori toimii generaattorina. Tämä tarkoittaa, että se indusoi jännitettä, joka tulee piikkinä ohjaukselle. Jos tätä asiaa ei ole huomioitu, niin pahimmassa tapauksessa jännitepiikki voi rikkoa ohjauselektronikan tai aiheuttaa muita toimintahäiriöitä. (Sähkötekniikan osasto, 2009.)

#### 4.1 Torninosturin pienoismallin DC-moottorit

Tämän projektin yksi tavoitteista on pitää komponenttien hinta alhaisena, joten DC-moottorin valintaa voidaan pitää hyvänä ideana. Torninosturin pienoismallissa jo kiinni olevia DC-moottoreita pystytään hyödyntämään (Kuvio 4). Torninosturin pienoismallissa on radio-ohjattavista autoista irroitettut DC-moottorit, joiden tarkkuus riittää torninosturin pienoismallissa tarpeeksi tarkkaan paikoittamiseen.



KUVIO 4. Torninosturin pienoismallin DC-moottori.

## 5 OHJAINKORTTI

Ohjainkortti toteutetaan 8-bittisellä mikro-ohjaimella (Liite 1). Mikro-ohjaimena käytetään Atmelin valmistamaa atmega8L -mikro-ohjainta 32 -pinnisessä TQFP-kotelossa. Kaikki Atmelin AVR mikro-ohjaimet sisältävät saman 8-bittisen RISC -prosesorin, joten mikro-ohjaimien ohjelmien siirrettävyys onnistuu hyvin mikro-ohjaimelta toiselle. Mikro-ohjaimen valintaan vaikuttivat myös Atmelin valmistamien mikro-ohjaimien edullisuus sekä runsaat ja hyvin toteutetut helppolukuiset dokumentaatiot. Dokumentaatiot ovat erittäin hyvin järjestettyjä ja kattavia. Atmelilta on saatavana myös ilmaisia Atmelin mikro-ohjaimien ohjelmistojen kehitykseen tarkoitettuja ohjelmistoja.

Atmega8 -mikro-ohjaimia on kahta eri tyyppiä: Atmega8 ja Atmega8L.

Atmega8L -mikro-ohjaimelle voidaan syöttää 2.7 – 5.5 V:n käyttöjännite ja sen maksimi kellotaajuus on 8Mhz. Atmega8 -mikro-ohjaimelle voidaan syöttää 4,5 – 5,5 V:n käyttöjännite ja sen maksimikellotaajuus on 16Mhz. Atmega8L -mikro-ohjain käy hyvin sovelluksiin, joissa tarvitaan tehonsäästöä. Torninosturin pienoismallin ohjainkortissa tarvitaan mikro-ohjaimen tehonsäästö ominaisuuksia, koska ohjainkortin käyttöjännite saadaan 9 V:n paristosta.

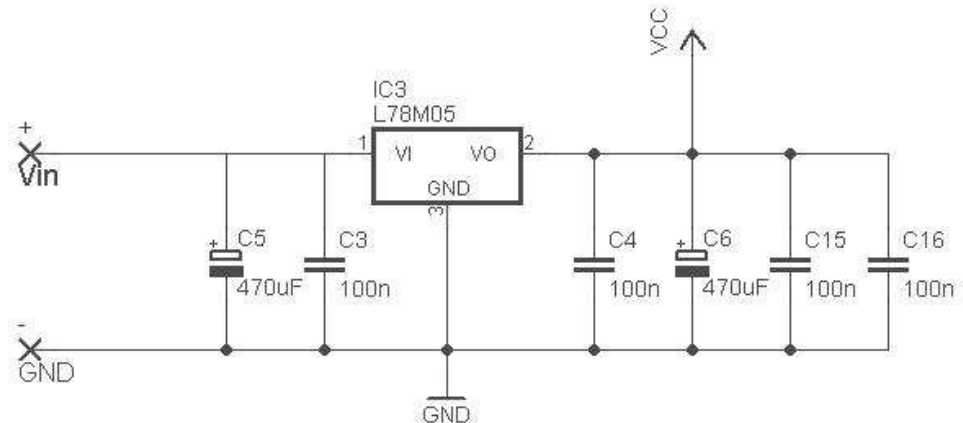
TAULUKKO 1. Atmega8L -mikro-ohjaimen perusominaisuudet.

8 KB Flash-muistia
512 B EEPROM-muistia
1024 B SRAM-käyttömuistia
kaksi 8-bittistä ajastinta/laskuria
Yksi 16-bittinen ajastin/laskuri
kolme PWM lähtöä
10-bit AD-muunnin
Vahtiajastin (watchdog timer)
SPI-sarjaliitäntä piirin ohjelmointia varten
23 I/O-liitäntää

## 5.1 Ohjainkortin jännitetulo

Paristosta saatavan mikro-ohjaimelle sopivan 5 V:n käyttöjännitteen vakavointiin käytetään L78M05CDT- jänniteregulaattoria suotokondensaattoreineen (Kuvio 5). Jänniteregulaattori pyrkii pitämään lähtöjännitteen tietyllä tasolla. On suositeltavaa käyttää regulaattorin kanssa suotokondensaattoreita, jotka pyrkivät suodattamaan jännitteen muutoksia ja estämään regulaattorin värähtelyä. Regulaattorin lähtö- ja tulopuolelle laitetaan molempiin kaksi suotokondensaattoria. Regulaattorissa on vakiona sisäänrakennettu oikosulku- ja yllilämpösuojaus.

LM78xx-sarjan regulaattoreille luvataan käytetyssä kotelossa 350 mA lähtövirta, joka on riittävä mikro-ohjaimelle. Regulaattorista valitaan 2%:n tarkkuudella toimiva malli, joka on hinnaltaan edullisempi kuin 1%:n tarkkuudella oleva malli. Kytchentäkaavion keraamiset kondensaattorit C15 ja C16 ovat lisätty ohjainkortin mikro-ohjainta ja LM809-piiriä varten (Kuvio 5). LM809 on national semiconductorin valmistama mikro-ohjaimille suunniteltu valmis RESET-piiri SOT23-kotelossa.



KUVIO 5. Jännitteen regulointi tulojännitteestä viiteen volttiin.

## 5.2 Oskillaattori

Mikro-ohjaimen tarvitsema kellopulssi voidaan tehdä ulkoisella oskillaattorilla tai mikro-ohjaimen sisäisellä oskillaattorilla. Oskillaattorin valintaan vaikuttavat monet asiat kuten hinta, tarkkuus ja laitteen käyttöympäristö. Oskillaattoreiden perustyytit voidaan luokitella kahteen eri ryhmään: mekaaniset oskillaattorit, kuten kiteet ja keraamiset oskillaattorit sekä RC-oskillaattorit.

Keraamiset ja kideoskillaattorit tarjoavat hyvän tarkkuuden ja ympäristön lämpötilan vaikutus on vähäistä oskillaattorin tarkkuuteen. RC-oskillaattoreiden hyvä puoli on nopeampi käynnistymisaika, mutta heikkoutena on että ne kärsivät enemmän ympäristön lämpötilan vaihteluista. RC-oskillaattorien tarkkuus voi vaihdella jopa 5%:n ja 50%:n välillä riippuen lämpötilan vaihteluista.

Mikro-ohjaimen sisäistä oskillaattoria käytettäessä ei saada yhtä tarkkaa kellopuls- sia kuin ulkoista oskillaattoria käytettäessä. Sisäisen oskillaattorin käytön etuna on edullisuus, koska silloin ei tarvita erillisiä komponentteja. Mikro-ohjaimen sisäis- tä oskillaattoria käytettäessä tarvitaan myös vähemmän tilaa piirilevyllä. (Science- prog, 2009)

Mikäli oskillaattorilta vaaditaan vakautta ja tarkkuutta voidaan käyttää lämpötila- kompensoituja oskillaattoreita. Näissä oskillaattoreissa on sisällä kytkentä, joka kompensoi lämpötilan muutoksen, mutta ne ovat todella kalliita. Kideoskillaatto- reiden käytössä on vaarana värähtelyherkkyys ja tarkkuuden heikkeneminen oskil- laattorin iän myötä. Värähtelyherkkyden parantamiseksi voidaan valita keraami- nen oskillaattori, mutta silloin kellopulssin tarkkuus on paljon pienempi. (Science- prog, 2009)

Torninosturin pienoismalliin valittiin 3,68 Mhz:n kideoskillaattori luomaan kello- pulssi mikro-ohjaimelle. Kideoskillaattoria käytettäessä ei tarvitse huolehtia käyt- töympäristön lämpötilan vaihteluista. Torninosturin pienoismallia voidaan käyttää sisä- ja ulkotiloissa.

### 5.3 Ohjainkortin liitännät

Ohjainkortissa tarvitaan neljä liitäntää. Jännitetuloon kytketään 9 V:n paristo, josta saadaan ohjainkortin tarvitsema käyttöjännite. Ohjelmointiliitännän kautta siirretään C-kielellä toteutettu ohjelma mikro-ohjaimeen. Ohjainkortilla lähtöliitäntää tarvitaan H-siltojen ohjaamiseen, joilla voidaan muuttaa moottoreiden pyörimissuuntaa. Ohjainkortin tuloliitäntää tarvitaan ohjainkorttiin liitettäviä playstation-ohjaimen kytkimiä ja potentiometrejä varten (Kuvio 7).

#### 5.3.1 Ohjelmointiliitäntä

Ohjelmointiliittimenä ohjainkortilla toimii kuusipinninen J3-liitin. Ohjelman siirtäminen Atmeg8L -mikro-ohjaimeen voidaan tehdä ilman erityistä ohjelmointilaitetta. Ohjelma siirretään ohjelmointiympäristöstä ohjelmointikaapelin avulla mikro-ohjaimen Flash-muistiin. AVR-piiri hoitaa itse automaattisesti tiedon tallennuksen mikro-ohjaimen ohjelmamuistiin. Atmel käyttää tästä menetelmästä nimeä In-System-Programmable eli ISP. ISP-liitäntäkaapelin toinen pää liitetään PC-mikrotietokoneen sarjaporttiin. Atmega8L -mikro-ohjaimen ohjelmointiliitin kytketään vastusten kautta reset-, PB3-, PB4-, PB5-liitäntöihin (Taulukko 2). (Koskinen 2004, 149)

TAULUKKO 2. ISP-Signaalien merkitykset.

Mikro-ohjaimen pinni	Signaalin nimi	Selite
PB5	SCK	Kellosignaali
PB4	MISO	Data-Lähtö
PB3	MOSI	Data-tulo
RESET	RESET	Mikro-ohjaimen nollaus

ATmega8L -mikro-ohjaimen resetin asettuessa alatilaan piiri menee ohjelmointitilaan. Ohjelmoiva laite syöttää kellosignaalin kontrollerin SCK liitäntään. Ohjel-

mointikomennot ja data syötetään mikro-ohjaimen MOSI-liitäntään. Tiedonluku ohjelmoitavasta mikro-ohjaimesta tapahtuu MISO-liitännästä. (Koskinen 2004, 149)

Ohjelmointiliittimen kytkennässä täytyy olla vastukset erottamassa PC:n rinnakkaisportin ja mikro-ohjaimen liitännät. Kun ohjelmointi on suoritettu, mikro-ohjaimen laadittu ohjelma saattaa alustaa ohjelmointi liitäntään kytketyt I/O liitännät lähdeksi. Tällöin PC:n sarjaportin ja mikro-ohjaimen lähdöt kytkeytyvät toisiaan vasten. Mikäli näiden lähtöjen välillä ei ole vastuksia, syntyy oikosulku. Sopiva vastusten arvo on  $270\Omega$ - $470\Omega$ . (Koskinen 2004, 148)

Ohjelmointiliitännän ja I/O -liitäntöjen yhteiskäyttö ei aina välttämättä ole toimiva ratkaisu. Liitäntöjen yhteiskäytön toimivuuteen vaikuttaa, se mitä, I/O -liitäntöjen perään on kytketty. Jos lähtöliitäntöihin on kytketty jokin suuri kuorma, ohjelmoiva laite ei pysty vetämään erotusvastusten takaa mikro-ohjaimelle tulevia jännitesignaaleja riittävän ylä- ja alatilaan. (Koskinen 2004, 148)

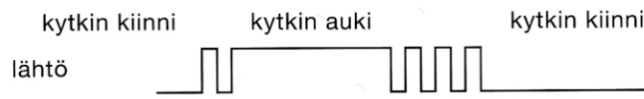
Ohjainkortilla ohjelmointiliittimen ja I/O -liitäntöjen yhteiskäyttö onnistuu, koska mikro-ohjaimen PORTB -lähtöihin liitetään H-sillan ohjaukseen käytetyt optoerottimet. Optoerotin näkyy mikro-ohjaimen lähtöliitännässä tavallisena ledinä.

## 6 OHJAIMEN SUUNNITTELU

Ohjainkorttiin liitettävä ohjain toteutetaan käyttämällä hyödyksi Playstation-ohjaimen koteloa sekä siitä saatavia potentiometrejä ja painokytkimiä.

### 6.1 Kytkinvärähtelyt ja niiden poisto

Kytkimen avautuessa tai sulkeutuessa kytkin värähtelee jonkin aikaa ja mikro-ohjaimen tuloliitännässä esiintyy kiusallisia ylimääräisiä hetkellisiä loogisen tilan muutoksia (Kuvio 5). Värähtelyitä esiintyy enemmän kytkimen sulkeutuessa.

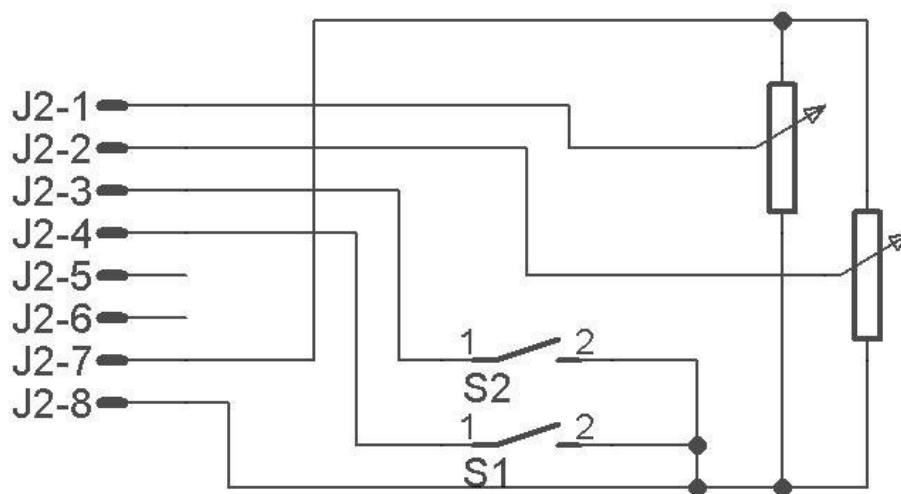


KUVIO 5. Loogisen tilan vaihtuminen kytkintä avatessa tai suljettaessa (Vahtera 2003, 226).

Ohjelmallisesti kytkinvärähtelyitä poistetaan viiveen avulla, jolloin täytyy tietää kuinka kauan kytkennässä käytetyn kytkimen värähtelyaika on. Kytkimien värähtelyaika on tyypillisesti noin 20 ms, mutta värähtelyaika voi olla jopa 100 ms. Ohjaimen kytkinhäiriöiden poisto toteutetaan painonappien tulolittäntään kytketyillä kondensaattoreilla sekä ohjelmallisesti viiveen avulla.

## 6.2 Kytkimet

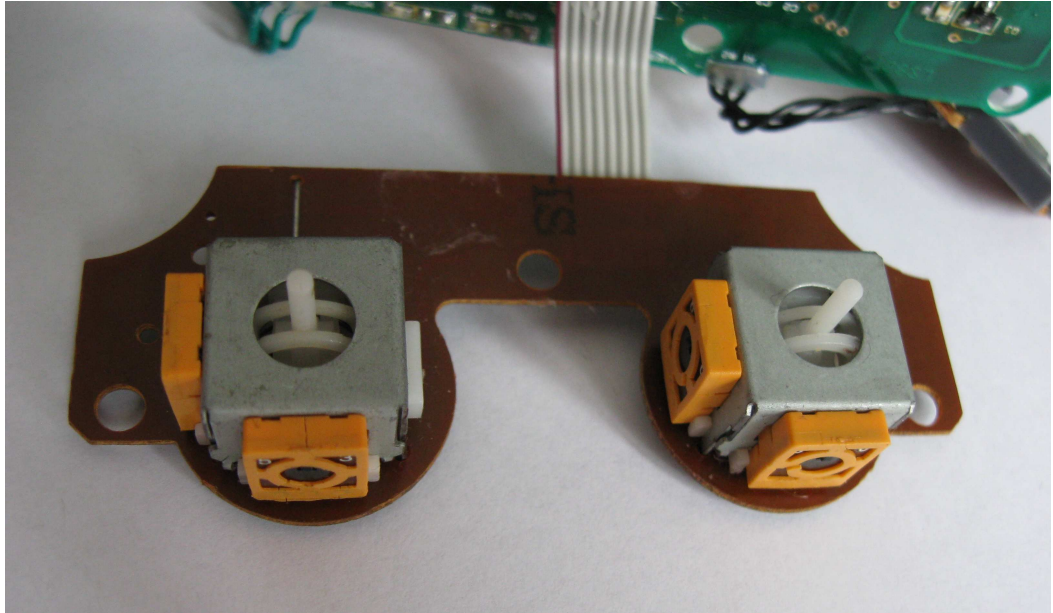
Ohjainkortin PORTC -tuloliitännässä olevaan 6 -pinniseen J2 -liittimeen liitetään playstation -ohjaimesta irrotettava piirilevy, joka sisältää kaksi kierrettävää potentiometriä ja kaksi painonappia (Kuvio 6). Ohjainkortilla olevan J2 -liittimen 7 -pinni on kytketty käyttäjännitteeseen ja 8 -pinni maadoitukseen.



KUVIO 6. Playstation -ohjaimesta irrotettavan piirilevyn kytkentä J2-liittimeen.



Playstation -ohjaimesta saatava piirilevy kiinnitetään ohjainkorttiin micromatch -liittimellä käyttäen 6 -pinnistä lattakaapelia, joka on valmiiksi kiinnitettynä playstation -ohjaimesta otettavassa piirilevyssä (Kuvio 7). Playstation ohjaimessa käytetyt painonapit ja potentiometrit ovat tavallisia elektroniikkakomponentteja.



KUVIO 7. Playstation -ohjaimesta irrotettu piirilevy.

### 6.3 Playstation -ohjaimen kotelo

Yleensä ongelmana on edullisen ja hyvän sekä kätevä sopivan valmiin kotelon löytäminen ohjaimelle. Torninosturin pienoismallin ohjaimen kotelona käytetään playstation -ohjaimen koteloa (Kuvio 8). Playstation -ohjaimen kotelo on hyvin kätevä sopiva. Tarkoituksena on korvata entinen nosturin ohjain (Kuvio 9) playstation -ohjaimen kotelosta tehdyllä ohjaimella.



KUVIO 8. Playstation -ohjaimen kotelo.



KUVIO 9. Torninosturin pienoismallin vanha ohjain.

Ohjainkortin jännitelähteenä käytettävä 9 V:n paristo voidaan sijoittaa playstation -ohjaimen sisään toiseen käsikahvaan. Ennen pariston sijoittamista ohjaimen sisältä joudutaan poistamaan ohjaimen käsikahvoissa sijaitsevat epäkeskomoottorit eli tärinätoiminnon luovat moottorit. Toinen tarpeettomaksi jäävä epäkeskomoottori voidaan jättää tarvittaessa toiseen käsikahvaan tasapainottamaan ja korjaamaan ohjaimen painopistettä, jolloin ohjainta on miellyttävämpi pitää käsissä.

#### 6.4 Mikro-ohjaimen AD-muunnin

Ohjaimen potentiometrit kytketään Atmega8L -mikro-ohjaimen PORTC:ssä oleviin AD-muuntimen pinneihin. Atmega8L -mikro-ohjain sisältää 10-bittisen AD-muuntimen. AD-muunnin muuntaa analogisen jännitteen 10-bittiseksi arvoksi, jonka voi lukea mikrokontrollerin ADCH- ja ADCHL -rekistereistä. (Atmega8L datasheet 2009, 197)

Atmega 8L -mikro-ohjaimen AD-muuntimet ovat optimoitu signaaleille, joiden impedanssi on noin 10 k $\Omega$  tai vähemmän. Playstation -ohjaimen potentiometrit ovat yleismittarilla mitattujen tulosten mukaan 4,7 k $\Omega$  potentiometrejä, joten ne soveltuvat käyttöön erinomaisesti. Käyttämällä 10 k $\Omega$  tai pienempiä potentiometrejä AD-muuntimen näytteenotto aika on olematon. Suurempia kuin 10 k $\Omega$  potentiometrejä käytettäessä näytteenottoaika voi vaihdella ja suurentua huomattavasti. (Atmega8L datasheet 2009, 202)

Ohjainkortissa mikro-ohjaimen AD-muuntimen referenssijännitteenä käytetään muuntimen sisäistä 2,56 voltin jännitettä. Sisäinen referenssijännite valitaan asettamalla REFS1- ja REFS0 -bitit ykkösiksi mikro-ohjaimen ADMUX -rekisterissä. (Atmega 8L datasheet 2009, 197)

## 6.5 AD-muuntimen häiriöt ja niiden poisto

Digitaalipiirit kehittävät häiriöitä, jotka heikentävät AD-muunnoksen tarkkuutta eli analogisten arvojen mittausta. AD-muunnoksen tarkkuutta voidaan parantaa seuraavilla tavoilla:

- reitittämällä analogisten signaalien johtimet mahdollisimman lyhyiksi
- varmistamalla että johtimet kulkevat maadoituksen yli
- reitittämällä AD-muuntimen johtimet kaukaksi nopeista signaaleista

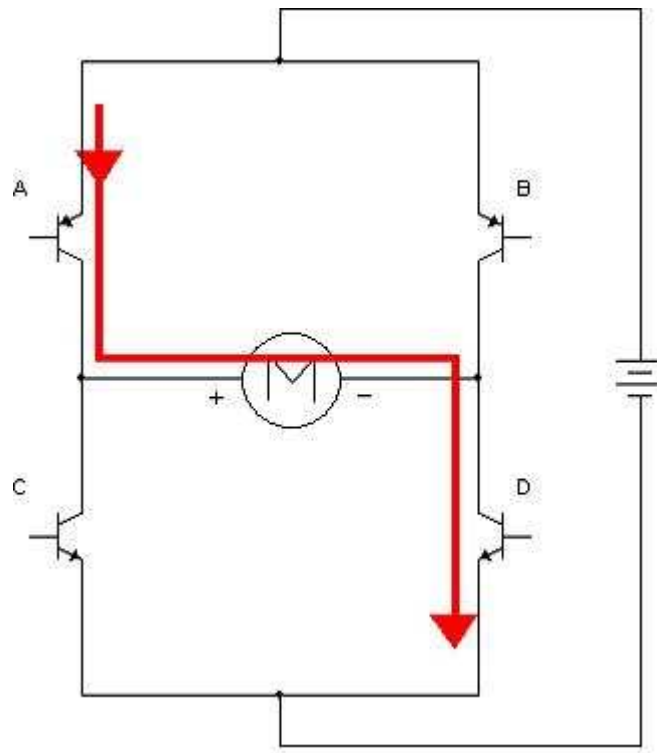
Mikro-ohjaimen AVcc -pinni tulisi kytkeä digitaalinen Vcc:hen LC -piirin kautta. (Atmega8L datasheet, 202)

Ohjaimen potentiometrien kytkennässä muuntimen toimintatarkkuus ja häiriöttömyys eivät ole oleellisia kun huomioidaan käyttökohde ja tarkoitus. Kytettäessä potentiometrit AD-muuntimeen, voidaan tarvittaessa toteuttaa nopeudensäätö ohjainkortilla ohjattaville moottoreille. Suunnittelun alkuvaiheessa on tarkoitus saada moottorit toimimaan ainoastaan yhdellä nopeudella jolloin riittää, että muuntimelle asetetaan yksi raja-arvo, jonka ylittäessä tila muuttuu nolasta ykköseksi.

## 7 H-SILTA

Torninosturin pienoismallin DC-moottorien pyörimissuuntaa voidaan muuttaa H-sillan avulla. H-sillan toimintaperiaate moottorien pyörimissuunnan muuttamiseen on hyvin yksinkertainen. Transistorit toimivat H-sillassa kytkiminä.

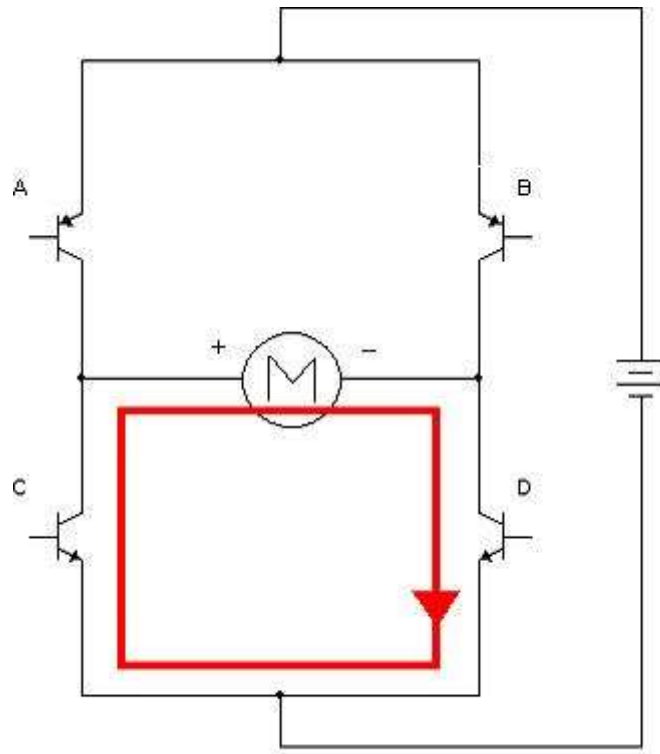
Kun H-sillan transistoreista A ja D johtavat, silloin virta pääsee kulkemaan moottorin läpi ja moottori pyörii positiiviseen suuntaan (Kuvio 10). Kun taas H-sillan transistoreista B ja C johtavat, moottorin pyörimissuunta vaihtuu negatiiviseen suuntaan.



KUVIO 10. Virran kulku H-sillassa, kun transistorit A ja D johtavat.

Oikosulkemalla moottorin plus- ja miinusnapa saadaan moottori ”jarrutus” asentoon. Tämä tapahtuu kun H-sillan transistoreista samanaikaisesti johtavat C ja D

transistorit (Kuvio 11). Moottori saadaan ”jarrutus” tilaan myös, kun transistorit A ja B johtavat samanaikaisesti.



KUVIO 11. Virran kulku H-sillassa, kun C ja D transistorit johtavat.

### 7.1 H-siltojen suunnittelu

H-sillan suunnittelussa tärkeitä ominaisuuksia olivat edullisuus, yksinkertaisuus ja monikäyttöisyys. H-sillalla täytyy pystyä ohjaamaan moottoreita 5 – 12 V:n käyttöjännitteellä. Torninosturin pienoismallin ohjaamiseen tarvitaan kolme erillistä H-siltaa, jotka ovat samalla piirilevyllä (Liite 4).

Valmiiden H-silta mikropiirien käyttäminen olisi ollut yksi vaihtoehto. Valmiiden edullisten H-silta ohjainpiirien heikkouksia ovat liian pieni tehonkesto. Esimerkiksi Texas instrumentsin valmistaman yleisesti käytetyn ULN2003 moottorin ohjauspiirin kappale hinta on 0,27 euroa, joten kolme kappaletta piirejä maksaisi

yhteensä 0,81 euroa. Jatkuva tehonkesto ULN2003-piirille on ainoastaan 500mA. (Farnell, 2009a)

Torninosturissa käytettävien moottoreiden tarvitsema virta on paljon suurempi kuin mitä edullisten H-siltapiirien tehonkesto. On myös hyvä mitoittaa H-sillat kestävämmän hieman suurempia virtamääriä, jolloin niitä voidaan käyttää myös muissa projekteissa.

Suuren tehonkeston omaavien valmiiden H-siltapiirien hinnat ovat kalliita. Esimerkiksi STM microelectronicsin valmistama moottorinohjaus mikropiirin L6235D:n kappalehinta on Farnellilta tilattaessa 15,99 euroa. L6235D:n tehonkesto olisi 7,1 ampeeria, joka olisi riittävä. (Farnell, 2009b)

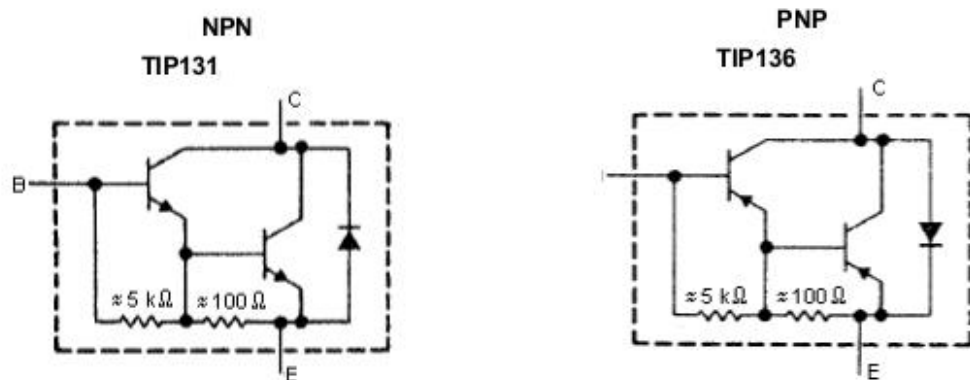
STM microelectronicsin valmistamia L6235D ohjauspiirejä joutuisi laittamaan 3 kpl joten yhteishinta nousisi korkeaksi. Pelkkien H-silta piirien hinnaksi tulisi noin 45 euroa, johon täytyisi lisätä muiden komponenttien hinnat.

## 7.2 H-sillan toteutus

Päätin toteuttaa H-sillat käyttämällä bipolaaritransistoreita (Liite 3). Transistoreiksi valitsin darlington -tyyppiset transistorit. H-sillan kytkennässä käytettävien transistorien valintaan vaikuttivat niiden tehonkesto, suurin sallittu kollektorin ja emitterin välinen jännite sekä suurin sallittu kollektorivirta. Darlington transistorissa on kytketty useampi transistori peräkkäin. Kytkemällä useampi transistori peräkkäin virtavahvistuskerroin kasvaa. (Wikipedia, 2009a)

Transistoreiden valinnassa täytyi kiinnittää huomiota myös niiden edullisuuteen. Yhden H-sillan toteuttamiseen tarvitaan 4 transistoria. Torninosturin pienoismallin toimintojen aikaansaamiseksi tarvitaan piirilevy, joka sisältää kolme H-siltaa. H-sillat sisältävän piirilevyn kustannukset nousevat helposti korkeaksi, kun transistoreja tarvitaan yhteensä 12 kappaletta.

Transistoreiksi valitsin edulliset Multicompin valmistamat TIP131 ja TIP136 -transistorit, jotka ovat samaa sarjaa ja soveltuvat hyvin käytettäviksi pareittain. Transistoreiden virrankesto on 8 ampeeria ja jännitteenkesto on 80 voltia, mikä riittää hyvin käyttötarkoitukseen. TIP131 ja TIP136 sisältävät myös diodin, jolla pyritään poistamaan moottorin antama jännitepiikki pysäytystilanteessa (Kuvio 12). TIP131 ja TIP136 ovat darlington -tyyppisiä transistoreita.



KUVIO 12. Darlington transistorin sisäinen kytkentä (Farnell, 2009).

### 7.3 Transistoreiden jäähdytys

Transistoreiden koteloksi valittiin TO-220, joka pystyy yksistään haihduttamaan ylimääräistä lämpöä jonkin verran. Jäähdytyslementin lisääminen TO-220 koteloon on helppoa ja erilaisia jäähdytysratkaisuja on saatavilla useita.

Suurin osa transistoreiden tehonkulutuksesta johtuu johdehäviöistä. Johdehäviöt aiheutuvat transistoreiden kanavaresistansseista. Transistorin tehonkulutus voidaan laskea kaavan 1 mukaan, jossa  $I_o$  on ulostulovirta ja  $R_{on}$  kanavaresistanssi:

$$P_k = I_o^2 \cdot R_{on}$$

KAAVA 1. Transistorin tehonkulutuksen laskeminen



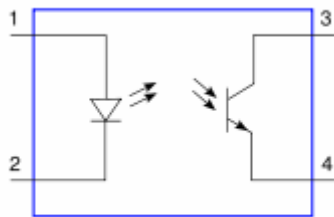
Transistoreiden jäähdytys toteutetaan kolmella jäähdytys-elementillä. Yhdellä jäähdytys-elementillä (Kuvio 13) voidaan jäähdyttää kaksi transistoria, jolloin jäähdytys-elementtejä tarvitaan yhteensä kolme, joten piirilevyllä jäähdytys-elementtien tarvitsema tila pienenee.



KUVIO 13. Transistorin jäähdytys-elementti (Farnell, 2009c).

#### 7.4 Optoerotin

Mikro-ohjaimen lähtöliitännän ja H-sillan transistoreiden välissä käytetään optoerotinta. Optoerotin näkyy mikro-ohjaimen lähdössä tavallisena ledinä, joten mikro-ohjaimen lähtöliitännästä saatava virta riittää hyvin optoerotin kytkemiseen päälle ja pois (Kuvio 14). Optoerottimien käytön etuna on, että mikro-ohjaimen ja DC-moottorin pyörimissuuntaa säättävän H-sillan välillä ei ole suoraa johdin yhteyttä, jolloin mahdolliset DC-moottorin aiheuttamat jännitepiikit eivät vahingoita mikro-ohjainta. Mahdollinen jännitepiikki jää optoerottimeen.



KUVIO 14. Optoerotin kytkentäkaavio (Wikipedia, 2009b).

Työssä käytetyn Avago technologiesin valmistaman ACPL247 -optoerottimen ledin vaatima virta on tyypillisesti 2 – 20 mA. ACPL247 -piirin datalehti ilmoittaa ledin kynnysjännitteen  $V_f$  olevan tyypillisesti 1,2 V, joka on mitattu 20 mA virral-la, mutta datalehdeltä löytyvän kuvaajan mukaisesti kynnysjännite ei merkittävästi muutu käyttövirran muuttuessa, joten käytetään tyypillistä arvoa. Kun tulo valitaan 5 V:n jännitetasolle ja ledin virraksi valitaan 5 mA, saadaan ledin etuvastusten arvoksi 720  $\Omega$  (Kaava 2).

$$R = \frac{V - V_f}{I} \quad V_f = \text{ledin kynnysjännite}$$

KAAVA 2. Etuvastuksen mitoittaminen

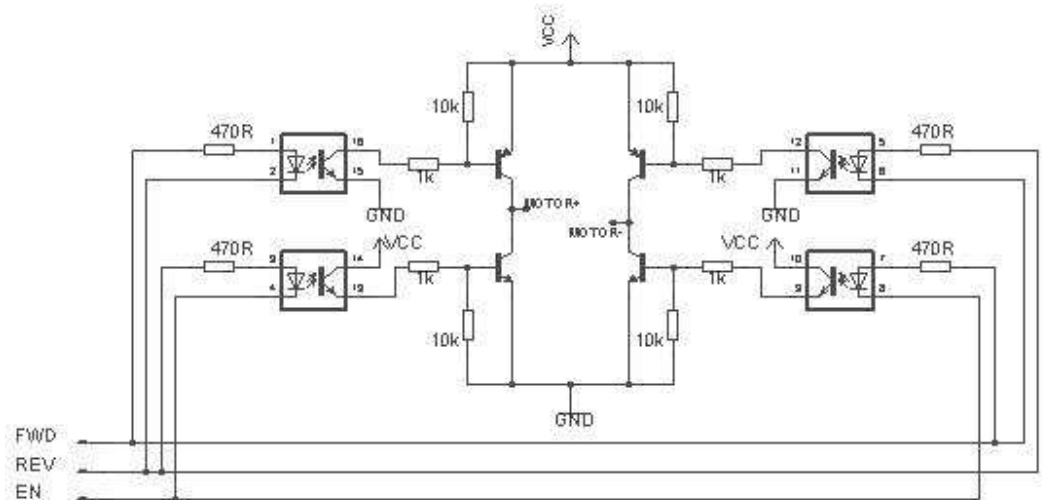
H-sillan optoerottimien etuvastuksiksi valituilla 470 Ohmin vastuksilla saadaan ledin läpi kulkevaksi virraksi 8,08 mA (Kaava 3).

$$I = \frac{V - V_f}{R} \quad V_f = \text{ledin kynnysjännite}$$

KAAVA 3. H-sillan optoerottimien ledin läpi kulkevan virran laskeminen

## 7.5 Valmis H-silta

H-sillan lopullisessa kytkentäkaaviossa on otettu huomioon, että transistorit eivät pääse oikosulkuun (Kuvio 15). Yhtä moottoria ohjaavan H-sillan toteutuksessa mikro-ohjaimen ja H-sillan välisenä rajapintana toimivat liitännät FWD, REV ja EN, jotka kytketään mikro-ohjaimen I/O -liitäntöihin.



KUVIO 15. Yhden moottorin H-silta kytkentä (McManis, 2009).

H-silta kytkennässä 10 k $\Omega$  vastukset toimivat ylös- ja alasvetovastuksina. Vastukset varmistavat, että transistorin läpi ei kulje virtaa, kun transistorille ei tule ohjaussignaalia.

H-sillan kytkennän avulla sen transistorit eivät voi mennä oikosulkuun (Kuvio 15). Kytkennässä käytettyjen johdotuksien takia H-sillan vasemman tai oikeanpuoleiset transistorit eivät voi olla "kielletyissä" tilassa (Taulukko 3). Kytkentään voidaan toteuttaa moottorin nopeudensäätö syöttämällä mikro-ohjaimesta pulssinleveysmodulaatio -signaalia (PWM) EN -liitäntään. Pulssinleveysmodulaatio -signaali muodostetaan säätämällä kuormaan menevää jännitettä muuntamalla pulssisuhdetta.

TAULUKKO 3. Moottorin pyörimissuunta eri ohjaussignaalien tiloilla (McManis, 2009).

FWD	REV	EN	MOOTTORIN TOIMINTA
1	0	0	Eteenpäin
1	0	1	Eteenpäin syöttämällä EN-liitäntään PWM:ää
1	1	0	Jarrutus
1	1	1	Jarrutus syöttämällä EN-liitäntään PWM:ää
0	1	0	Taaksepäin
0	1	1	Taaksepäin syöttämällä EN-liitäntään PWM:ää
0	0	0	Moottorille ei ohjausta ollenkaan
0	0	1	Moottorille ei ohjausta ollenkaan

## 7.6 H-siltojen kotelointi

H-siltojen piirilevyn ja komponenttien kotelointi toteutetaan käyttökohteen mukaan. Torninosturin pienoismallia tullaan käyttämään sekä ulko- ja sisätiloissa. Piirilevyn pinnalle voi päästä kosteutta, jos sitä käytetään ulkotiloissa. Elektronikan kosteussuojaukseen on monia menetelmiä. Mikäli laitetta käytetään kosteassa, niin kaikki piirilevyn kupariosat tulee lakata kunnolla suojalakalla, jotta kupari ei hapettuisi kosteassa. Komponentteja ja niiden jalkoja voi suojata peittämällä valmiin kytkennän muoviseen suojalakkaan. Sopivia suoja/eristyslakkoja saa elektronikkaliikkeistä spraypullosta.

## 8 PIIRILEVYJEN VALMISTUSKUSTANNUKSET

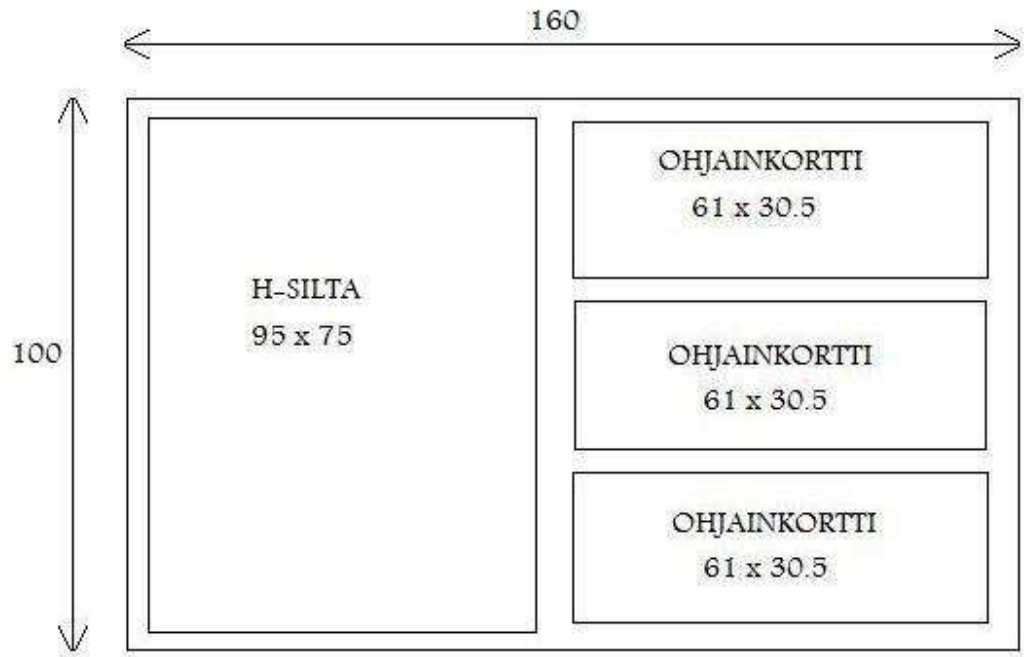
Piirilevyjen protokorttien valmistajaksi valitsin Bulgarian Olinex Ltd:n, joka valmistaa edullisia protopiirilevyjä. Kaksipuoleisen 160 mm x 100 mm kokoisien piirilevypaneelin hinta on 30 euroa + postikulut. Suomeen postikulut ovat halvimmillaan 5,50 euroa ja toimitusaika noin 2 viikkoa. Hinta on postikuluineen halpa verrattuna suomalaisiin piirilevyvalmistajiin. (Olinex, 2009a)

Vertailukohteena on käytetty suomalaisen piirilevyjä valmistavan Prinell Oy:n internetsivuilta löytyvää hintalaskuria. Prinellin kautta tilattaessa piirilevyjen hinnaksi tulisi 121 euroa sekä lisäksi postikulut. Prinellin toimitusaika on huomattavasti lyhyempi, joka saattaisi vaikuttaa silloin jos tehtäisiin tuotetta jonka suunnittelu kustannukset asiakas maksaisi urakkaluontoisesti. Toimitusaika tulisi huomioida myös kiireellisissä tapauksissa. Tässä tapauksessa torninosturin piirilevyjen toimitusajalla ei ollut merkitystä, joten ne tilataan edullisemmin Olinexilta.

### 8.1 Panelointi

Paneeli tarkoittaa piirilevyn muodostamaa kehystettyä kokonaisuutta, jonka tarkoituksena on helpottaa käsittelyä sekä nopeuttaa yksittäisen piirilevyn läpimenoa. Paneloinnin on täytettävä sekä piirilevyvalmistuksen että kokoonpanon asetetut vaatimukset. (Fjelstad 2006, 69)

Ohjainkortin piirilevyn koko on 61 mm x 30,5 mm. H-silta piirilevyn koko on 95 mm x 75 mm. Olinexin 160 mm x 100 mm paneeliin mahtuvat molemmat piirilevyt (Kuvio 16). Paneeliin on lisätty kaksi ylimääräistä ohjainkortin piirilevyä. Paneelin kustannukset ovat samat, vaikka koko paneelia ei käytettäisi hyödyksi. Hyvin toteutettu panelointi vähentää materiaalihukkaa ja siten myös kokonais kustannuksia.



Kuvan mitat millimetreinä

KUVIO 16. Piirilevyvalmistajalle lähetettävä panelointiohje.

## 8.2 Piirilevyjen kerrokset

Työssäni selvisi piirilevyn suunnittelussa kahdella signaalikerroksella (TOP ja BOTTOM). 2 -kerrospiirilevyllä on kalliimmat kustannukset kuin 1 -kerrospiirilevyllä, mutta 1 -kerrospiirilevyn toteuttaminen olisi ollut hankalaa. Yksikerroslevyillä tarvittavien hyppylankojen määrä olisi ollut suuri, joten toteutus oli helpoin tehdä kaksikerroslevynä. Kaksikerroslevyn valmistuskustannukset ovat noin kaksikertaa kalliimmat kuin yksikerroslevyn. (Olimex, 2009a)

Monikerroslevyjä tehtäessä on suositeltavaa laittaa myös jokaiseen kerrokseen jotain tekstiä, josta ilmenee miten päin piirilevyn kerros on tarkoitettu. Tekstin voi lisätä myös piirilevyn johdinkuvion ulkopuolelle.

### 8.3 Piirilevyjen poraus

Piirilevyvalmistuksessa porattavien reikien määrä nostaa piirilevyn valmistuskustannuksia. Piirilevyvalmistuksessa käytetyt koneet ovat kalliita, joten piirilevyvalmistuksessa poraukseen käytetty aika tulee kalliiksi myös asiakkaalle. Torninosturin pienoismallin piirilevyissä käytetään mahdollisimman paljon pintaliitoskomponentteja, joten piirilevyn porattavien reikien määrä jää vähäiseksi, ja siten kustannukset pysyvät alhaisempina.

Piirilevytehtaiden työstökoneissa on yleensä standardi porasarja reikien poraamiseen. Käyttämällä valitsemansa piirilevytehtaan standardi porakokoja jo suunniteluvaiheessa kustannuksissa voidaan säästää.

Esimerkiksi Olimexin hinnastossa jokainen eri porakoko kuin koneessa jo kiinni oleva standardi poranterä tuo lisähintaa 1 euron. Muiden kuin tehtaan standardi porasarjasta löytyvien porantereiden käyttö lisää kustannuksia, koska koneet joudutaan pysäyttämään ja vaihtamaan porantereitä, jolloin kuluu kallista koneen käyttöaikaa. (Olimex, 2009b)

Torninosturin pienoismallin piirilevyjen suunnittelussa on käytetty piirilevyvalmistaja Olimexin standardi porakokoja, joten levyt voidaan porata ilman lisäkustannuksia. Olimexin hinnastossa porattavien reikien määrä 160 mm x 100 mm paneelille on rajoitettu 500 reikään, jonka jälkeen ylimääräisistä rei'istä veloitetaan maksu. (Olimex, 2009a)

### 8.4 Piirilevyn reititys

Torninosturin pienoismallin piirilevyjen signaalien reitityksissä on otettu huomioon Olimexin piirilevyjen valmistuksen rajoitukset.

Olimexin hinnaston mukaan alle 12 milsiä leveät johtimet ja johtimien välit lisäävät piirilevyn toimitusaikaa ja hintaa huomattavasti. Johtimien leveyteen piirilevyllä sekä johtimen oikean leveyden valintaan vaikuttaa muun muassa virtamäärä,

käyttölämpötila ja laminaatin kuparin paksuus eli johtimen korkeus esimerkiksi 35 $\mu$ m.

Johtimen paksuudella ja leveydellä on suora vaikutus sen virrankuljetuskapasiteettiin. Johtimien leveys ja johtimien välit kannattaa tehdä mahdollisimman suuriksi, jotta se on helpompi valmistaa piirilevytehtaalla ja piirilevy tulee halvemmaksi. Komponentit joilla on paljon yhteisiä vetoja, olisi hyvä asetella mahdollisimman vierekkäin. Ensimmäiseksi tulisi reitittää virtajohtimet ja kriittiset signaalit. Nopeat signaalit, kuten kellopulsit, kannattaa reitittää mahdollisimman lyhyillä vedoilla.

## 9 PIIRILEVYJEN SUUNNITTELU

Piirilevyjen suunnitteluun käytettiin CadSoftin valmistamaa Eagle-suunnitteluohjelmistoa, joka on yleinen myös ammattikäytössä. Eagle on edullinen ja helppokäyttöinen piirikaavioiden ja piirilevyjen suunnitteluohjelmisto, joka sisältää Layout-editorin, piirikaavio-editorin ja automaattireititys-ohjelman.

Eaglesta on saatavilla myös Eagle Light-versio. Eagle Light on freeware-versio, joka on tarkoitettu harrastelijoille ja opiskelijoille. Ammattikäyttöön tarkoitettuun Professional-versioon verrattuna Eagle Light-version rajoituksia ovat:

- piirilevyn koko on rajoitettu 100mm x 80mm kokoiseksi
- vain kaksi signaalikerrosta (TOP ja BOTTOM)
- piirikaavio editorilla voi luoda vain yhden sivun kaavion

Eagle Light versiota on rajoitettu myös siten, että ohjelmaan ei ole saatavilla tukea muuten kuin sähköpostitse tai Eaglen internetsivujen keskustelupalstalla englanniksi. Ohjelmaa ei myöskään saa käyttää kaupalliseen takoitukseen, vaan ainoastaan yleishyödylliseen tai opiskelutarkoituksiin.



Eagle-suunnitteluohjelmistossa on monen eri käyttöjärjestelmän tuki. Eagle toimii Windows, Linux ja Mac-ympäristöissä. Harrastelijoille ja opiskelijoille suunnattu ilmainen Eagle Light-versio soveltuu käyttötakoituksiini erinomaisesti rajoituksistaan huolimatta, sillä Eaglen-suunnitteluohjelmistosta löytyy tuki myös käyttämälläni Ubuntu-käyttöjärjestelmälle ja työssä käytettyjen piirilevyjen koot eivät ylitä 100 mm x 80 mm kokoa sekä kaksi signaalikerrosta riittää hyvin piirilevyjen reitittämiseen.

## 9.1 Komponenttien asettelu

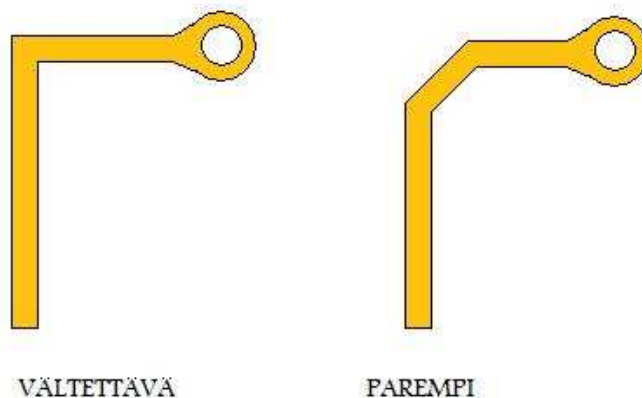
Piirilevyjen suunnittelussa kannattaa käyttää piirilevyohjelmiston standardi verkkoa (grid). Esimerkiksi 5 mils, 25 mils tai 50 mils. Vaikka piirilevysuunnitteluohjelmassa piirilevyt suunnitellaan amerikkalaisten käytämällä mils-asteikolla, niin on tärkeää muistaa, että usein eurooppalaiset piirilevytehtaat käyttävät tuotannossa Euroopassa käytettävää metrijärjestelmää, eli millimetrejä. 1 mils on tuuman tuhannesosa eli 0.0254 mm. Muunnettaessa milsit millimetreiksi lopputulos pyöristetään ylöspäin, joka tulisi huomioida esimerkiksi miettiessä porattavien reikien kokoja.

Piirilevyille yleensä asetellaan pintaliitoskomponentit piirilevyn BOTTOM - puolelle. Läpivienti eli PTH -komponentit asetellaan yleensä piirilevyn TOP - puolelle. Työssäni oli vähän komponentteja, joten niitä ei ollut järkevää sijoittaa kahdelle eri kerrokselle eri puolelle piirilevyä. Komponentit on hyvä asetella ainakin noin 100 milsin eli 2,54 millimetrin etäisyydelle reunoista, jos levystä tulee tuotannossa ladottava levy. Erilaisten koneiden liukuhihnat ja korttien paikallaan pitämislaitteet voivat osua komponentteihin. Toinen mahdollisuus on paneloida kortti niin että korttiin tulee kehykset. Paneloinnin kehysten ansiosta käsiteltävyys käsiladottavien komponenttien osalta paranee ja nopeutuu. Monesti myös tuotannossa ladonnassa ja käsiladonnassa käytettävät räkit tarvitsevat tilaa piirilevyn reunoilta.

Komponenttien asettelussa kannattaa välttää muita kuin 0°, 90°, 180° ja 270° kulmia jos se vain on mahdollista. Komponenttien asettelussa täytyy huolehtia, etteivät komponenttien juotostäplät tule liian lähelle toisiaan, jolloin komponenttien kotelot tulevat päällekkäin (overlay).

## 9.2 Automaattinen reititin

Automaattisen reitittimen (Autorouter) käyttöä olisi hyvä välttää, jos mahdollista. CAD-ohjelmistojen automaattiset reititysohjelmat eivät osaa lajitella johtimia virtapiirien ominaisuuksien mukaan. Tällaisia ovat mm. häiriöherkät johdinsignaalit ja niiden suojaus. Ne eivät myöskään osaa erotella leveämpiä johtimia vaativia tehonsyöttölinjoja. Piirilevyjen vetoja tehtäessä täytyy välttää happeansoja, eli johtimen kulma ei saisi olla mielellään alle 90° (Kuvio 17). Johtimet tulee kulkea piirilevyllä siten, että kaikki kulmat ja mutkat ovat tylppiä. Autoreitittimen käytön jälkeenkin täytyy korjailla ja tarkistaa johtimien vedot. Mahdollisuuksien mukaan olisi hyvä reitittää yksi puoli horisontaalisin ja toinen vertikaalisin vedoin. Piirilevyjen johtimien kuparoinnin olisi hyvä olla ainakin 2 mm:n päässä levynreunoista, jotta vältetään oikosulkuja koteloon asennuksen jälkeen.



KUVIO 17. Piirilevyllä tulee välttää teräväkulmaisia johdinvetoja.

Läpivientien käyttöä komponenttien alla tulisi välttää. Läpivienteihin jää yleensä juotoksessa käytettävää fluksia, vaikka levy puhdistetaisiin, joka voi aiheuttaa ongelmia. Myös mahdollisissa korjaustilanteissa siihen on vaikea päästä käsiksi.

### 9.3 Kohdistusmerkit

Viimeistään komponenttien ladonnassa tarvitaan kohdistusmerkkejä (fiducials). Kohdistusmerkit sijaitsevat piirilevyn pinnassa, ja ne voivat olla joko paikallisia, globaaleja tai paneelikehykseen liitettyjä. Paikallisia kohdistusmerkkejä käytetään yleensä erittäin tarkkaa kohdistustarkkuutta vaativien komponenttien kohdistamiseen. Globaalit kohdistusmerkit ovat kaikkein yleisimmin käytettyjä, ja niiden avulla kohdistetaan suurin osa piirilevyn komponenteista. Globaaleja kohdistusmerkkejä olisi hyvä olla vähintään kolme aina yhtä piirilevyä kohden. Kohdistusmerkkejä on hyvä sijoittaa myös paneelien kehyksiin. Kohdistusmerkkien muotoa ei ole standardoitu, sillä mitään yleispätevää muotoa ei ole olemassa. Suositut kohdistusmerkkimallit ovat ”risuaidat”, tähdet ja pallot. Suunnittelijan täytyy olla tietoinen tuotantolinjan konenäköjärjestelmän kohdistusmerkeille asettamista vaatimuksista. Muodon lisäksi on huomioitava johdinkerroksen pinnoituksessa käytettävä materiaali. Laite, joka lukee hyvin kuparisen kohdistusmerkin, ei välttämättä kykene löytämään kultapinnoitettua merkkiä. Kohdistusmerkkien luotavuus on tärkeä seikka piirilevyjen kokoonpanossa. Yleensä prosessi keskeytetään, jos laitteisto havaitsee kohdistusvirheen.(Gilleo 2001, 185-186)

Torninosturin pienoismallissa käytettäviin piirilevyihin ei ole lisätty kohdistusmerkkejä, sillä ohjainkorttia ja H-siltojen piirikorttia ei todennäköisesti tulla koskaan valmistamaan ladontakoneilla teollisesti, vaan kokoonpano tehdään käsin.

### 9.4 Silkscreen

Eagle-piirilevysuunnitteluohjelma piirtää 8 milsin paksuisen standardi silkipainokuvion(silkscreen) eli komponenttien sijoittelukuvion. 8 milsin paksuinen silkipaino kuvio täytyy muuntaa 10 milsin paksuiseksi, jotta komponenttien sijoitte-

lukuvio voidaan painaa Olimex piirilevytehtaalla. Silkkipainon muuttamiseen on saatavilla valmis Eaglessa käytettävä scripti, joka muuttaa komponenttikuvion automaattisesti 10 milsin paksuiseksi.

## 9.5 Design rule check

Ennen piirilevyjen tehtaalle lähettämistä on suotavaa käyttää piirilevy suunnitteluohjelmiston suunnittelusääntöjen tarkistusta (Design Rule Check). Design rule check -toiminnolla voidaan katsoa onko johtimien välit tarpeeksi leveitä ja onko komponentteja aseteltu päällekkäin sekä onko silkkipaino tarpeeksi leveä ja tehdään vaatimuksien mukainen. Piirilevyohjelmistoon syöteään itse DRC-toiminnon raja-arvot, joita halutaan käyttää. Jos DRC-toiminto onnistuu ilman virheitä, kannattaa hieman pienentää raja-arvoja ja kokeilla myös sen jälkeen uudestaan. DRC-toimintoa käytettäessä täytyy muistaa laittaa kaikki tarpeelliset piirilevykerrokset päälle tarkistukseen mukaan. Mikäli DRC-tarkistus onnistuu minimiarvoilla virheettömästi, on mahdollista, että tarkistus ei onnistu piirilevytehtaalla, koska suunnittelussa mahdollisesti käytetyt milsit muutetaan milleiksi. Milseistä millimetreiksi muutettaessa arvot pyöristetään ylöspäin.

## 10 KOMPONENTTIEN TILAUS JA KUSTANNUKSET

Ohjainkortin ja H-siltojen piirilevyissä käytetyt komponentit tilataan Farnelilta, joka on elektroniikka- ja teollisuuskomponenttien jakelija. Kun keskittää ostokset yhteen elektroniikkakomponenttien jakelijaan, säästyy monen eri jakelijan postikuluilta. Ohjainkortissa käytetyt komponentit ja niiden hinnat ovat nähtävissä liitteessä 5. H-sillassa käytetyt komponentit ja niiden hinnat ovat nähtävissä liitteessä 6. Liitteissä 5. ja 6. piirilevyn hinnaksi on laskettu 15 euroa, joka tulee olimexin hinnaston mukaan. 30 euron hintainen piirilevypaneeli, on jaettu kahdella. Tämä projekti ei tule ammattikäyttöön, joten käyttöön ei valita erityisen tarkkoja komponentteja. Ohjainkortti ja H-sillat toteutetaan peruskomponenteista, joita on helposti saatavilla. Komponenttien valmistusta tuskin lopetetaan, joten vaihtoehtoinen ja sopiva tuote on saatavilla myös vuosien päästä.

## 11 TESTAUS JA PROTOTYYPIN RAKENNUS

Miten, milloin ja missä testaus suoritetaan, jäävät usein kokonaan huomioimatta tai ne huomioidaan vasta suunnitteluprosessin jälkeen. Testaus kannattaa ehdottomasti ottaa huomioon ennen suunnitteluprosessiin ryhtymistä, sillä testausprosessissa saatetaan tarvita erillisiä testikohtaisia kontaktipintoja. Aluksi tulee selvittää, mikä on testauksen varsinainen tarkoitus ja minkä tyyppiselle tai tasoiselle testaamiselle on tarvetta. ( Fjelstad 2006, 69)

Prototyyppi kannattaa valmistaa aina kun se on mahdollista. Prototyypin valmistus ja sen testaus auttavat vähentämään suunnitteluvirheitä lopputuotteessa. Piirilevyihin on hyödyllistä laittaa testipisteitä erilaisia mittauslaitteita varten, kuten esimerkiksi oskilloskoopin mittapäitä varten.

Suunnitteluvaiheen jälkeen seuraava vaihe on ohjainkortin ja H-siltojen piirilevyjen prototyyppien kasaaminen. Prototyyppinä kasattaessa on suositeltavaa kirjoittaa muistiin mitä suunnitteluvaiheen virheitä ilmenee, jotta viat saadaan korjattua seuraavaan versioon. Virheitä voivat olla esimerkiksi vääränlaiset juotostäplät verrattuna komponentin koteloon, tai komponenttien etäisyys toisistaan. Korttien käsin kasaaminen on suositeltavaa aloittaa pintaliitoskomponenteista. Pintaliitoskomponenttien juottamisen jälkeen laitetaan läpivientikomponentit, kuten liittimet ja elektrolyyttikondensaattorit. Läpivientikomponenteista kannattaa laittaa ensin matalimmat ja sitten aina seuraavaksi matalimmat. Näin tekemällä juotettavat läpivientikomponentit nojautuvat pöytää vasten kortin toisella puolella eivätkä tipahda pois.

Korttien kasaamisen jälkeen seuraava toimenpide on käyttöjännitteiden kytkeminen piirikorteille. Käyttöjännitteiden kytkemisen jälkeen kannattaa mitata kytkentäkaaviota apuna käyttäen eri pisteiden jännitteet ja tarkastella onko ne oikein.

Mikäli mikro-ohjaimen ohjelmoinnin jälkeen laite ei toimi tulisi tarkistaa seuraavat asiat:

- Mikro-ohjain ohjatuissa laitteissa on hyvä tarkistaa mikro-ohjaimen käyttöjännite, että se on aika tasan +5V. Käyttöjännite tulisi olla +4.8 – +5.3V. Käyttöjännitteessä ei saisi olla paljon häiriöitä.
- Kello-oskillaattorin toiminta.
- Reset-piirin toiminta. Reset ei saa jäädä päälle ja mikro-ohjaimen täytyy saada alussa Reset-pulssi.
- Mikro-ohjaimen keskeytykset. Mikään keskeytys ei saa olla päällä koko ajan.

## 12 OHJELMOINTI

Mikro-ohjaimen ohjelmointi on tarkoitus toteuttaa C-kielillä. Ohjelmointi tehdään Ubuntu -käyttöjärjestelmällä käyttäen ilmaista Kontrollerlab -ohjelmistoa, joka on melkein vastaava ohjelmisto kuin atmelin mikro-ohjaimille tekemä Windows ympäristössä toimiva AVR Studio. Jotta Kontrollerlab toimisi, täytyy ensin Ubuntuun asentaa Kontrollerlabin tarvitsemat C-kääntäjä paketit: gcc-avr, avr-libc ja gdb-avr.

Sulautetun järjestelmän pääohjelman täytyy olla ikuinen silmukka. Sulautetuissa järjestelmissä ei ole mitään kohtaa, johon ohjelman suoritus päättyy. Pääohjelman alkuun sijoitetaan kaikki kerran tehtävät alustustoimenpiteet. Ohjelman alussa alustetaan esimerkiksi I/O -portit, ajastimet ja ad-muunnin.

Torninosturin pienoismallin mikro-ohjaimen C-kielinen ohjelma toteutetaan modulaarisesti. Modulaarisessa ohjelmoinnissa ohjelma jaetaan osiin, jotka tehdään lyhyiksi ja yksinkertaisiksi. Modulaarinen ohjelma on helpompi ymmärtää, muut-

taa ja testata. Modulaarista ohjelmointia on myös hyvä käyttää silloin kun pääohjelmasta tulee pitkä eli yli yksi kuvaruudullinen. Pitkiä pääohjelmia on vaikea lukea ja ymmärtää. Ajatus katkeaa helposti pitkää ohjelmakoodia luettaessa. Modulaarisuutta tarvitaan myös siitä syystä, että samanlaiset ohjelmanosat toistuvat ohjelmissa eri kohdissa. Kun tällaiset osat toteutetaan itsenäisinä moduuleina, niiden liittäminen ohjelman eri osiin on helppoa. Moduulien avulla rakennettaessa ohjelmistokokonaisuus, niiden pitää pystyä kommunimoimaan keskenään. Modulaarisuus edellyttää moduulien välisen kommunikaation toteuttamista. (Silander 2000, 113.)

C-kieli ei varsinaisesti tue modulaarista ohjelmointia, mutta siinä on kuitenkin ominaisuuksia, joiden avulla modulaarisuus voidaan toteuttaa. Modulaarisuus voidaan toteuttaa funktioiden ja niiden prototyyppien sekä otsaketiedostojen (header files) avulla. Torninosturin pienoismallin C-kielinen ohjelma jaetaan useaksi pienehköksi funktioksi, joista kukin suorittaa tietyn toimenpiteen. Pääohjelma koostuu lähinnä funktiokutsuista.

### 13 KEHITYSIDEOITA

Käytettäessä moottoreiden nopeudensäätöä H-sillat olisi luultavasti parempi toteuttaa käyttämällä kanavatransistoreita (FET). Kanavatransistoreita käytettäessä jo suunniteltua ohjainkorttia voitaisiin käyttää hyödyksi uudessakin versiossa, mutta H-siltojen suunnittelu täytyisi tehdä uudelleen. Kanavatransistoreita käytettäessä H-sillat sisältävän piirikortin kustannuksen nousisivat, joten silloin olisi valmiiden moottorinohjaukseen tarkoitettujen piirien käyttöä syytä harkita.

Mikäli torninosturin pienoismallin H-siltojen protokortti pääsisi tuotantoon tai sitä tehtäisiin isommissa erissä, H-silta kytkennän transistorit kannattaisi vaihtaa pintaliitoskomponenteiksi, silloin käsinladontaa olisi vähemmän ja kortin läpimenoaika tuotannossa olisi nopeampi. Bipolaaritransistorien tai kanavatransistorien vaihtaminen pintaliitoskomponenteiksi vaikeuttaisi transistorien jäähtymisen toteutusta. Jäähdytys-elementit veisivat piirilevyllä enemmän tilaa.

Moottoreiden nopeudensäädön toteuttaminen ohjaimen potentiometriä avulla hyödyntäen mikro-ohjaimen AD -muunninta helpottaisi moottoreiden paikoittamista, jolloin ohjauksesta tulisi ”pehmeämpi”.

Tarkoitukseni on suunnitella seuraava nosturin ohjainkortin versio langattomaksi. Tämän asian olen ottanut huomioon jo suunnittelun tässä vaiheessa ohjainkortin käyttöjännitteen ottamisella 9 V:n paristosta. Langattomassa toteutuksessa ohjainkortin piirilevyllä on lisättävä lähetin ja H-siltojen piirilevyllä vastaanotin ja sen tarvitsemat lisäkomponentit. Langattomassa toteutuksessa C-kielellä toteutettu ohjelma monimutkaistuu hieman.



## 14 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia torninosturin pienoismallia ja suunnitella sen pohjalta moottoreiden ohjaus. Mielestäni onnistuin siinä hyvin, vaikka työssä jäi vielä parannettavaa. Moottoreiden ohjaamiseen on useita eri toteutusvaihtoehtoja. Valitsin moottoreiden ohjaukseen bipolaaritransistoreilla toteutetun H-siltakytkennän, jota ohjataan mikro-ohjaimella. Yksi syy bipolaaritransistorien valintaan oli niiden edullisuus.

Lopulliseksi hinnaksi piirikorttien komponenteille ja piirilevyille tuli yhteensä noin 85 euroa. Suurimmat korttien kustannussäästöt saatiin H-siltojen suunnittelussa käyttämällä bipolaaritransistoreita. H-siltoihin kytkettävän sopivan jännitelähteen hankkiminen nostaa projektin kokonaishintaa.

Opinnäytetyötä tehdessä opin, että on useita vaihtoehtoja toteuttaa jokin laite, eikä ole olemassa yhtä ainoa oikeaa tapaa. Koulussa opittu teoria ja pohjatiedot ovat tärkeitä, mutta suurimman osan asioista oppii vain pintapuolisesti. Opinnäytetyötä tehdessä opin mikro-ohjaimista todella paljon uusia asioita, esimerkiksi niiden AD-muuntimen toiminnasta. Yllättävintä on ollut, kuinka paljon olen oppinut alaan liittyviä englanninkielisiä sanoja tutkiessani englanninkielisiä lähteitä. Siitä on apua työelämässä, koska yleensä tietotekniikan alalla kaikki uusi tieto on englanninkielistä. Työtä tehdessä opin piirilevysuunnitteluohjelmisto Eaglen syvällisen käytön, kuten esimerkiksi komponenttien muokkauksen ja niiden koteloiden teon sekä skriptien tekemisen ja käytön.

Opinnäytetyötä tehdessä aikaa vievää oli opetella käyttämään Eagle piirilevysuunnitteluohjelmistoa. Työssä kului aikaa myös manuaalien lukemiseen sekä komponenttien ominaisuuksiin tutustumiseen lukemalla datalehtiä.

Prototyypin rakentamisen jälkeen päästäisiin oikeastaan tositoimiin tekemällä mittauksia sekä testaamalla prototyypin toimivuutta. Prototyypin rakentamisen

jälkeen olisi mahdollista esimerkiksi mitata riittääkö darlington transistorin sisäinen ”freewheel” diodi poistamaan DC-moottoriin induoituvan jännitteen pysäytys- ja suunnanvaihtotilanteissa. Myös transistoreiden jäähtymisen oikein mitoittamisen varmistaminen mittauksien avulla olisi mahdollista. Prototyypin avulla voisi myös tutkia, tarvitaanko ohjainkortin jännitetuloon kela vakioittamaan virtaa. Laskettujen komponenttien oikeellisuus voitaisiin todeta testausvaiheessa, ja muuttaa ne seuraavaan versioon mikäli se olisi tarpeellista.

Tästä on hyvä jatkaa toteuttamaan uusia versioita torninosturin pienoismallin ohjaamiseen.

## LÄHTEET

Sähkötekniikan osasto. 2009. Sähkömoottori-teollisen yhteiskunnan käyttövoima. [verkkajulkaisu] Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. [viitattu 12.4.2009] Saatavissa: [http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical\\_engineering/articles/electrical\\_motor/Sivut/Default.aspx](http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/articles/electrical_motor/Sivut/Default.aspx)

Wikipedia. 2009a. Transistori. [verkkajulkaisu][viitattu 12.4.2009] Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Transistori>

Wikipedia. 2009b. Opto-isolator [verkkajulkaisu] [viitattu 12.4.2009] Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Opto-isolator>

Koskinen, J. 2004. Mikrotietokonetekniikka. 1. Uudistettu painos, Otava, Helsinki.

Atmega8L datasheet. 2009. [verkkajulkaisu][viitattu 12.4.2009] Saatavissa: [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2486.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2486.pdf)

McManis. 2009. Bibolar junction H-bridges [verkkajulkaisu] [viitattu 3.6.2009] Saatavissa: <http://www.mcmanis.com/chuck/robotics/tutorial/h-bridge/bjt-circuit.html>

Olimex. 2009a. PCB price. [verkkajulkaisu][viitattu 12.4.2009] Saatavissa: <http://www.olimex.com/pcb/index.html>

Olimex. 2009b. PCB FAQ [verkkajulkaisu] [viitattu 12.4.2009] Saatavissa: <http://www.olimex.com/pcb/index.html>

Scienceprog. 2009. More about microcontroller oscillator [verkkajulkaisu] [viitattu 12.4.2009] Saatavissa: <http://www.scienceprog.com/more-about-microcontroller-oscillators>

Farnell. 2009a. ULN2003AD. [verkkojulkaisu][viitattu 12.4.2009] Saatavissa: [http://fi.farnell.com/texas-instruments/uln2003ad/trans-darlington-high-v-i/dp/1651927?\\_requestid=311198](http://fi.farnell.com/texas-instruments/uln2003ad/trans-darlington-high-v-i/dp/1651927?_requestid=311198)

Farnell. 2009b. L6235D. [verkkojulkaisu][viitattu 12.4.2009] Saatavissa: [http://fi.farnell.com/stmicroelectronics/l6235d/dc-motor-driver-three-phase-smd/dp/1271007?\\_requestid=312128](http://fi.farnell.com/stmicroelectronics/l6235d/dc-motor-driver-three-phase-smd/dp/1271007?_requestid=312128)

Farnell. 2009c. Fischer elektronik heat sink. [verkkojulkaisu][viitattu 12.4.2009] Saatavissa: [http://fi.farnell.com/fischer-elektronik/sk-409-25-4-sts/heat-sink-to-220-to-3p-25-4-c-w/dp/4621293?\\_requestid=312643](http://fi.farnell.com/fischer-elektronik/sk-409-25-4-sts/heat-sink-to-220-to-3p-25-4-c-w/dp/4621293?_requestid=312643)

Gilleo, K. 2001. Handbook of Flexible Circuits. Kluwer Academic Publishers.

Fjelstad, J. 2006. Flexible Circuit Technology. [verkkojulkaisu][viitattu 12.4.2009] Saatavissa: <http://www.flexiblecircuittechnology.com/third.php>

Silander, S. 2000. Ohjelmointi Pro Training. 3. painos, Satku, Jyväskylä

## LIITTEET

Liite 1. Ohjainkortti kytkentäkaavio

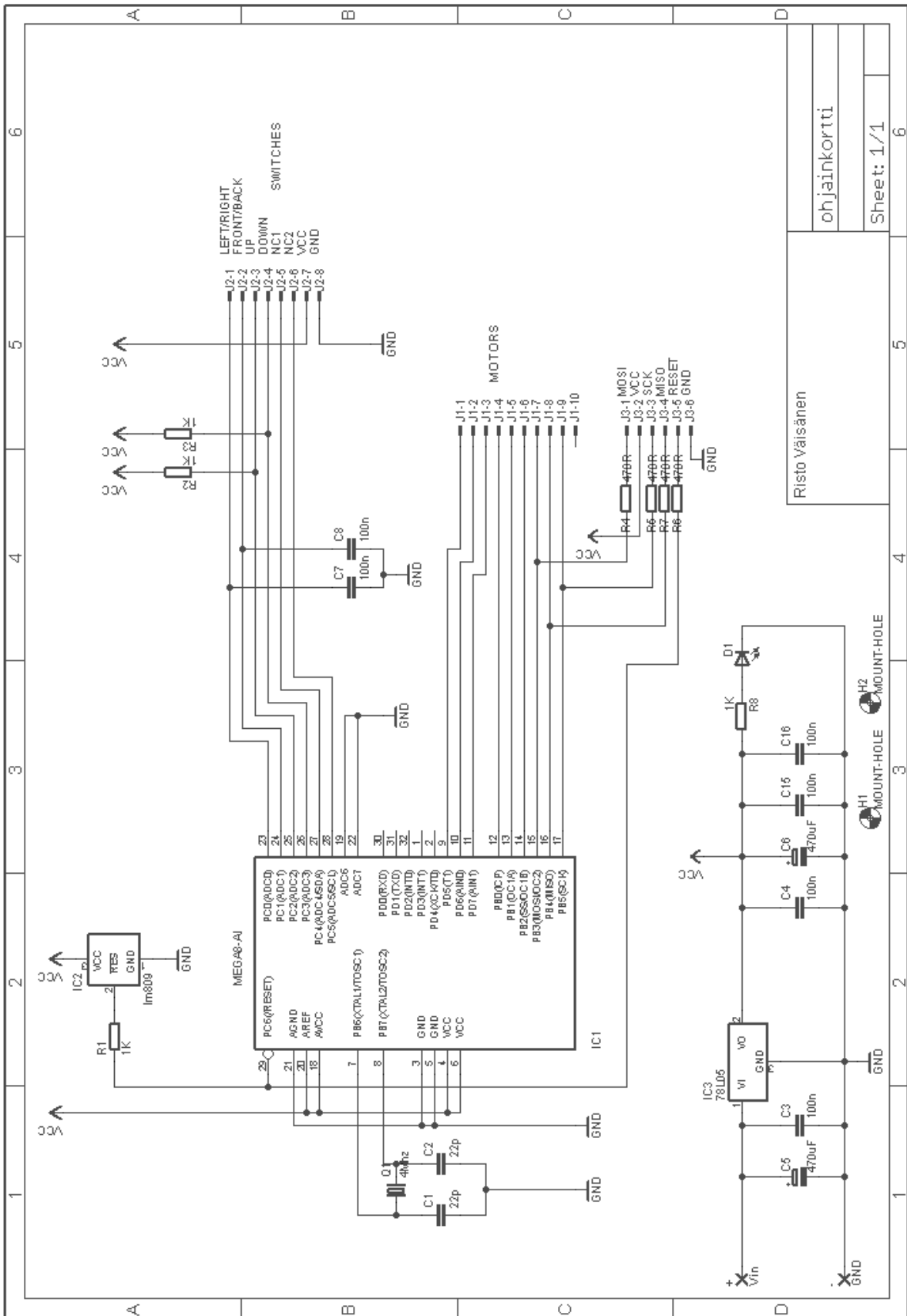
Liite 2. Ohjainkortti layout

Liite 3. H-silta kytkentäkaavio

Liite 4. H-silta layout

Liite 5. Osaluettelo H-sillat

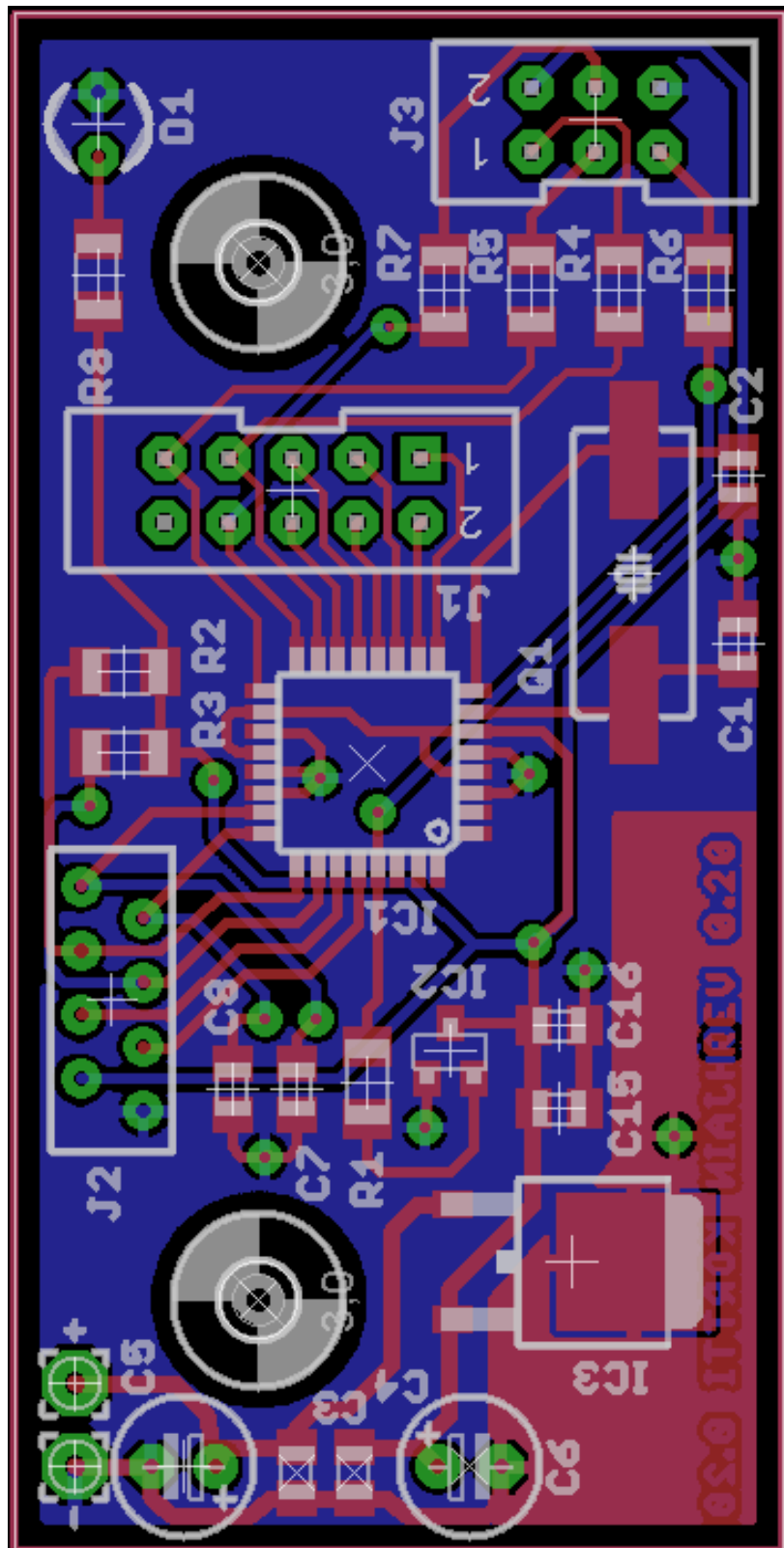
Liite 6. Osaluettelo Ohjainkortti

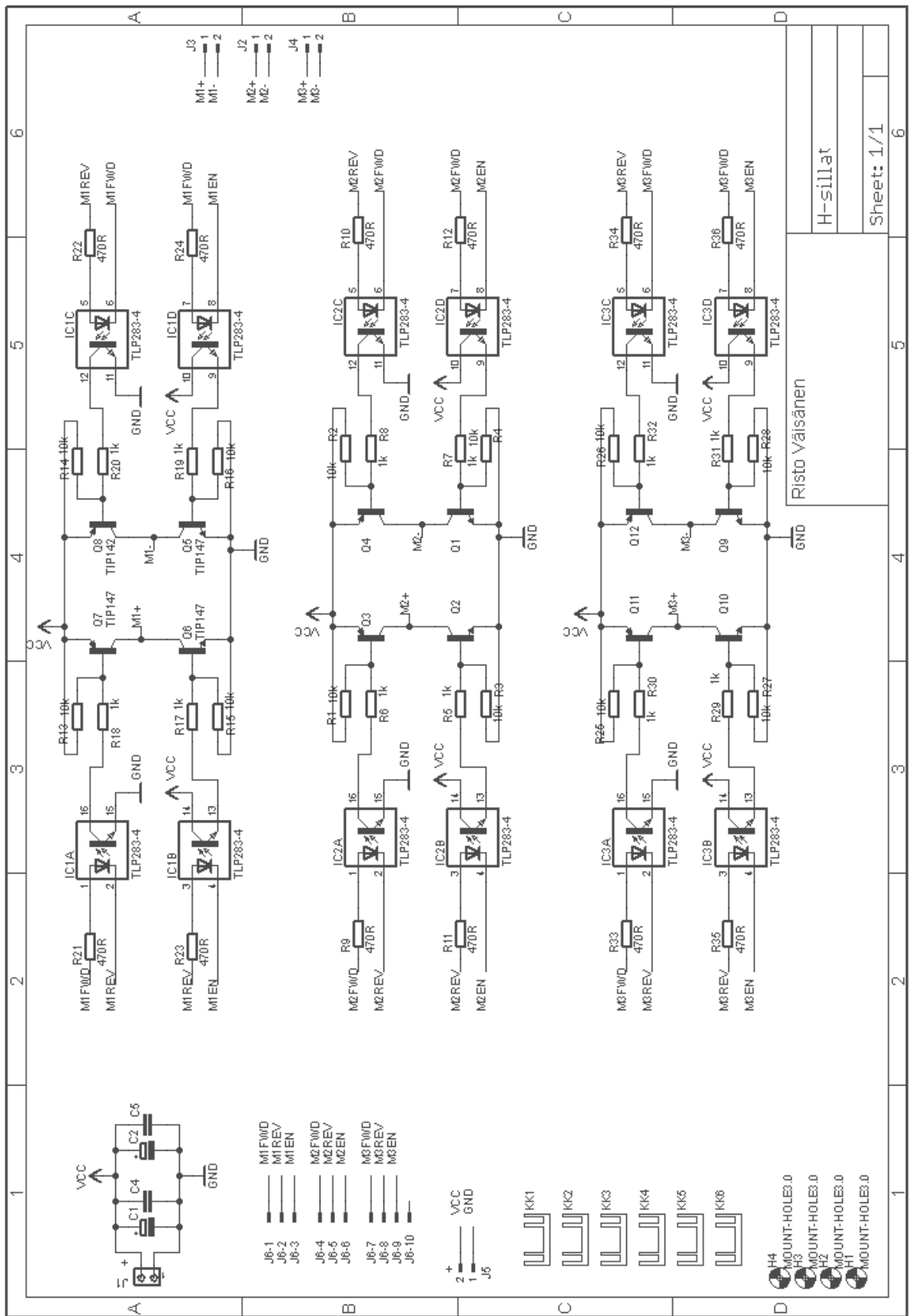


ohjainkortti

Risto Väisänen

Sheet: 1/1

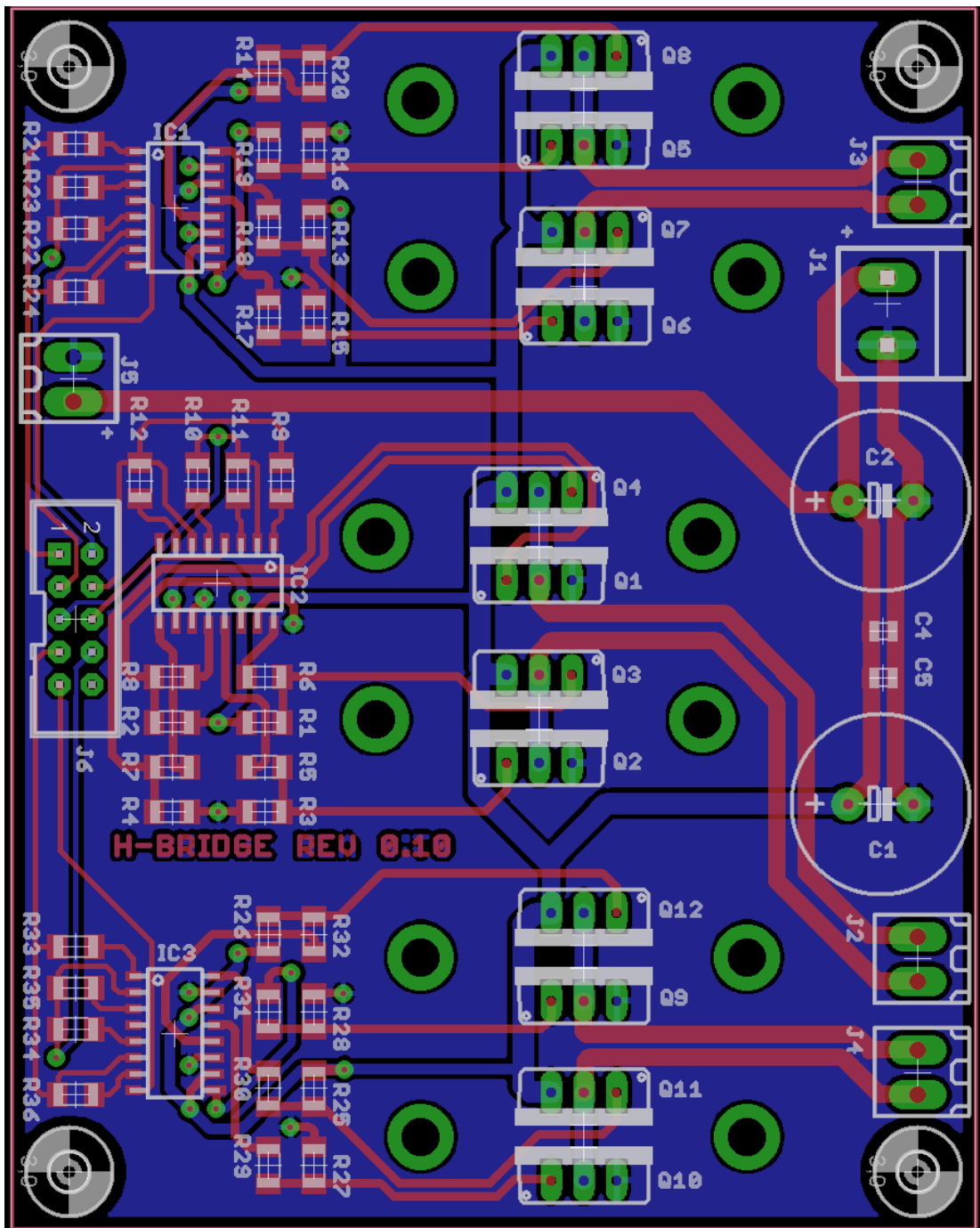




H-sillat  
Sheet: 1/1

Risto Väisänen





Osalista		H-SILTA		Rev 0.1		11.4.09							
Part ID	Qty	Part Name	VALUE	Description	PCB DECAL	Manufacturer	Dealer	Order Code	Price	Total Price			
H1-H6	6	SK 40925,4 STS	4.38V	Heat sink	TO-220/25,4	Fischer Elektronik	Farnell	4621293	2.120	12.720			
IC1-IC3	3	Acpl-247	5V	Opto-Coupler	SOIC-16	Avago technologies	Farnell	1634758	1.710	5.130			
Q1-Q2,Q5-Q6,Q9-Q10, Q3-Q4,Q7-Q8,Q11-Q12	6 6	TIP131 TIP136		NPN BJT Darlington PNP BJT Darlington	TO-220 TO-220	Multicomp Multicomp	Farnell Farnell	9294244 9294554	1.180 1.550	7.080 9.300			
J1	1	Header 1x2	2pin	MKDS	5,08m	Phoenix contact	Farnell	3041529	0.860	0.860			
J2-J5	4	Header 1x2	2pin	MKDS	3,81mm	Phoenix contact	Farnell	3704579	0.930	3.720			
J6	1	Header 2x5	10pin	moottorien liittin	2row	Tyco Electronics	Farnell	3418558	0.000	0.000			
C1-C2	2	CAP	470uF	Electrolytic Capacitor	13mm x 21mm	Multicomp	Farnell	9451439	0.200	0.400			
C4-C5	2	CAP	100N	Ceramic Capacitor	0805	Multicomp	Farnell	9406387	0.090	0.180			
R1-R4,R13-R16,R25-R28	12	RES	10K	Resistor	1206	Multicomp	Farnell	1576643	0.042	0.504			
R5-R8,R17-R20,R29-R32	12	RES	1K	Resistor	1206	Multicomp	Farnell	1576629	0.042	0.504			
R9-R12,R21-R24,R33-R36	12	RES	470R	Resistor	1206	Multicomp	Farnell	1576624	0.042	0.504			
PCB1	1	Printed Circuit Board		2-Layer Printer Circuit Board, 95mm x 75mm			Olimex		15.000	15.000			
									<b>Total:</b>		<b>55.90</b>		

<b>Osalista</b>		<b>OIJAINKORTTI</b>		<b>Rev 0.2</b>		<b>10.4.09</b>				
Part ID	Qty	Part Name	VALUE	Description	PCB DECAL	Manufacturer	Dealer	Order Code	Price	Total Price
IC1	1	ATMEGA8L-8AU	5V	8-Bit Microcontroller	GFP32	Atmel	Farnell	9171525	7.250	7.250
IC2	1	LM809M3-4.00	4V	microprocessor reset circuit	SOT23	National	Farnell	9778632	0.620	0.620
IC3	1	L78M05CDT	5V	positive voltage regulator	DPAK	STMicroelectronics	Farnell	1087116	0.630	0.630
J1	1	Header 2x5	10pin	moottorien liitin	2row	Tyco Electronics	Farnell	3418558	1.380	1.380
J2	1	Micromatch, female	6pin	potikoiden liitin	top entry	Tyco Electronics	Farnell	148519	0.710	0.710
J3	1	Header 2x3	6pin	ohjelmointiliitin	2row	Tyco Electronics	Farnell	3418558	0.000	0.000
J4	1	Header 1x2	2pin	sisääntulo jännite	1row	Tyco Electronics	Farnell	3418558	0.000	0.000
Q1	1	XTAL	3.686MHz	Crystal Oscillator	HC49/4HSMX	IQD	Farnell	9713624	2.000	2.000
D1	1	TLHY4400	Green	Led	3mm	Vishay	Farnell	1652499	0.132	0.132
C1-C2	2	CAP	22p	Ceramic Capacitor	0805	Phycomp	Farnell	1362555	0.036	0.072
C3-C4, C7-C8, C15-C16	6	CAP	100N	Ceramic Capacitor /50V	0805	Multicomp	Farnell	9406387	0.090	0.540
C5-C6	2	CAP	470uF	Electrolytic Capacitor	2.5mmx6mm	Panasonic	Farnell	9693602	0.340	0.680
R1-R3, R8	4	RES	1K	Resistor	1206	Multicomp	Farnell	1576629	0.042	0.168
R4-R7	4	RES	470R	Resistor	1206	Multicomp	Farnell	1576624	0.042	0.168
PCB1	1	Printed Circuit Board		2-Layer Printer Circuit Board, 61 mm x 30.5 mm			Olimex		15.000	15.000
									<b>Total:</b>	<b>29.35</b>