

Esa Mankki

# AURINKOSÄHKÖKANTOSIIPI- KILPAVENEEN ELEKTRONINEN SÄÄTÖJÄRJESTELMÄ

Opinnäytetyö

Insinööri, tietoverkkotekniikka

Joulukuu 2016



**KYAMK**  
University of Applied Sciences

Tekijä	Tutkinto	Aika
Esa Mankki	Insinööri, tietoverkkotekniikka	Joulukuu 2016
<b>Opinnäytetyön nimi</b>		
Aurinkosähkökantosiipikilpaveeneen elektroninen säätöjärjestelmä		40 sivua 13 liitesivua
<b>Toimeksiantaja</b>		
Kymenlaakson Ammattikorkeakoulu Oy		
<b>Ohjaaja</b>		
Yliopettaja Martti Kettunen		
<b>Tiivistelmä</b>		
<p>Kymenlaakson Ammattikorkeakoulun venetekniikan koulutusohjelmassa on kehitetty aurinkoenergialla toimivia veneitä tarkoituksena oppimisen lisäksi osallistua kansainväliseen aurinkoveneiden kilpailuun Hollannissa. Tällä kertaa vuorossa oli Midnight Sun Finland 2, kantosiipitrimaraani.</p>		
<p>Veneeseen oli suunniteltu tehtäväksi kantosiipiä säätävä elektroninen vakautusjärjestelmä. Järjestelmän ytimeksi oli valittu Arduino MEGA 2560 -mikrokontrollerikortti, jolla ohjattaisiin kantosiipien siivekkeiden kulmia pienoismallikäyttöön tarkoitettujen servomootoreiden välityksellä sekä moottorin kierroslukua ja suuntaa. Tämän työn tarkoituksena oli tarvittavien sähköisten kytkentöjen suunnittelu, toteutus sekä dokumentointi. Mikrokontrollerin ohjelmointi jäi työn ulkopuolelle peliohjelmoinnin opiskelijoiden tehtäväksi.</p>		
<p>Järjestelmän toimintatapa oli jo valmiiksi suunniteltu, tosin hieman puutteellisesti, joten toteutus oli varsin suoraviivaista. Ensin suunniteltiin ja toteutettiin prototyyppi, jota käytettiin aluksi ohjelmointiharjoituksiin ja sittemmin itsensä veneen osana kantosiipijärjestelmän testauksessa ja kehityksessä. Toisessa vaiheessa kehitettiin paremmin veneeseen soveltuva, modulaarinen ja helposti laajennettava kokonaisuus. Järjestelmä koottiin mahdollisimman suurelta osin valmiista moduuleista, jotta se olisi tarvittaessa myös helposti monistettavissa. Viimeinen vaihe oli järjestelmän tarkka dokumentointi sen ylläpitoa ja jatkokehitystä varten.</p>		
<p>Tuloksena oli hyvin toimiva järjestelmä, jota ei valmiina olleissa alustavissa suunnitelmissa olleen virheen ja lähestyvän kilpailun vuoksi ehditty kuitenkaan ajoissa ohjelmoida suoriutumaan tehtävästään riittävän hyvin. Sähköisesti järjestelmä oli silti täysin toimiva, joten matkan varrella sattuneesta vesivahingosta huolimatta tuloksen voidaan katsoa olevan hyvä pohja jatkokehitykselle.</p>		
<b>Asiasanat</b>		
dokumentointi, elektroniikka, veneenrakennus, aurinkoenergia, kaaviot		

Author	Degree	Time
Esa Mankki	Bachelor of Engineering, Networking Technology	December 2016
<b>Thesis Title</b>		40 pages
An Electronic Control System for a Solar Powered Hydrofoil Race Boat		13 pages of appendices
<b>Commissioned by</b>		
Kymenlaakso University of Applied Sciences		
<b>Supervisor</b>		
Martti Kettunen, Principal Lecturer		
<b>Abstract</b>		
<p>The Kymenlaakso University of Applied Sciences Boat Technology Program has been developing solar powered boats for, in addition to learning, participating in an international competition for solar boats in Holland. This time it was the turn of the Midnight Sun 2, a hydrofoil trimaran.</p>		
<p>The boat was planned to have an electronic stabilization system controlling the hydrofoils. An Arduino MEGA 2560 microcontroller card was selected as the core of the system. It would control the aileron angles in the foils via RC servo motors and the motor speed and direction. The objective of the thesis was to design, implement and document the needed electrical and electronic circuits. Programming the microcontroller was outside of the scope of the thesis, to be done by the students of Game Programming.</p>		
<p>The mode of operation, albeit a little lacking, had been designed in advance, so the implementation was quite straightforward. First, a prototype was designed and implemented. It was used for programming exercises and later as a part of the boat for testing and development of the hydrofoil system. The second stage was developing a system that was better suited for marine environment, modular and readily extensible. It was assembled as far as possible using ready-made modules, so that it could be easily duplicated as needed. The final stage was documenting the system accurately for maintenance and development purposes.</p>		
<p>The result was a well-functioning system, which, because of a flaw in the preliminary plans and the forthcoming competition, could not be programmed to perform its task adequately on time. Nevertheless, electrically the system was perfectly functional, so notwithstanding a water damage along the way, the outcome can be considered to be a good basis for further development.</p>		
<b>Keywords</b>		
documentation, electronics, boat building, solar energy, schematics		

# SISÄLLYS

## LYHENTEET JA TERMIT

1	JOHDANTO .....	9
1.1.1	Veneen sähköjärjestelmä .....	9
1.1.2	Säätöjärjestelmän tarkoitus ja ongelmat .....	10
1.1.3	Työn rajaus .....	10
2	TOTEUTUS .....	11
2.1	Toimintaperiaate .....	11
2.2	Laitteistoalusta .....	12
2.2.1	Arduinosta yleisesti .....	12
2.2.2	Arduino MEGA 2560 .....	13
2.2.3	Ultraäänianturit .....	14
2.2.4	Kiihtyvyyssanturi .....	16
2.2.5	Näyttö .....	16
2.2.6	Servomoottorit .....	17
2.2.7	ESC-laite .....	18
2.3	Prototyyppi .....	18
2.3.1	Osat ja kytkennät .....	19
2.3.2	Asennus .....	22
2.3.3	Testaus .....	24
2.4	Lopullinen versio .....	26
2.4.1	Keskusyksikkö .....	26
2.4.2	Näyttö- ja säätöyksikkö .....	29
2.4.3	Johdotus .....	32
2.4.4	Testaus .....	32
3	LOPPUTULOS .....	32
3.1	Kilpailu .....	33
3.2	Kehitysmahdollisuuksia .....	34
3.2.1	Suojaus .....	34

3.2.2	Energianmittaus ja nopeussäätö .....	34
3.2.3	Tiedonkeruu .....	35
3.2.4	Telemetry .....	35
3.2.5	Aurinkokennojen viilennysjärjestelmä .....	36
3.3	Projekti.....	36
3.3.1	Projektin johto .....	36
3.3.2	Kommunikaatio .....	36
3.3.3	Aikataulu .....	37
3.3.4	Motivaatio.....	37
3.4	Päätelmiä.....	37
LÄHTEET	.....	39

## LIITTEET

- Liite 1. Pääsähkökaavio (Terho Halme 2014)
- Liite 2. Prototyypin piirikaavio
- Liite 3. Nykyisen version piirikaavio
- Liite 4. Keskusyksikön sisäinen johdotuskaavio
- Liite 5. Näyttöyksikön kytkentä- ja johdotuskaavio
- Liite 6. Säätojärjestelmän sähkönsyötön ja moottorinsäätimen ohjauksen johdotuskaaviot
- Liite 7. Ohjauspyörän johdotuskaavio
- Liite 8. Kantosiipien säätöperiaate (Terho Halme 2014)
- Liite 9. Säätojärjestelmän yksinkertaistettu kaavio (Terho Halme 2014)
- Liite 10. Osasijoittelukaavio (Terho Halme 2014)
- Liite 11. Arduino MEGA 2560 piirikaavio (Arduino-verkkosivusto)
- Liite 12. IMU kytkentäkaavio (Tuntematon)

## LYHENTEET JA TERMIT

### ASCII

American Standard Code for Information Interchange. 7-bittinen merkistö, joka sisältää numerot ja englanninkielessä käytettävät aakkoset sekä joitakin ohjaus- ja erikoismerkkejä. Pohjana monille merkistöille, mutta vain 128 merkin laajuinen, joten ei sisällä kansallisia erikoismerkkejä.

### BEC

Battery Eliminator Circuit. KytKentä, jolla poistetaan pariston tai akun tarve muuttamalla muualta saatava, yleensä korkeampi, jännite käytettävälle laitteelle sopivaksi. Syöttö yleensä tasasähköllä, jolloin kyseessä on käytännössä DC/DC-muunnin.

### BMS

Battery Management System. Laite, joka pitää huolta siitä, ettei akustoa voida ylliladata, purkaa liian tyhjäksi, eikä kuormittaa liian suurella virralla. Se estää myös akuston ylikuumentumisen. Litiumakkuja käytettäessä pakollinen, sillä ylliladattaessa ne voivat syttyä palamaan ja räjähtää. Tyhjäksi purkaminen taas vaurioittaa niitä peruuttamattomasti.

### Breakout Board

Piirilevy, joka mahdollistaa mekaanisesti helpon tavan kytkeytyä siihen yleensä valmiiksi kiinnitetyn mikropiirin liitännästoisiin. Tällainen levy on usein tarpeen, mikäli käytettävissä ei ole sopivia työkaluja tai ei haluta tehdä piirilevyä pienille pintaliitoskomponenteille. Levyllä on joko juotospisteet tai liittimet, jotka on sijoitettu useimmiten levyn reunoille.

### DC/DC-muunnin

Muunnin, jolla joko nostetaan tai lasketaan tasajännitettä. Yleensä hakkuritekniikalla toteutettu.

### ESC

Electronic Speed Controller. Laite, jolla säädetään sähkömoottorin nopeutta ja suuntaa. Käytetään erityisesti pienoismallirakentamisessa ohjaamaan hiiliharjattomia moottoreita, joille se luo akulta tulevasta tasasähköstä kolmivaihesähköä. Sisältää usein myös BEC:in.

## IMU

Inertial Measurement Unit. Laite, jolla mitataan kappaleen asentoa ja kiertymistä, usein myös sitä ympäröivää magneettikenttää. Koostuu kiihtyvyyssantureista, gyroskoopeista ja kompassista.

## I<sup>2</sup>C

Inter-Integrated Circuit Communication. Philips Semiconductorin (nyk. NXP Semiconductors N.V.) 80-luvulla kehittämä sarjaväylä. Käytetään pääasiassa mikropiirien liittämiseen toisiinsa piirilevyllä. Käyttää kahta kaksisuuntaista johdinta: SDA (Serial Data) ja SCL (Serial Clock).

## I/O

Input/Output. Tiedon tai signaalin siirtäminen johonkin laitteiston osaan sisään tai siitä ulos. Mikrokontrollerien liitännöistä puhuttaessa I/O-linjat ovat joko yksisuuntaisia, jolloin kyseinen liitäntä kykenee siirtämään tietoa vain toiseen suuntaan, tai kaksisuuntaisia, jolloin liitännän rooli tulona tai lähtönä valitaan ohjelmallisesti.

## MPPT

Maximum Power Point Tracking. Tekniikka, jolla aurinkosähkökennosta pyritään saamaan suurin mahdollinen teho kuormittamalla sitä juuri sillä kuormalalla, jolla siitä ulos tulevan jännitteen ja virran tulo on suurimmillaan.

## PWM

Pulse Width Modulation, suom. pulssinleveysmodulaatio. Tekniikka, jolla pulssinleveyttä ts. pulssisuhdetta muuttamalla saadaan muutettua esimerkiksi keskimääräistä jännitettä ja siten tehoa. Pulssisuhteella tarkoitetaan pulssin pituuden suhdetta jaksonaikaan.

## SPI

Serial Peripheral Interface. Motorolan kehittämä sarjaväylä mikropiirien liittämiseen toisiinsa varsinkin sulautetuissa järjestelmissä. Käyttää neljää yksisuuntaista johdinta: SCLK (Serial Clock), MOSI (Master Out, Slave In), MISO (Master In, Slave Out), SS (Slave Select).

## TTL

Transistor-Transistor Logic. Bipolaaritransistoreilla toteutettuja logiikkapiirejä, jotka olivat hyvin yleisesti käytössä ennen 2000-lukua. TTL-tasoisella tarkoitetaan, että loogista nollaa kuvaa jännite 0–0,8 V ja loogista ykköstä 2 V–V<sub>CC</sub>

(syöttöjännite), joka on yleensä 5 V. Välillä 0,8–2 V tila on määrittelemätön ja voidaan tulkita kummaksi tahansa.

## TWI

Two Wire Interface. Atmelin käyttämä I<sup>2</sup>C-yhteensopiva väylä.

## UART

Universal Asynchronous Receiver Transmitter. Mikropiiri, joka käsittelee sarjamuotoisen tiedon siirtoa, pitäen huolen tiedonsiirtonopeudesta, synkronoinnista ja mahdollisesti tiedon puskuroinnista. Muuttaa sarjamuotoisen tiedon rinnakkaismuotoon ja päinvastoin. Sisältyy useimpiin mikrokontrollereihin. Vapauttaa prosessorin muihin tehtäviin valvomasta sarjaliitännän tilaa.



## 1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa elektroninen säätö- ja ohjausjärjestelmä aurinkoenergialla toimivaan kantosiipiveneeseen, Midnight Sun Finland 2:een. Veneen käyttötarkoitus oli osallistua Hollannissa pidettävään kansainväliseen aurinkoveneiden nopeus- ja kestävyyskilpailuun DONG Energy Solar Challengeen. Vene on Kymenlaakson ammattikorkeakoulun venetekniikan koulutusohjelman opiskelijoiden työn tulos, mutta koska elektroniikka ei kuulu venetekniikan piiriin, jäi työtä myös muiden tehtäväksi.

Aihe työhön löytyi laboratorioinsinööri Tomi Pahulan kerrottua venetekniikan osastolla meneillään olevasta mielenkiintoisesta projektista, jossa olisi tarvetta jollekulle, joka olisi kiinnostunut elektroniikasta, sulautetuista järjestelmistä ja tiedonsiirtotekniikasta. Keskustelu opettaja Terho Halmeen ja kehitysinsinööri Mikko Pitkäahon kanssa samalla veneen edelliseen versioon tutustuen johti siihen, että huomasin työn aiheen löytyneen.

Olen ollut useita vuosia läheisesti tekemisissä auto- ja vene-elektroniikan kanssa sekä korjatessani että suunnitellessani sitä. Olen myös lukemattomia kertoja nähnyt, mitä kostea ja suolainen ympäristö aiheuttaa huonosti suunnitelluille laitteille. Näin voitaisiin sanoa, että minulla oli jo aloittaessani melko paljon näkemystä sopivasta toteutustavasta.

### 1.1.1 Veneen sähköjärjestelmä

Tämän työn ulkopuolelle jäi veneen aurinkosähkölaitteisto, akut, lataussäätimet, moottori ja niiden välinen pääsähköjärjestelmä. Koska säätöjärjestelmää ei olisi ilman muuta sähköjärjestelmää, on kuitenkin aiheellista kertoa siitäkin pääpiirteittäin. Liitteenä 1 on veneen päävirtapiirikaavio. Kaavion on piirtänyt ja myös järjestelmän suunnitellut ja suurelta osin myös koennut opettaja Terho Halme.

Järjestelmä on kytkennältään varsin yksinkertainen. Veneen kansi on miltei kokonaan peitetty aurinkosähköpaneeleilla, jotka on kytketty MPPT-säätimiin, jotka puolestaan syöttävät kerätyn energian BMS-laitteiden kautta akustoon ja ESC-laitteen kautta moottorille. Lisäksi on pääkytkin, kuolleenmiehenkytkin, akuston jäähdytinpuhallin ja pilssipumppu. Tässä työssä käsitelty säätöjärjes-

telmä on liitetty päävirtapiiriin kahdella tavalla. Se ottaa siltä käyttämänsä sähkön ja ohjaa moottorin kierroslukua ESC-laitteen välityksellä.

### 1.1.2 Säättöjärjestelmän tarkoitus ja ongelmat

Säättöjärjestelmän tarkoitus on säätää kantosiipiveneen kantosiipien kulmia ja moottorin tehoa aktiivisesti siten, että vene voi nousta kantosiipiensä varaan ja pysyä niiden varassa vakaasti, siihen vaikuttavien voimien muuttuessa jatkuvasti. Osaan voimista pystytään itse vaikuttamaan, osaan taas pitää pelkääntään sopeutua. Ennalta arvaamattomia voimia ovat tuulen ja aallokon aiheuttamat voimat. Ohjausliikkeiden ja nopeuden muutosten aiheuttamat voimat ovat omassa hallinnassa, mutta aiheuttavat yhtä lailla säätötarvetta. Myös ohjaajan liikkeiden aiheuttamat painojakauman pienet muutokset täytyy kompensoida.

Yksi tärkeimmistä ratkaistavista ongelmista oli veden pinnan korkeuden, toisinaan veneen etäisyyden vedestä, mittaus riittävällä tarkkuudella ja nopeudella veneen ollessa lentotilassa eli kantosiipiensä varassa. Toinen, aluksi helpoksi kuviteltu, haaste oli veneen liikkeiden ja asennon mittaaminen. Molempia mittauksia varten löytyi valmiita antureita. Vaikeimmaksi kuitenkin osoittautui näiden tietojen yhdistäminen ohjelmallisesti siten, että veneen pysyminen lentotilassa olisi ollut mahdollista.

### 1.1.3 Työn rajaus

Oma osuuteni säättöjärjestelmästä oli itse ohjauselektronikan suunnittelu ja kokoaminen valmiiksi hankituista komponenteista toimivaksi kokonaisuudeksi ja työn edetessä myös osien hankinta, ohjelmoinnin jäädessä muiden tehtäväksi. Laiteläheistä ohjelmointia osaavien tekijöiden puutteen vuoksi opetin myös sulautettujen järjestelmien toimintaperiaatteita ohjelmoijille.

Tärkeä osa työtä oli myös järjestelmän tekninen dokumentointi sellaisessa laajuudessa, että mahdollisen jatkekehitystyön tekijän on mahdollista jatkaa siitä, mihin tämän projektin puitteissa päädyttiin. Tämä dokumentaatio sisältää sekä piirikaaviot että johdotuskaaviot, ja se löytyy liitteistä 2-7.

Itse vene sijaitsi Mussalossa, Kymenlaakson Ammattikorkeakoulun vene- ja komposiittilaboratoriossa, jossa veneeseen tehtävät kytkennät ja asennukset

suoritettiin. Veneeseen kytkettävät kokonaisuudet kuitenkin koottiin siellä, missä käytettävissä oli sekä paremmat ja tutummat työkalut että antistaattinen ympäristö – kotona omassa työhuoneessani.

## 2 TOTEUTUS

### 2.1 Toimintaperiaate

Kantosiipien säätöperiaatetta on kuvattu liitteenä 8 olevassa Terho Halmeen piirtämässä kaaviossa Hydrofoil Control. Tavoitteena on pitää veneen keula kantosiiven kohdalta korkeudella, jolla korkeusanturi on 550 mm:n päässä vedenpinnasta ja pituussuuntainen kallistuskulma  $-2^{\circ}$ – $2^{\circ}$ .

Säädön ensimmäinen vaihe on keulan korkeussäätö, joka toteutetaan integroivalla säädöllä käyttäen ultraääniantureita mittaamaan keulan korkeutta vedenpinnasta. Integroivan säädön tarkoituksena on olla välittämättä mitta-arvon nopeista muutoksista, joita aallokko aiheuttaa. Säätöön vaikuttavana arvona on siis integrointiajan keskiarvo. Itse säätö tapahtuu kääntämällä kantosiiven takareunassa olevaa siivekettä servomootorilla.

Säädön toisessa vaiheessa veneen asentotieto, eli pituus- ja leveysuuntaiset kallistukset mitataan keskusyksikön sisällä olevalla anturilla. Myös takakantosiivessä on servomootoreilla käännettävät siivekkeet, sivusuuntaisen kallistuksen säätämiseksi molemmilla puolilla omansa. Kallistussäätö on suhteellinen, eli se reagoi mitattuun tietoon heti ilman viivettä. Sivusuuntaista kallistusta korjattaessa takasiivekkeitä ohjataan vastakkaisiin suuntiin, pituussuuntaista korjattaessa taas samaan suuntaan.

Pituussuuntainen kallistus vaikuttaa myös etusiivekkeeseen, jota käännetään vastakkaiseen suuntaan kuin takasiivekkeitä. Tämä nopeuttaa veneen oikaisemista. Mikäli tästä on tuloksena korkeuden muutos, kumoaa integroiva korkeussäätö hetken päästä kallistussäädön vaikutuksen etusiivekkeeseen, mikä puolestaan aiheuttaa kallistuksen lisääntymisen ja siten takasiivekkeiden säätymisen jyrkempään kulmaan.

Säätö on siis reaktiivinen. Mitään ei ennakoida, vaan sopeudutaan tilanteeseen jatkuvasti. Säätöparametreja muuttamalla pyritään saamaan säätö väärhtelemättömäksi ja siten veneen kulku vakaaksi.

Kuljettaja voi ohjata järjestelmän toimintaa ohjauspyörässä olevilla kahdella kolmiasentoisella kytkimellä ja potentiometrillä. Toisella kytkimistä valitaan suunta: eteen, seis tai taakse ja toisella kantosiipien toimintatila: lento, uppouma tai jarrutus. Potentiometrillä säädetään potkurin kierrosnopeutta.

Terho Halmeen piirtämä säätöjärjestelmän yksinkertaistettu kaavio on nähtävissä liitteessä 9 ja osasijoittelukaavio liitteessä 10.

## 2.2 Laitteistoalusta

Tässä luvussa käsitellään vain ennen työn aloittamista valmiiksi hankittuja keskeisiä komponentteja, joiden ympärille koko järjestelmä koottiin. Työn edetessä hankkimiani lisäosia käsitellään myöhemmissä kappaleissa.

### 2.2.1 Arduinosta yleisesti

Arduino koostuu sekä avoimeen laitteistoon että avoimeen lähdekoodiin perustuvista mikrokontrollerikorteista muodostuvasta laitteistoalustasta ja niiden ohjelmointiympäristöstä. Se on ollut käytössä elektroniikkaharrastajien, opiskelijoiden ja ammattilaistenkin keskuudessa jo vuosia. Alun perin se oli kehitetty oppilaskäyttöön helpoksi tavaksi tutustua mikrokontrollerien käyttöön ja ohjelmointiin. Edullisen hintansa, helpon ohjelmitavuutensa ja kaikin puolin avoimen arkkitehtuurinsa vuoksi se on kuitenkin löytänyt tiensä miltei kaikkialle. Sillä on toteutettu erilaisia mittalaitteita, robotteja, soittimia ja kaikenlaista muuta, mihin mikrokontrolleri soveltuu.

Arduino-korttien ytimenä on Atmel Corporationin AVR-mikrokontrolleri, useimmiten MegaAVR-sarjalainen. Arduino kortin ero pelkkään mikrokontrolleripiiriin on se, että välttämättömät oheiskomponentit ovat valmiina ja ohjelmointi tapahtuu joko USB- tai sarjaliitännän kautta, jolloin erillinen ohjelmointilaitte ei ole välttämättä tarpeen. Myös kaikki mikrokontrollerin liitännät on tuotu piirikortin reunoille, useimmiten holkkiliittimiin, jolloin kytkennät voi tehdä jopa ilman juottamista. Tämä kaikki yhdessä ilmaisen ohjelmointiympäristön ja internetistä löytyvän liki loputtoman ohjeiden määrän kanssa tekee Arduinosta erittäin helposti lähestyttävän ympäristön mikrokontrollereihin tutustumiseen.

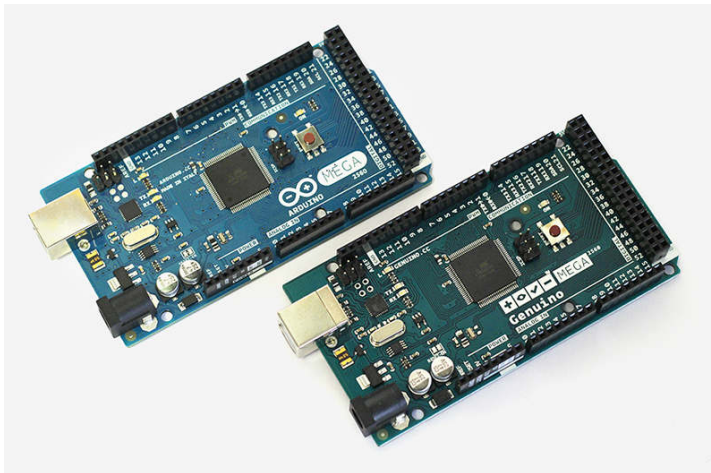
Arduinon ohjelmointikieli pohjautuu C-kieleen. Oikeammin se on C-kieltä, jonka syntaksivaatimukset ovat normaalia C-kieltä jonkin verran löysemmät ja si-

ten aloittelevalla ohjelmoijalla helpommat. Tämä saadaan aikaan siten, että ennen koodin käännöstä Arduinon ohjelmointiympäristö lisää koodiin puuttuvat elementit, kuten funktioiden alustukset, joita ohjelmoijan ei siis tarvitse ohjelmaan kirjoittaa. Näiden lisäysten jälkeen automaattisesti muutettu ohjelma-koodi käännetään standardin mukaista C- ja C++ -kieltä kääntävälle kääntäjäl-le. Osaava ohjelmoija voi myös sivuuttaa Arduino-ympäristön tarjoamat help-pokäyttöiset funktiot ja kirjoittaa koodin standardilla AVR C- tai C++ -kielellä.

Jossain vaiheessa kehittäjiensä erimielisyyksien vuoksi Arduino tuotenimi jäi vain Yhdysvalloissa myytävien korttien nimeksi ja Yhdysvaltojen ulkopuolella nimi on nykyisin Genuino. Ohjelmointiympäristön nimi on kuitenkin kaikkialla Arduino ja tässä työssä käytettyjen osien hankkimisen aikaan myös korttien nimi oli Arduino, joten jäljempänä käytetään yksinomaan Arduino-nimeä.

### 2.2.2 Arduino MEGA 2560

Järjestelmän pohjaksi oli jo ennen työn aloittamista valittu Terho Halmeen toimesta Arduino MEGA 2560 -mikrokontrollerikortti (Kuva 1). Kortti on Ardui-no-mikrokontrollerikorteista tehokkain ja liitettävyydeltään paras 8 bittiseen mikrokontrolleriin perustuva kortti.



Kuva 1. Arduino MEGA 2560 ja Genuino MEGA 2560 -kortit (Arduino verkkosivusto)

Kortilla on ATmega2560-mikrokontrolleri, josta on käytettävissä 54 digitaalista I/O:ta, 16 analogista tuloa, 4 UART:ia, 256 kilotavua Flash-muistia ja suuri määrä muita ominaisuuksia, joista tässä työssä hyödynnettiin vain pieni osa.

Liitäntöjensä määrän puolesta kortti on riittävä, mutta laskentateholtaan se on melko vaatimaton ja rajoittaa reaaliajassa suoritettavien laskutoimitusten mää-

rää ja monimutkaisuutta. Veneen tasapainossa pitämiseen teoriassa tarvittavien laskukaavojen täydelliseen ratkaisemiseen useita kertoja sekunnissa tehoa ei ole riittävästi. Yksinkertaistettuja, riittävän tarkkoja likiarvoja tuottavia funktioita se pystyy kuitenkin suorittamaan riittävän tehokkaasti ja aikaa jää vielä muuhunkin. Mikrokontrolleriksi ATmega2560 on kyllä varsin tehokas ja konekielellä tai symbolisella konekielellä ohjelmoitaessa koodin tehokkuus toki paranisi, mutta silloin menetettäisiin Arduinon ohjelmointiympäristön helppous. Koska Atmelin AVR-mikrokontrollerit ovat suunniteltuja suorittamaan tehokkaasti korkeamman tason kielillä, varsinkin C:llä, kirjoitetusta koodista käännettyä konekieltä, ei monin verroin vaikeammasta ohjelmointityöstä olisi riittävästi hyötyä, jotta käytettävä lisätyöaika olisi perusteltua.

Liitteenä 11 on Arduino MEGA 2560 -kortin piirikaavio. Kaavio on melko sekavasti piirretty, mutta avoimen laitteiston ollessa kyseessä ei piirtäjä todennäköisesti ole saanut työstään myöskään palkkaa, joten pieni sekavuus lienee suvaittavissa. Kaaviosta nähdään, miten suurin osa mikrokontrollerin liitännöistä on kytketty suoraan kortin reunoilla oleviin liittimiin. Näin koko kortti on itse asiassa lähes pelkkä Breakout Board ATmega2560-mikrokontrolleria varten.

Piirikaaviossa näkyvä toinen mikrokontrolleri, ATmega16U2, on USB ohjelmointia varten. Haluttaessa ohjelmoida kortti uudelleen, hoitaa tämä mikrokontrolleri liikenteen tietokoneen ja ATmega2560-mikrokontrollerin välillä. Tätä tiedonsiirtotapaa voidaan käyttää myös ohjelman virheiden etsimisessä tai jos Arduinon on tarkoitus kommunikoida muuten tietokoneen kanssa.

### 2.2.3 Ultraäänianturit

Vedenpinnankorkeuden, tai oikeammin veneen syväyksen ja kantosiiven varassa ollessa lentokorkeuden mittaamiseen käytettiin kuvan 2 kaltaisia ultraääniantureita.



Kuva 2. HRXL-MaxSonar-WRM -ultraäänianturi (Maxbotix verkkosivusto)

Tavanomaisista ultraääniantureista, jotka ilmoittavat etäisyyden lähimpään havaitsemaansa kohteeseen, poiketen käytetty anturimalli (MB7389) sisältää suodattimen, joka jättää pienemmät kohteet ja häiriöt huomiotta, ja ilmoittaa etäisyyden kohteeseen, josta se saa suurimman akustisen palautteen. Se on suunniteltu erityisesti vedenpinnankorkeuden mittaamiseen säiliöissä, joten se soveltuu hyvin myös tähän käyttötarkoitukseen. (MaxBotix HRXL Datasheet 2012, 4.)

Anturin resoluutio on 1 mm, eli se ilmoittaa etäisyyden vedenpintaan 1 mm:n tarkkuudella ja se kykenee mittaamaan etäisyyksiä 30 cm:n ja 5 m:n väliltä.

Etäisyyssiedon anturi lähettää kolmella eri tavalla:

- Pulssinleveystietona, jolloin jokainen millimetri etäisyydessä lisää pulssinleveyttä yhdellä mikrosekunnilla.
- Analogisena jännitetietona, jolloin jokainen millimetri lisää lähtöjännitteeseen yhden 5120:s osan syöttöjännitteestä. Lähtösignaali skaalautuu siis suhteessa syöttöjännitteeseen.
- Sarjamuotoisena, jolloin etäisyysarvo millimetreissä ilmoitetaan numeroina neljällä ASCII-merkillä. Sarjaliikennelähtö on TTL-tasoinen.

(MaxBotix HRXL Datasheet 2012, 1–4.)

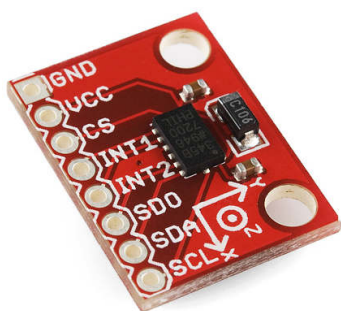
Sarjamuotoinen data on sekä tarkin, että yksinkertaisin käyttää, joten se oli selkeästi paras vaihtoehto, ja valittiin siksi käyttöön. Sarjamuotoisen siirron haittapuolena on usein pitkäkök vasteaika, joka ei kuitenkaan tässä sovelluksessa ole kriittinen ja tiedonsiirron hitautta paljon merkitsevempi viive johtuu anturin toimintatavasta.

Anturin näyteenottotaajuus onkin sen toimintaperiaatteen ja käytetyn suodatuksen vuoksi vain 6,67 Hz (MaxBotix HRXL Datasheet 2012, 8.) Tämä on

ongelmallista, sillä liian harvoin saatavat mittaustulokset aiheuttavat säätöön helposti värähtelyä.

#### 2.2.4 Kiihtyvyyssanturi

Kiihtyvyyssanturiksi oli hankittu kuvan 3 mukainen SparkFun Electronicsin ADXL345 Breakout, joka on Analog Devicesin ADXL345-piirin sisältävä Breakout Board. Piiri on 3-akselinen, eli se mittaa kiihtyvyyttä pysty-, sivu- ja pitkitäissuunnissa.



Kuva 3. ADXL345 Breakout (SparkFun verkkosivusto)

ADXL345 pystyy liikennöimään sekä SPI että I<sup>2</sup>C väylän kautta. Sillä on myös kaksi ohjelmoitavaa keskeytyslinjaa, jotka voi ohjelmoida antamaan keskeytyksen haluamansa tapahtuman tapahduttua. Pelkän mittaamisen lisäksi se kykenee havaitsemaan napautuksen, kaksoisnapautuksen, liikkeellä- tai paikallaanolon sekä vapaapudotuksen. Näistä lisäominaisuuksista ei ole veneessä hyötyä, mutta anturin suuresta herkkydestä, 4 mg / bitti, on paljon hyötyä veneen asennon mittaamisessa. Myöskään keskeytyksistä ei ole hyötyä, sillä anturia luetaan joka tapauksessa koko ajan. (Analog Devices ADXL345 Datasheet 2016, 1, 6).

#### 2.2.5 Näyttö

Näytöksi oli valittu SparkFun Electronicsin myymä mustavihreä 20 merkkiä riviä kohden näyttävä nelirivinen merkkipistematriisi-LCD-moduuli. Se näkyy kuvan 6 oikeassa laidassa. Moduuli perustuu Hitachi HD44780-ohjaimen, joka on erittäin yleisesti käytetty rinnakkaisliitännäinen pistematriisi-LCD-ohjain. Arduinin kanssa käytettäväksi näyttö on erittäin helppokäyttöinen, sillä HD44780-piiriä varten löytyy valmiita koodikirjastoja. Näyttö tarvitsee korkeintaan 11 I/O-linjaa (8 datalinjaa, Register Select, Read/Write ja Enable), syöttö-



jännitteet ja kontrastinsäädön. Tämä on melko paljon, mutta ohjain pystyy myös nelibittiseen tiedonsiirtoon, jolloin tarvittavien I/O-linjojen määrä putoaa 7:ään. Näytöllä pystyy näyttämään myös itse määriteltäviä merkkejä, mutta grafiikkaa se ei pysty näyttämään.

## 2.2.6 Servomootorit

Kantosiipien siivekkeiden kulmaa säädetään pienoismallikäyttöön tarkoitetuilla servomootoreilla (kuva 4). Moottoreiden vääntömomentti on kyseiseen käyttötarkoitukseen tehtyjen moottoreiden suurimpia, 39,8 kg · cm eli 3,9 Nm (Shenzhen XQ-Power verkkosivusto). Servomoottori ei pyöri jatkuvasti, vaan sen akseli kääntyy vain osan kokonaisesta kierroksesta.



Kuva 4. XQ Power S5040D –servomoottori (Shenzhen XQ-Power verkkosivusto)

Moottorin ohjaus tapahtuu ohjaussignaalin pulssinleveyttä muuttamalla. Pulssinleveys voi olla välillä 800–2200 mikrosekuntia. Saatuaan ohjauspulssin, jonka pituus on sallitulla välillä, huolehtii moottorin sisäinen servokytkentä siitä, että moottorin akseli kääntyy pulssinleveyttä vastaavaan kulmaan ja pysähtyy siihen. Akseli kääntyy em. pulssinleveysalueella 110 astetta. (Shenzhen XQ-Power verkkosivusto.)

Moottorin akselin päähän kiinnitetyn kammien päähän nivelöity jäykkä teräslanka toimii työntötankona, joka myös toisesta päästään nivelöitynä kantosiiven siivekkeeseen siirtää liikkeen veden alle. Näin moottori voi olla sijoitettuna kuivaan tilaan veneen rakenteen sisälle, eikä näin ollen tarvitse omaa vesitiivistä kotelointia ja on tarvittaessa helppo huoltaa tai vaihtaa. Kaikki kolme ser-

vomoottoria on asennettu samalla tavalla, eikä niiden mekaaninen asennus ollut osa tätä työtä.

### 2.2.7 ESC-laite

Moottorin kierroslukua ohjaamaan hankittu ESC eli elektroninen nopeussäädin oli pienoismallikäyttöön tarkoitettu Kontronik + Sobek Drives GmbH:in valmistama Kosmik 160 HV (kuva 5). Erittäin pienestä koostaan (109,2 x 53,2 x 28,6 mm) huolimatta se pystyy käsittelemään 160 A:n jatkuvaa ja 350 A:n hetkellistä virtaa.



Kuva 5. Kontronik Kosmik 160 HV ESC (Kontronik)

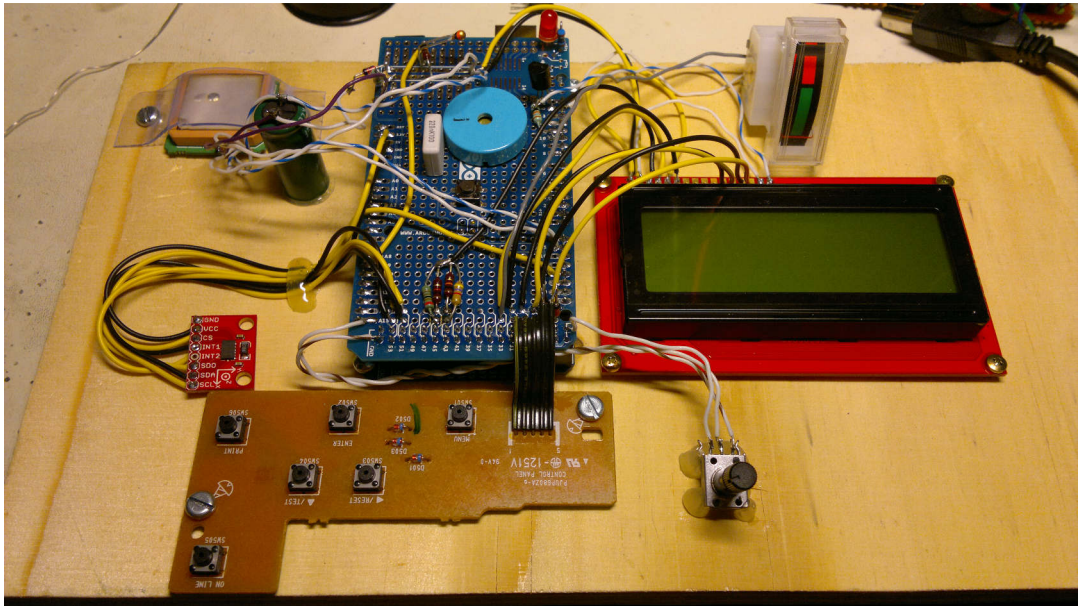
ESC on pääsähköjärjestelmän ja säätöjärjestelmän rajalla, sillä se ohjaa moottorin tehoa säätöjärjestelmän antaman tiedon perusteella. Se sisältää myös ohjelmoitavan BEC-laitteen, jolla syötetään servomoottoreita.

ESC-laitteen ohjaus toimii servomoottoreiden tavoin pulssinleveyttä muuttamalla. 20 ms:n välein sille lähetetään 1000–2000  $\mu$ s:n pituinen pulssi. 1000  $\mu$ s:n pulssilla se pyörittää moottoria täydellä nopeudella yhteen ja 2000  $\mu$ s:n pulssilla toiseen suuntaan. 1500  $\mu$ s:n pulssinleveydellä moottori on pysähdyksissä.

Sekä servomoottoreiden että ESC-laitteen ohjaussignaalien amplitudit vaihtelevat pienoismallien radiovastaanottimien käyttöjännitteiden rajoissa, käytännössä noin 4–8 voltin välillä. Arduinon liitännöissään käyttämä 5 voltin jännite-taso sopii siis molemmille sellaisenaan.

## 2.3 Prototyyppi

Järjestelmän toiminnan pikaista testaamista ja erityisesti ohjelman kehitystä varten säätöjärjestelmästä tehtiin ensin prototyyppi (kuva 6).



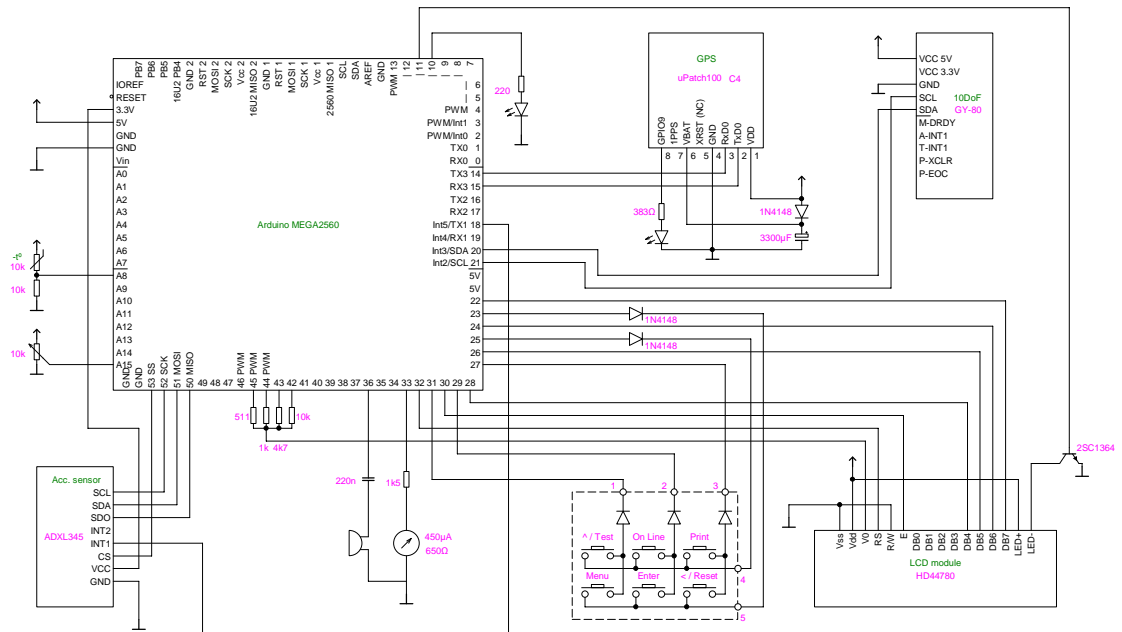
Kuva 6. Säätiöjärjestelmän prototyyppi

### 2.3.1 Osat ja kytkennät

Prototyyppi koottiin vanerin palalle käyttäen käsillä olleita osia. Itse mikrokontrolleri, koekytkentälevy, näyttö ja kiihtyvyyssanturi olivat lopulliseen versioonkin käytettäväksi tarkoitettuja osia.

Muita osia olivat GPS-vastaanotin, mittari kuvaamaan ohjattavien servomootoreiden asentoa, vanhasta tulostimesta otettu näppäimistö, potentiometri analogisten tulosignaalien simulointia varten, NTC-vastus lämpötilan mittausta varten, pietsokaiutin äänimerkkejä varten sekä vastuksista koottu digitaal/analogimuunnin ja transistorikytkentä näyttömoduulin ohjelmallista kontrastin ja taustavalon kirkkauden säätöä varten.

Kytkentöjä ei tehty suoraan Arduinoon, vaan sen päälle liitettävälle koekytkentälevylle, jota Arduinon tapauksessa sanotaan shieldiksi. Tämä levy liitetään Arduinoon yksinkertaisesti painamalla se kiinni Arduinon päälle, kun liitinrimat on ensin juotettu paikoilleen.



Kuva 7. Prototyypin piirikaavio

Kuva 7 on prototyypin piirikaavio, josta nähdään, että eri moduulien liittämiseen käytettiin hyvin vähän mitään liittäntäelektronikkaa, varsinkaan jännitesovittimia. Tarve jännitesovittimille olisi ilmeinen, sillä Arduino itse toimii 5 voltin käyttöjännitteellä ja käytetyt anturit taas 3,3 voltin jännitteellä. Toiminta on kuitenkin mahdollista, sillä osassa käytetyistä moduuleista on niissä käytettyjä 3,3 voltin mikropiirejä varten jännitesovittimet. Myös osasta moduuleita tuleva 3,3 voltin signaali on selvällä marginaalilla myös Arduinolle looginen "1", sillä Arduinon käyttämän ATmega2560-mikrokontrollerin tulot ovat sen datalehden mukaan loogisessa "1" tilassa jo yli 0,6 voltin jännitteellä (ATmega2560 Datasheet 2014, 355). Piirikaavio on nähtävissä myös täydessä koossa liitteen 2 ensimmäisellä sivulla.

SparkFun ADXL345-kiihtyvyysanturimoduulissa ei tarkemmin tutkittaessa kyseisiä jännitesovittimia kuitenkaan ole. Kytkeä tehtiin myyjän verkkosivulla olevan ohjeen mukaan, tutkimatta ensin anturin datalehteä. Anturi toimii kyllä oikein, mutta 3,3 voltin käyttöjännitteellä tuloille sallittu maksimijännite 3,6 voltia ylittyy selvästi mikrokontrollerin lähtöjännitteen ollessa 5 voltin käyttöjännitteellä vähintään 4,2 voltia (Analog Devices ADXL345 Datasheet 2016, 6; ATmega2560 Datasheet 2014, 355). Tästä syystä, varsinkin mikäli kyseinen moduuli olisi jäänyt käyttöön lopullisessa versiossa, olisi Arduinon ja kiihtyvyysanturin välille pitänyt tehdä jännitesovitus.

GPS-moduuli (Fastrax uPatch100-C4) toimii myös 3,3 voltin käyttöjännitteellä, mutta se sisältää jänniteregulaattorin, joten sitä voi käyttää 3,3–5,5 voltin jän-

nitteellä. Datalinjat ovat kuitenkin 3,0 voltin CMOS-tasoiset, joten Arduinon GPS-moduulille päin syöttämään datalinjaan tulisi lisätä jännitesovitus (Fast-rax uPatch 100 Interface Description, 11). Tätä ei kuitenkaan prototyyppiin tehty, sillä GPS-moduuli lähettää oletusarvoisesti standardin mukaista NMEA-dataa, eikä näin ollen ollut tarvetta lähettää moduulille mitään asetustietoja. GPS-moduulille päin suuntautuvan liikenteen puutteen vuoksi kyseinen datalinja pysyy koko ajan "0" tilassa ja siten jännitekään ei nouse yli sallitun rajan. Datalinja on kuitenkin kytketty, joten GPS-moduuli olisi mahdollista särkeä ohjelmallisesti. Parempi vaihtoehto olisi jättää kyseinen datalinja kokonaan kytkemättä, sillä RS-232 versiosta poiketen moduulin CMOS-versio ei vaadi sen olevan kytkettynä.

LCD-moduulin kytkentä oli jännitteiden puolesta varsin suoraviivaista, sillä se liikennöi 5 voltin jännitteellä kuten Arduinokin. Se kytkettiin nelibittisenä, vaikka Arduinon liitäntäkapasiteetti olisi hyvin riittänyt kahdeksanbittiseenkin liitäntään. Kahdeksanbittisyydestä ei kuitenkaan olisi ollut mitään hyötyä. Moduulin taustavalon ja kontrastin säädöt toteutettiin siten, että niiden ohjelmallinen säätäminen on mahdollista. Kontrastin säätöä varten Arduinon liitäntöihin 42–45 koottiin yksinkertainen D/A-muunnin vastuksista. Taustavaloa taas ohjataan kytkimenä käytetyllä NPN-transistorilla, jota puolestaan ohjataan Arduinon liitännästä 11. Täten taustavalon kirkkautta voidaan säätää PWM-ohjatusti.

Mittarina käytettiin jostain vanhasta audiolaitteesta purettua signaalitasomittaria, joka kytkettiin Arduinon PWM-lähtöön sarjavastuksen kautta siten, että sen näyttämä kuvasi parhaalla mahdollisella tavalla siivekkeiden kulmansäätöservomootoreiden liikettä niille sopivalla pulssisuhdealueella. Sarjavastuksen mitoitus tehtiin kokeellisesti potentiometriä apuna käyttäen syöttäen mittarille samanaikaisesti servomootorin ohjaukseen tarkoitettua signaalia.

Näppäimistö, joka oli peräisin vanhasta Canon-merkkisestä lasertulostimesta, oli jo valmiiksi kytketty 2 x 3 kytkimen matriisiksi, joten se liitettiin Arduinoon sellaisenaan. Matriisin rivejä syöttäviin johtimiin lisättiin kuitenkin signaalidiodit, jotta kahden eri riveillä olevan painikkeen yhtäaikainen painaminen ei aiheuta oikosulkua, yhden rivin jännitteen ollessa 0 ja toisen 5 voltia. Saman varotoimen olisi voinut tehdä ohjelmallisestikin, mutta koska näppäimistön lu-



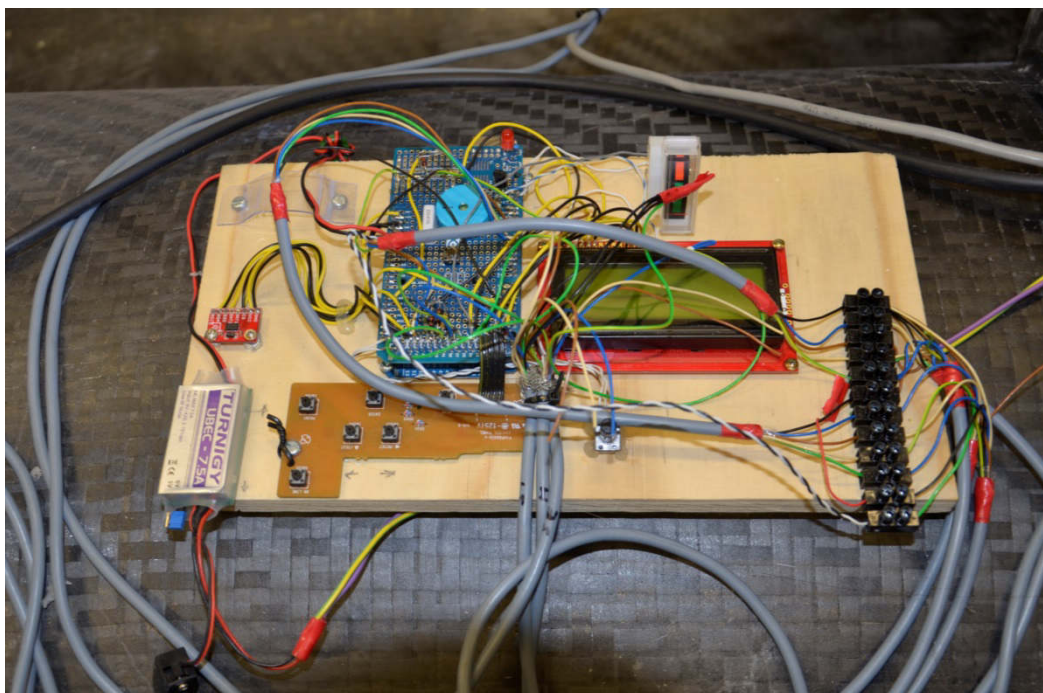
enta oli ensimmäinen ohjelmitava asia, katsottiin parhaaksi lisätä sähköinen varmistus ohjelmointivirheiden varalta.

Muiden prototyypin komponenttien kytkennät ovat niin triviaaleja, ettei niitä ole tarpeen erikseen käsitellä. Kytkenät ovat kuitenkin nähtävissä piirikaaviossa.

Kaikki käytetyt osat eivät olleet tarpeellisia lopullista järjestelmää ajatellen, mutta ne havainnollistivat ohjelmiston kehittäjälle erilaisia tapoja kommunikoida erilaisten antureiden ja muiden komponenttien kanssa. Niistä oli myös apua ohjelmoinnissa, kun ohjelmointi piti suorittaa suurimmaksi osaksi poissa veneen luota ja siten ilman siihen kytkettyjä osia.

### 2.3.2 Asennus

Kiireen vuoksi alun perin pelkkään kokeiluun tarkoitettu prototyyppi joutui ohjaamaan kantosiipien siivekkeiden kulmia säätäviä servomootoreita ja moottorin nopeutta myös käytännössä (Kuva 8).



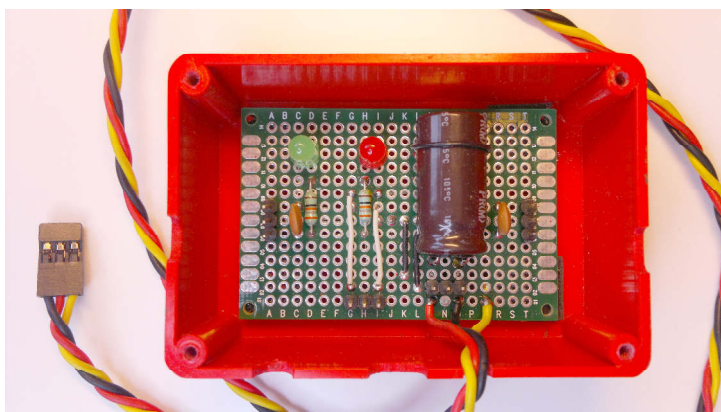
Kuva 8. Prototyyppi kytkettynä veneeseen

Hyvin kireässä aikataulussa, juuri ennen ensimmäistä testiajoa veneeseen liitetty prototyyppi oli kaikkea muuta kuin meri-ilmastoon soveltuva, eivätkä kytkennät vastanneet käyttöympäristön – eivätkä varsinkaan estetiikan – asettamia vaatimuksia, mutta sillä pystyttiin kuitenkin testaamaan järjestelmän toimivuutta.

Tässä vaiheessa vene oli vielä pahasti keskeneräinen, eikä siinä ollut vielä aurinkopaneeleita. Käyttövoima saatiin yksinomaan akustosta. Säätyöyksikön kiinnityspaikka määräytyi sen mukaan, missä se voisi olla riittävän korkealla kastumisen välttämiseksi ja minne johdot oli nopeinta asentaa. Paikka oli veneen vasemmalla puolella, lähempänä laitaa kuin keskilinjaa, kuljettajan etupuolella.

Prototyypin kytkennät ulkopuolisiin komponentteihin on esitetty piirikaaviossa, joka on liitteen 2 toisella sivulla. Kaaviossa näkyvät vain ne kytkennät, jotka eivät näy prototyypin sisäisessä piirikaaviossa. Molemmissa kaavioissa keskeisenä komponenttina on kuitenkin itse Arduino. Koska sisäisessä ja ulkoisessa kytkennässä ei ole käytetty yhteisiä liitännästoja, kaavioissa ei ole päällekkäisyyksiä.

Kantosiipiä säätevien servomootoreiden kytkentää varten tehtiin pieni liitännäsrasia, jossa keskusyksiköltä tuleva ohjaussignaali ja ESC-laitteen eli moottorinohjaimen sisäiseltä BEC-laitteelta tuleva sähkösyöttö kytketään toisiinsa. Käytetyt servomootorit ovat pienoismallikäyttöön tarkoitettuja, mutta niin tehokkaita, ettei niiden käyttämää virtaa kannata kierrättää keskusyksikön kautta johdoissa tapahtuvien häviöiden ja suuren virran mahdollisesti aiheuttamien häiriöiden takia. Arduinin 5 voltin jännite olisi myös rajoittanut askelmoottorien nopeutta, sillä niitä voidaan syöttää jopa 7,2 voltin jännitteellä, minkä moottorinohjaimen ohjelmoitava lähtöjännite puolestaan mahdollistaa.



Kuva 9. Servomootoreiden liitännäsrasia

Liitännäsrasiassa sekä ESC-laitteen että keskusyksikön maatasot on yhdistetty, mutta keskusyksiköltä tuleva syöttöjännite, kuten myös ESC-laitteelta tuleva ohjaussignaali, ovat kytkemättä. Syöttöön on myös lisätty suotokondensaattori ja ohjaussignaaleihin LED-merkkivalot sekä häiriönpoistoa varten keraamiset

kondensaattorit. Liitäntärasia näkyy avattuna ja irrallaan kuvassa 9. Liitäntärasian sijainti veneessä on takakantosiipiä säätävien servomoottoreiden vieressä. Syöttöjohto on juotettu kiinteästi kiinni rasian piirilevyille, mutta servomoottoreiden kytkentää varten on piikkirimaliittimet, joihin moottoreissa valmiiksi olevat liittimet kytketään. Tällä helpotetaan servomoottoreiden vaihtamista mahdollisessa vikaantumistilanteessa. Myös etukantosiipiä säätävä servomoottori saa syöttönsä tämän rasian kautta, mutta ohjaussignaali sille vietään erikseen suoraan keskusyksiköltä.

Veneen moottorin suuren tehon vuoksi sen ohjauksen pitää olla mahdollisimman häiriötöntä. Ahtaassa paikassa hitaalla nopeudella liikuttaessa häiriösignaalin aiheuttama moottorin ryntääminen olisi kevytrakenteiselle veneelle kohtalokasta. Suuret virrat voivat aiheuttaa järjestelmän eri komponenttien maatasojen välille haitallisissa määrin potentiaali eroja, eikä mahdollisimman kevyeen rakenteeseen pyrittäessä kannata turvautua paksuihin ja painaviin maadoitusjohtimiin. Tästä syystä ESC-laitteen ohjaussignaalia varten tehtiin galvaninen erotus keskusyksikön ja ESC-laitteen välille erilliseen koteloon kootulla optoerotinkytkennällä, joka sijoitettiin lähelle ESC-laitetta.

### 2.3.3 Testaus

Veneen ensimmäinen testiajo ei sujunut toivotulla tavalla. Vene oli nousemallaan kantosiipiensä varaan, mutta säätö ei kuitenkaan pysynyt riittävän vakaina, joten jokainen nousuyritys päättyi uppoamiseen (kuva 10). Moottoritehon ollessa rajallinen olisi siivekkeiden säädön pitänyt toimia paljon luotettavammin. Suuremmalla teholla nouseminen olisi voinut onnistua huonoillakin säädöillä.





Kuva 10. Nousuryitys

Tiedonkeruun puutteen vuoksi syy epäonnistumiseen jäi pitkälti pelkän päätteen ja jopa arvailun varaan. Yksi selvä syy on kiihtyvyyssanturilta saatavien mittaustulosten vääristyminen sen toispuoleisen sijoituspaikan takia. Ohjelmakoodissa tätä virhettä ei otettu huomioon, eikä olisi kannattanutkaan, sillä kyseisenlaisen virheen korjaaminen olisi todennäköisesti ollut erittäin vaikeaa ja myös turhaa, sillä asennuspaikan muuttaminen oikeaksi oli joka tapauksessa tehtävä.

Testiajoja suoritettiin vielä muutamia kertoja ohjelmistomuutosten jälkeen. Koteloinnin puutteen vuoksi suolainen ilma ja kosteus sekä mahdolliset vesiroiskeet tekivät kuitenkin tehtävänsä, jolloin prosessorikortti alkoi käyttäytyä varsin epävakaasti. Osittain tästä syystä prototyypissä käytettyjä osia ei käytetty lopullisessa versiossa lainkaan. Prototyyppi oli myös koko ajan käytössä veneen säätämistä ja testaamista varten, kunnes lopullinen versio keskusyksiköstä oli asennusvalmis, joten samojen osien käyttäminen ei olisi tullut kyseeseen.

Koska itse säätöperiaate ei liittynyt omaan osuuteeni muuten kuin välillisesti, aloin selvittää sopivaa mittaustapaa vasta ensimmäisen epäonnistuneen testiajon jälkeen. Tulin siihen tulokseen, että riittävän nopea ja tarkka reagointi veneen liikkeisiin ei tulisi olemaan mahdollista pelkkää kiihtyvyyssanturia käyttäen. Myös kiertoliikkeet olisi mitattava käyttäen gyroskooppia.

## 2.4 Lopullinen versio

Lopullinen tai oikeammin viimeisin versio säätöjärjestelmästä tehtiin hyvin erilaisella tavalla kuin prototyyppi. Tavoitteena oli kestävä, selkeä ja helposti muunneltava kokonaisuus. Koko järjestelmän piirikaavio on liitteenä 3.

### 2.4.1 Keskusyksikkö

Keskusyksikön suunnittelun lähtökohtia olivat toisaalta käyttöympäristön ja toisaalta käyttäjien asettamat vaatimukset. Yksikön oli oltava vedenpitävä, kestävä, pieni ja kevyt. Jatkokehitystä, toistettavuutta ja mahdollista korjaustarvetta ajatellen sen oli oltava myös helposti saatavilla olevista osista mahdollisimman edullisesti koottu. Lisäksi korjaamisen kenttäolosuhteissa sekä kokoamisen ylipäätään tuli olla vaatimustasoltaan sellaista vaikeusluokkaa, että myös elektroniikan parissa työskentelyssä kokemattomampikin pystyisi ne suorittamaan.

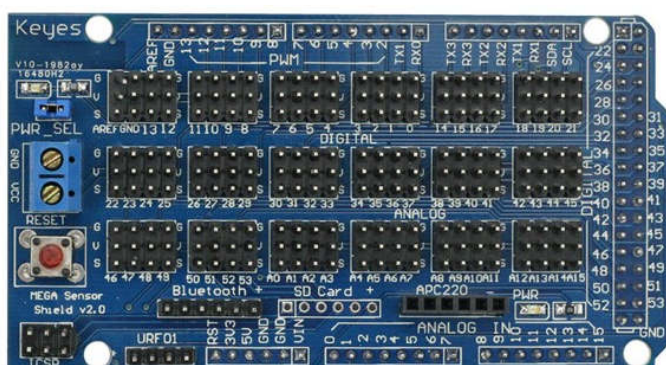
Keskusyksikkö koottiin 171 x 121 x 80 mm:n kokoiseen ABS-muoviseen koteloon (Camdenboss 7300-340). Kotelon koko on kompromissi sen painon ja kytkennän laajennusvaran välillä. Se on tiivistetty vesitiiviiksi (suojausluokka IP65) vaihdettavalla kumitiivisteellä ja se suljetaan neljällä koneruuvilla, joiden vastakappaleena kotelossa on metallikierteet, joten sitä voidaan avata ja sulkea aina tarvittaessa, eivätkä kierteet kulu vaarantaen kotelon tiiviyttä.

Keskusyksikön irrottamisen mahdollistamiseksi siihen kohdistuvia toimenpiteitä varten se on kytketty veneen johtosarjaan liittimillä (Multicomp / Singatron 2CT3xxx -sarja). Liittimet ovat myös vedenpitäviä (suojausluokka IP67), kumitiivistein ja liimatuin kontaktein. Kotelon läpivientien työstämisen ja liittimien kiinnittämisen helpottamiseksi valitut liittimet ovat pyöreitä ja lukitusmutterilla paikalleen kiinnitettäviä. Kontaktipinnat ovat kullattuja, joten ne kestävät lyhyitä aikoja myös mahdollisesti avonaiseen liittimeen osuvia suolavesi-roiskeita kohtuullisen hyvin. Liittimien tiiviyys ja paikallaan pysyvyys on varmistettu bajonettilukituksella.

Kaikki liittimet saatiin mahtumaan kotelon alaosan reunoille. Tilaa ei kuitenkaan jäänyt paljoa ylimääräistä. Kotelon kansi on kuitenkin yhtä syvä kuin sen pohja, joten mahdollisille lisäliittimille on reilusti tilaa. Tällöin tosin sisäinen johdotus joutuu ulottumaan kanteen, tehden avoimen yksikön käsittelystä

huomattavasti hankalampaa. Koska kaikki liitännät Arduinoon on tehty piikkirimaliittimillä, voidaan kanteen menevät johdot kuitenkin tarvittaessa helposti irrottaa.

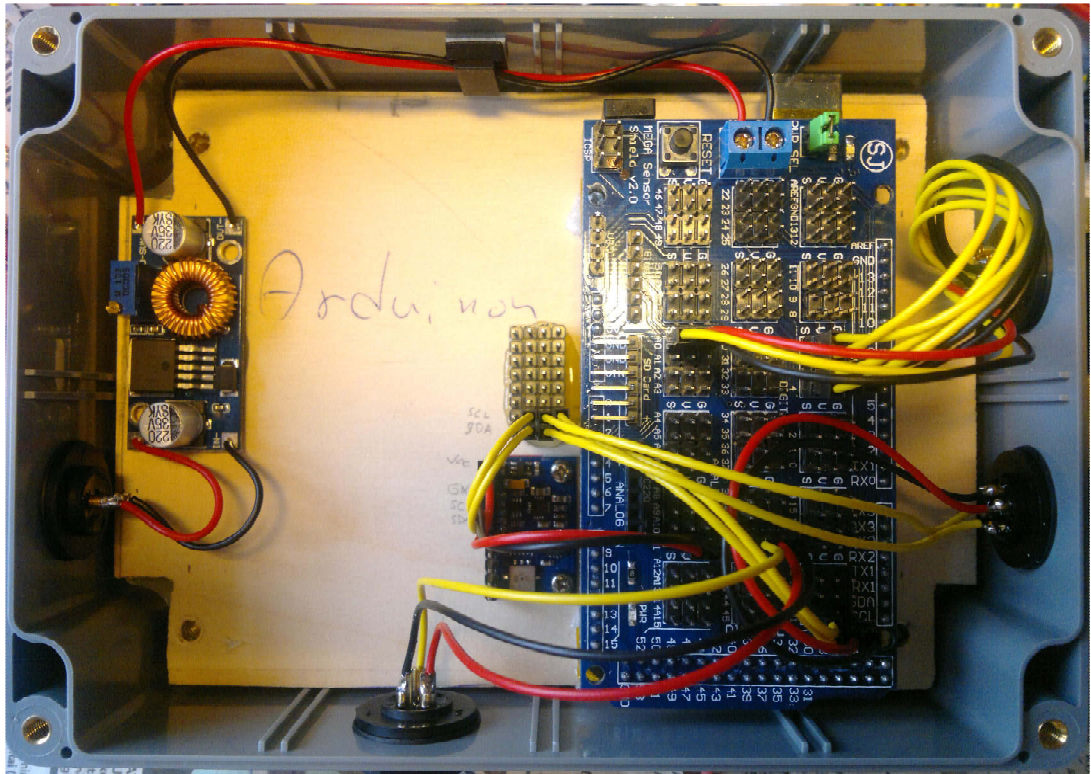
Sähköisten kytkentöjen tekeminen ja varsinkin johdotuksen liittäminen Arduinon päällä olevalle koekytkentälevylle ei ole kovin siisti ratkaisu. Kiinteästi paikalleen juotetut johtimet ovat myös vaikeampia ja hitaampia käsitellä, jos kytkentää joudutaan muuttamaan. Näistä syistä keskusyksikköä varten hankittiin kuvan 11 mukainen Mega Sensor Shield. Kyseessä on Arduinon päälle painettava kortti, jossa kaikki Arduinon liitännät on tuotu piikkirimaliittimille.



Kuva 11. MEGA Sensor Shield (SainSmart verkkosivusto)

Liittimet ovat kolmen piikin ryhmissä, joissa jokaisessa on jännitesyöttö-, maadoitus- ja signaalipiikit. Nämä liittimet on tarkoitettu erilaisten antureiden liittämiseen siten, että ne voidaan liittää helposti yhdellä liittimellä. Lisäksi kortin reunassa on liitännät Bluetooth-moduulille, SD-muistikortille, ultraäänietäisyysmittarille ja APC220-radiomoduulille.

Korttia ei käytetty siihen, mihin se on tarkoitettu, mutta koska kortilla ei ole LED-valojen lisäksi mitään aktiivielektroniikkaa, pystyttiin sitä käyttäen liittämään johdot Arduinoon erittäin siististi. Lopputulos on nähtävissä kuvassa 12. Johtoliitokset tehtiin piikkirimoihin sopivilla naaraspuristusliittimillä ja juotoksilla. Johtimien väreissä punainen merkitsee jännitesyöttöä, musta maatasoa ja keltainen signaalijohdinta. Koko yksikön sisäinen johdotus on nähtävissä liitteessä 4.



Kuva 12. Keskusyksikkö sisältä

Kortilla olevaa ulkoisen jännitesyötön liitintä käytettiin myös käyttötarkoituksensa nähden väärin. Sen tarkoitus on syöttää korttiin liitetyille antureille käyttöjännite siinä tapauksessa, että niiden kulutus ylittää Arduinon syöttökapasiteetin. Tällöin Arduinon ja kortin syötöt erotetaan toisistaan irrottamalla syöttöliittimen vieressä oleva oikosulkupala. Kytchentä kuitenkin tehtiin niin, että myös Arduino saa käyttöjännitteensä tämän lisäsyöttöliitännän kautta, jolloin erillinen DC/DC-muunnin syöttää jännitteen kaikille säätöjärjestelmän komponenteille ja Arduinon oma jänniteregulaattori ohitetaan. Käytetty DC/DC-muunnin pystyy syöttämään hetkellisesti jopa 5 A:n virran, moninkertaisesti tarpeeseen nähden.

Keskusyksikköön asennettiin uusi anturimoduuli (GY-80), IMU, jossa on yhdistettynä kolmiakselinen kiihtyvyyssanturi Analog Devices ADXL345 – sama kuin prototyypissä käytetty, kolmiakselinen gyroskooppi ST L3G4200D, kolmiakselinen kompassi Honeywell HMC5883L sekä barometri eli painemittari ja lämpömittari Bosch Sensortec BMP085. Kun kotelon asennuspaikka on veneen keskilinjalla, kuljettajan takana, ja IMU kotelon keskilinjalla, sijoittuu se optimaalisesti; hyvin lähelle veneen painopistettä. Tällä tavalla siihen eivät kohdistu veneen keulan tai perän liikkeiden aiheuttamat voimat korostetusti, vaan niiden summa.

Kaikki moduulin anturit on kytketty samaan I<sup>2</sup>C-väylään, eikä SPI-liitäntää ole käytettävissä. Moduuli ja osa sen komponenteista eivät tarjoa mahdollisuutta muuttaa antureiden väyläosoitteita. Moduulin kytkentäkaavio on liitteenä 12. Siitä nähdään, miten ADXL345:n ja L3G4200D:n väyläosoitteeseen vaikuttavat kytkennät on tehty. Väyläosoitteet ovat kiinteästi seuraavat:

- ADXL345            0x53            (B1010011)
- L3G4200D        0x69            (B1101001)
- HMC5883L        0x1E            (B0011110)
- BMP085            0x77            (B1110111)

(Analog Devices ADXL345 Datasheet 2016, 19; STMicroelectronics L3G4200D Datasheet 2010, 22; Honeywell HMC5883L Datasheet 2013, 2, 11; Bosch BMP085 Datasheet 2011, 17)

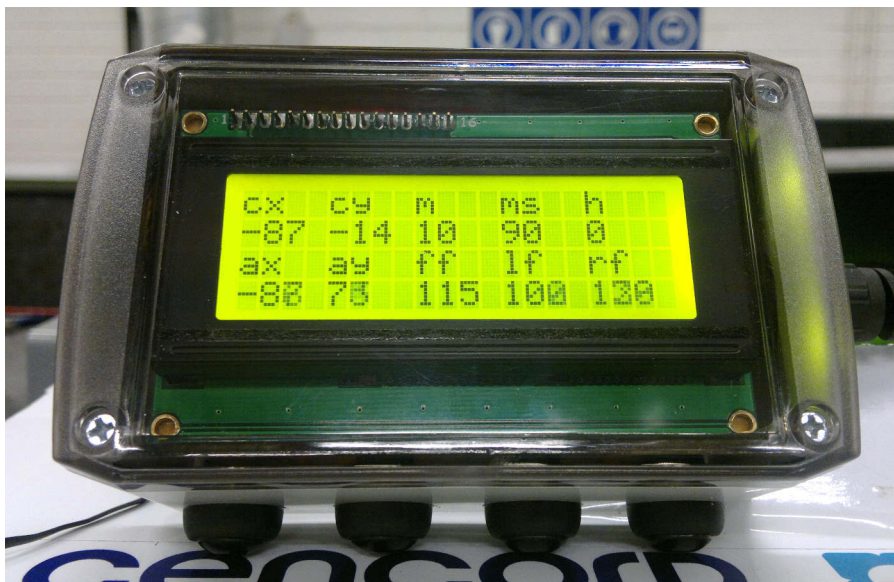
I<sup>2</sup>C väyläosoitteet ovat vain seitsenbittisiä, koska tavun kahdeksas bitti määrittelee, onko kyseessä luku- vai kirjoitusoperaatio.

Koska kytkentälevyllä ei ole I<sup>2</sup>C-väylää varten useampia liitäntöjä, tehtiin sitä varten erillinen haaroitusosa. Jatkokehitystä varten siitä tehtiin tarvetta suurempi, 8 signaalille, 4 piikkiä kullekin. Kunkin signaalin kaikki 4 piikkiä on yksinkertaisesti kytketty yhteen.

#### 2.4.2 Näyttö- ja säätöyksikkö

Näyttö- ja säätöyksikön tarkoitus on antaa veneen kuljettajalle mahdollisuus tarkkailla säätöjärjestelmän toimintaa ja tehdä säätöparametreihin hienosäätöä tarvitsematta rantautua tai keskeyttää veneellä ajamista. Käytettävissä olevan tilan vähyyden vuoksi laitetta ei asennettu kiinteästi veneen rakenteisiin, vaan siitä tehtiin irrallinen ja myös sähköisesti pääohjainyksiköstä muiden toimintojen häiriintymättä irrotettavissa oleva, johdolla liitetty pieni yksikkö (Kuva 13).



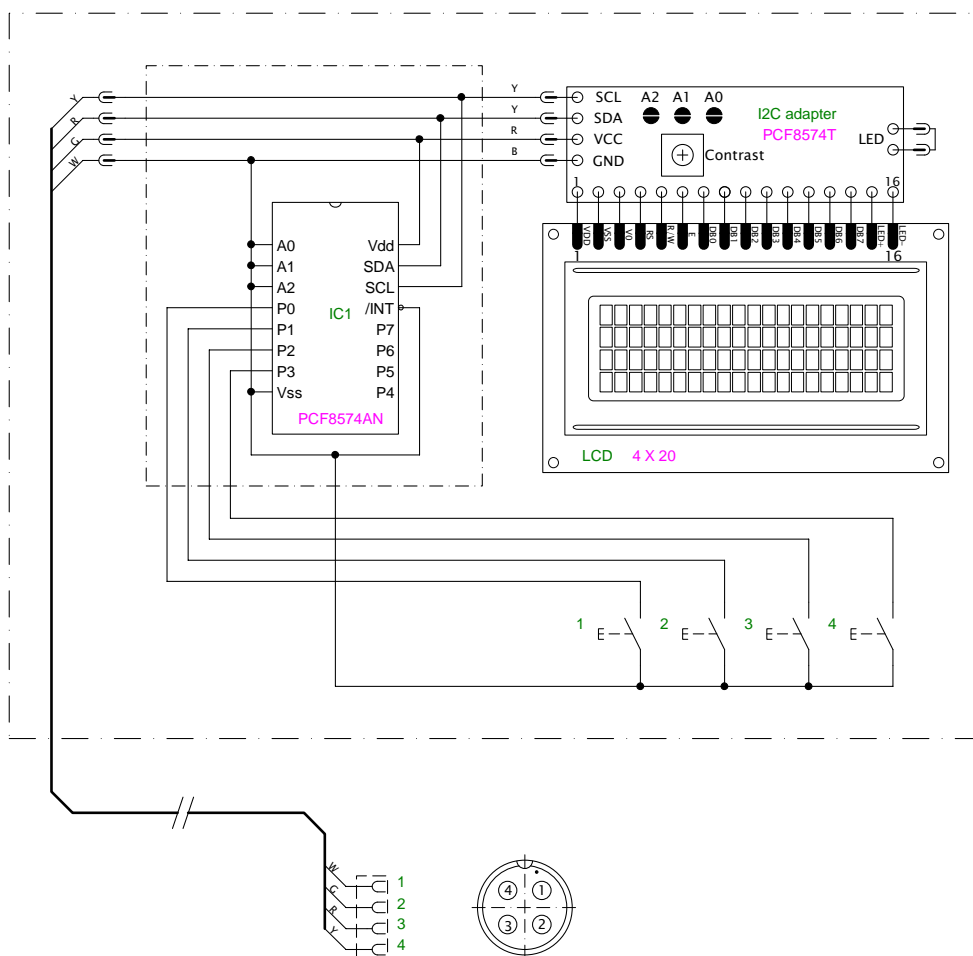


Kuva 13. Näyttö- ja säätöyksikkö

Näytön ja painikekytkimien kytkeminen johdolla suoraan ohjainyksikön mikrokontrollerikortille olisi vaatinut jäykän, vähintään 12-johtimisen kaapelin ja tarpeettoman suuren määrän liitännäkapasiteettia tiedonsiirron ollessa rinnakkaismuotoista. Jotta liitännästä saatiin kevytrakenteisempi, otettiin käyttöön I<sup>2</sup>C-sarjaväylä sekä näytölle että painikkeille. Tällä ratkaisulla tarvittavien johtimien määrä putosi neljään.

I<sup>2</sup>C-väylä on tarkoitettu pääasiassa pelkästään samalle piirilevyllä sijoiteltavien eri kontrollereiden ja antureiden yhteen liittämistä varten johtimia, käytettyjen mikropiirien liitännäkapasiteettia ja siten myös tilaa säästään. Tarvittavan liitännäjohdon lyhyen mitan vuoksi sen väylälle aiheuttamat kapasitanssin ja resistanssin lisäykset olivat kuitenkin niin pienet, että I<sup>2</sup>C-väylä oli kuitenkin mahdollista laajentaa ulos pääohjainlaitteesta.

Väylään liittymistä varten tarvittiin väyläsovittimet. Kuva 14 on koko yksikön piiri- ja johdotuskaavio, josta nähdään, miten ne on kytketty. Kaavio on nähtävissä myös suuremmissa koossa liitteessä 5. Näyttömoduulia varten väyläsovitin oli helposti saatavissa valmiina näytön taakse liitettävänä moduulina, jossa on samassa myös säätövastus näytön kontrastin säätöä varten, paikka taustavalon kytkevälle oikosulkupalalle sekä kolme osoitekoodaukseen käytettävää oikosuljettavaa juotospisteparia.



Kuva 14. Näyttö- ja säätöyksikön piiri- ja johdotuskaavio

Painikkeita varten tarvittiin toinen väyläliityntäpiiri. Piirinä käytettiin samaa PCF8574-piiriä kuin näytön sovittimessakin, mutta tässä tapauksessa irrallinen mikropiiri juotettiin koekytkentälevyn palalle. Käytetty piiri oli kuitenkin A-versio, joka on osoitekoodaukseltaan erilainen. Piirille ei tarvittu mitään oheiskomponentteja, sillä suotokondensaattori ja väylän vaatimat ylös- ja alaspäinvastukset olivat välittömässä läheisyydessä olevassa näytön väyläsovitinmoduulissa. Painikkeitakaan varten ei tarvittu muita komponentteja, sillä liityntäpiirillä olevat sisäiset ylös- ja alaspäinvastukset riittävät.

Koska näytön väyläsovittimessä olevat osoitekoodausjuotospisteet jätettiin auki, muodostui näytön väyläosoitteeksi 0x27 (B0100111) ja painikkeiden liityntäpiirin osoitepinnien ollessa kytkettynä maahan ja sen ollessa A-versio, muodostui sen väyläosoitteeksi 0x38 (B0111000).

Yksikkö koottiin pieneen (125 x 75 x 50 mm) ABS-muoviseen koteloon, jossa on savulasinvärinen polykarbonaattikansi (Camdenboss CSACTT003). Myyjän tuoteselosteesta olleesta päinvastaisesta maininnasta huolimatta se osoit-

tautui myöhemmin vettä pitämättömäksi. Johdon läpivienti varustettiin vedonpoistolla, kumitiivisteellä ja johdon taivutussuojalla. Kytkimiksi valittiin reilun kokoiset vedenpitävät painonapit, joita on helppo käsitellä myös märät käsi-  
neet kädessä.

#### 2.4.3 Johdotus

Säätöjärjestelmää paikalleen asennettaessa prototyypivaiheen johdotuksesta jätettiin kytkemättä servomootoreiden ja ultraääniantureiden johdot. Loput johdot käytettiin osittain sellaisenaan, mutta keskusyksikköön liittyvät päät lyhennettiin ja liitettiin johtoihin, joihin oli valettu valmiiksi Singatronin vedenpitävät moninapaliittimet.

Liitokset tehtiin juottamalla ja suojaamalla vettäpitävästi liimapintaisella kutistesukalla. Liittimet olisi liitetty suoraan alkuperäisiin johtoihin, mutta johdotto-  
mia, juotettavia liittimiä ei ollut saatavilla.

Ohjauspyörän liittimessä jäi kolme napaa käyttämättä, joten ne sekä yksi maa-  
johto kytkettiin ylimääräiseen, toisesta päästään suojattuun johtoon, jotta nii-  
den käyttäminen tulevaisuudessa olisi helppoa, eikä jo tehtyjä liitoksia tarvitsi-  
si särkeä. Sähkönsyötön ja moottorinsäätimen johdotuskaavio on liitteessä 6  
ja ohjauspyörän johdotuskaavio liitteessä 7. Kaavioista ilmenee, miten johdin-  
ten värit vaihtuvat jatkoksien kohdalla.

#### 2.4.4 Testaus

Valmiin järjestelmän testaus suoritettiin laskematta venettä veteen, trailerin  
päällä. Koska testattavana oli vain järjestelmän osien keskinäinen toiminta, ei-  
kä ohjattavana ollut enää muuta kuin moottori, pystyttiin testaus suorittamaan  
kuivana. Kaikki toimi odotetusti ja vene sai aloittaa matkansa kilpailupaikalle.

### 3 LOPPUTULOS

Säätöjärjestelmän ollessa liki valmis päätti kilpailuun osallistuva joukkue, pro-  
totyyppin kanssa tehtyjen testiajojen huonojen tulosten sekä kilpailun lähesty-  
vän ajankohdan takia, viimehetkellä poistaa kantosiivet veneestä kokonaan.  
Myös veneen mekaanisia ratkaisuja kyseenalaistettiin. Vene oli kuitenkin var-



sin nopea myös uppoumatilassa, joten haluttiin varmistaa, ettei mahdollinen epäonnistuminen kantosiipien kanssa pilaisi mahdollisuuksia kilpailussa.

Kantosiipien poistamisen takia säätöjärjestelmälle jäi erittäin pieni rooli pelkkänä moottorin kierrosluvunsäätimenä. Järjestelmä oli kuitenkin jo varsin suurelta osin valmis ja sitä oli koko ajan kehitetty kantosiipikäyttöä varten, joten niiden lisääminen olisi kilpailun jälkeen helppoa, ainakin säätöjärjestelmän puolesta. Järjestelmän suunnitteluvaiheessa ja lähes kokoamisvaiheen loppuun asti käyttötarkoituksen tyypistymisestä ei ollut tietoa, joten edeltävissä luvuissa asiaa on käsitelty kussakin vaiheessa tiedossa olleen päämäärän mukaisesti.

### 3.1 Kilpailu

Veneellä osallistuttiin Hollannissa pidettyyn kansainväliseen aurinkoveneiden kilpailuun DONG Energy Solar Challengeen kesällä 2014.

Veneen säätöjärjestelmälle tapahtui jo menomatalla kilpailupaikalle kohtalokas tapaturma. Näyttö- ja säätöyksikkö oli jäänyt kuljetuksen ajaksi veneen pohjalle ja osoittautui, että se ei ollutkaan vedenpitävä. Veneen ollessa katteetta trailerin päällä, rankka vesisade oli täyttänyt venettä niin paljon, että yksikkö oli ollut upoksissa. Tätä ei kilpailupaikalla oltu huomattu, vaan järjestelmään oli kytketty virta päälle, mistä oli seurauksena ensin näytön, sitten keskusyksikössä olevan virtalähteen ja sen myötä koko keskusyksikön tuhoutuminen. Keskusyksikön korjaaminen olisi ollut sen rakenteen vuoksi hyvinkin helppoa, mutta tarvittavia varaosia tai tekijöitä ei kilpailumatalla ollut käytävissä.

Tästä johtuen kilpailu ajettiin käyttäen servomoottoreiden testaamiseen tarkoitettua testilaitetta. Seurauksena oli usean ESC-laitteen tuhoutuminen, kun kuljettaja vaikeissa paikoissa pysäytti moottorin käyttäen järjestelmän pääkytkintä. Tämä tuli kalliiksi, mutta onneksi ESC-laitteita oli kilpailupaikalla juuri riittävä määrä.

Monista vastoinkäymisistä huolimatta vene pääsi kuitenkin palkintosijoille. Tämä todistaa veneen perusrakenteen olevan erittäin hyvä. Toimiva kantosiipirakenne ja paremmin suojattu säätöjärjestelmä olisi tehnyt siitä mitä suurimmalla todennäköisyydellä kilpailun voittajan.

## 3.2 Kehitysmahdollisuuksia

Työtä tehdessä mieleen tuli lukuisia jatkokehitysmahdollisuuksia, joista osa oli työn ollessa vielä alkuvaiheessa tarkoitus toteuttaa projektin aikana. Käytettävissä olevan ajan ja koodaustyövoiman rajallisuus kuitenkin tuomitsi nämä ideat veneen jatkokehittäjien toteutettaviksi.

### 3.2.1 Suojaus

Tarve järjestelmän eri osien paremmalle sähköiselle suojaamiselle on ilmeinen. Sekä ylijännitteitä, että liian suuria virtoja vastaan pitäisi suojautua paremmin. Tämä on hyvin helposti tehtävissä lisäämällä joko perinteinen sulakesuojaus tai mieluummin palautuva ylivirtasuojaus yhdistettynä ylijännitesuojaukseen. Jännitepiikkien varalta myös transienttisuojiin lisääminen olisi suotavaa. Mikäli järjestelmän lopullisen version kokoaminen ei olisi tapahtunut aivan viimehetkellä, olisi nämä suojaukset toteutettu jo tässä vaiheessa.

Kokemuksen perusteella myös koteloiden ja muiden osien vedenpitävyys pitäisi testata viimeistään kokoonpanovaiheessa tai mahdollisesti jo ennen sitä.

### 3.2.2 Energianmittaus ja nopeussäätö

Kilpailussa veneen on tarkoitus kulkea määrätty reitti mahdollisimman nopeasti. Käytettävissä on se energiamäärä, mikä kilpailun aikana saadaan auringosta ja mikä on kilpailun alkaessa akustossa. Mitä suurempi energiamäärä saadaan reitin varrella käytettyä, sitä suuremmalla nopeudella se voidaan kulkea. Tästä seuraa se, että kilpailun aikana akusto pitäisi saada käytettyä tyhjäksi.

Koska veneen on energiatehokkaampaa kulkea kantosiipiensä varassa, kuin uppoumatilassa, ei nopeus saa laskea alle miniminopeuden, jolla se pysyy lentotilassa. Tästä syystä akusto ei saa tyhjentyä ennen maalia, sillä pelkällä suoralla aurinkosähköllä teho ei riitä riittävään nopeuteen. Hyvin pilvinen sää voi myös aiheuttaa niin pienen tehon, ettei veneellä päästäisi edes maaliin saakka – ainakaan ennen kuin kilpailijat olisivat menneet jo ohi.

Nykytilanteessa sopiva tehon käyttö on kuljettajan arvioinnin varassa. Liian innokas kuljettaja voi saada akuston tyhjenemään ennen maaliviivaa, kun taas

liian varovainen kuljettaja säästää sähköä eikä käytä kaikkea käytettävissä olevaa energiaa ennen kuin on liian myöhäistä.

Säätöjärjestelmään voitaisiin lisätä akuston varausseuranta, aurinkokennoilta tulevan tehon seuranta ja kuljetun matkan seuranta GPS-laitteen avulla. Ennen kilpailua järjestelmälle kerrotaisiin kuljettava matka tai reittipisteet koordinaatteina sekä mahdollisesti odotettavissa olevan aurinkoenergian määrään vaikuttava korjauskerroin sääennusteen perusteella, jolloin säätöjärjestelmä pystyisi itse laskemaan optimaalisen moottoritehon ja pitämään sitä yllä, vielä tarkentaen arvoa lähestyttäessä maalia. Reittipisteillä järjestelmälle kerrotaisiin etukäteen, millä etapeilla maksiminopeus ei ole mahdollinen, jotta hitaammat etapit voitaisiin ottaa laskennassa huomioon.

Nopeussäädöstä olisi samalla tavalla hyötyä myös kantosiivettömässä veneessä, joskaan ei aivan yhtä suuressa määrin.

### 3.2.3 Tiedonkeruu

Ohjelmakoodin ongelmien etsimistä ja säätöparametrien hienosäätöä varten olisi hyvä pystyä keräämään antureilta tulevaa tietoa myöhempää analysointia varten. Tämä olisi hyvin helposti toteutettavissa liittämällä järjestelmään muistikortti, jolle tieto kirjoitettaisiin. Tätä varten oli jo SD-muistikorttipaikkakin hankittuna järjestelmään liittämistä varten. Myös reaaliaikakellomoduuli oli hankittu, jotta kerättyyn tietoon saataisiin liitettyä aikaleima. Kellomoduulilta saatava aikatieto olisi tarpeen, kunnes GPS-moduuli saisi luettua aikatiedon satelliiteilta.

### 3.2.4 Telemetry

Muistikorttia parempi tiedonkeruutapa olisi tiedon siirtäminen langattomasti maissa oleville ryhmän jäsenille. Näin tietoa voitaisiin analysoida välittömästi. Myös säätöparametreja voitaisiin muuttaa kesken ajon, kuljettajan keskittyessä ohjaamiseen. Tiedonsiirto voitaisiin toteuttaa monella eri radiotekniikalla. GSM-verkossa toimiva GPRS-modeemi olisi yksi hyvä vaihtoehto. GSM-verkkoa käytettäessä välimatkan pituudellakaan olisi väliä. Myös GPRS-modeemimoduuli oli jo valmiiksi hankittuna.

### 3.2.5 Aurinkokennojen viilennysjärjestelmä

Aurinkokennon hyötysuhteeseen vaikuttaa niitä kuormittavan kuorman lisäksi myös sen lämpötila. Lämpötilan noustessa liiaksi hyötysuhde alkaa laskea. Mitä enemmän auringon energiaa tummaan kennoon osuu, sitä enemmän se kuumenee. Tästä seuraa se, että parempi tilanne aurinkoenergian määrän kannalta onkin lämpötilan kannalta huonompi tilanne. Ratkaisu ongelmaan on kuitenkin hyvin yksinkertainen. Kennojen lämpötilaa voitaisiin seurata lämpötila-antureilla ja lämpötilan noustessa kennojen päälle voitaisiin sumuttaa vettä, joka haihtuessaan jäähdyttäisi kennoja. Jäähdytys käynnistettäisiin lämpötilassa, jossa jäähdytyksellä saataisiin nostettua kennojen keräämää energiamäärää jäähdytysjärjestelmän kuluttamaa energiamäärää enemmän. Tämän automatiikan voisi lisätä olemassa olevaan järjestelmään hyvin helposti. Maakeassa vedessä jäähdytysvedenkin voisi ottaa veneen ulkopuolelta, joten kuljetettava massa ei lisääntyisi.

## 3.3 Projekti

Useamman alan tekijöiden ja tässä tapauksessa myös organisaation eri osastojen välisissä projekteissa on monia haasteita, joita ei pienimuotoisemmissa ja varsinkaan yksin tehtävissä projekteissa ole. Tässä projektissa kyseisistä haasteista ei selvitty aivan kunnialla.

### 3.3.1 Projektin johto

Projektilla pitäisi olla johtaja, joka huolehtisi siitä, että kaikki asianosaiset tietäisivät ja hoitaisivat tehtävänsä. Tässä projektissa johtajaa ei ollut ollenkaan, vaan jokainen yksilö tai ryhmä toimi suurimmaksi osaksi erillään, ilman riittävästi tietoa muiden tilanteesta, suunnitelmista tai aikataulusta. Tästä aiheutui väistämättä ongelmia.

### 3.3.2 Kommunikaatio

Eri osa-alueista vastuussa olleet eivät kommunikoineet keskenään riittävästi, vaan toimittiin paljon oletusten varassa. Mikäli jokaisen tehtävä olisi ollut tarkasti määritelty ja aikataulutettu, ei tästä olisi välttämättä ollut haittaa. Nyt kuitenkin esimerkiksi säätöjärjestelmään oltiin liittämässä gyroskooppiä kantosii-

pien toiminnan parantamiseksi vielä siinä vaiheessa, kun toisaalla oli jo päätetty poistaa veneestä kantosiivet kokonaan johtuen siitä, ettei luotettu säätöjärjestelmän valmistumiseen.

### 3.3.3 Aikataulu

Useiden osanottajien aikataulujen yhteensovittaminen on aina vaikeaa, mutta erityisen vaikeaksi sen tekee se, jos kaikilla osallisilla ei ole käsitystä siitä, miten pitkän ajan kunkin osa-alueen toteuttaminen vie. Omassa osuudessani ongelmia aiheutti se, että kun vaatimukset olivat riittävällä tarkkuudella selvillä, ei ollut enää aikaa suunnittelemiseen, osien valintaan, hankintaan, kokoamiseen ja vielä testaukseen. Testaus ja pienet, mutta tärkeät parannukset, kuten parempi suojaus, kärsivät eniten.

### 3.3.4 Motivaatio

Kaikista edellä mainituista ja oletettavasti muistakin syistä johtuen useammalla projektiin osallistuneella oli motivaatio ajoittain täysin hukassa, mikä puolestaan vaikutti negatiivisesti muihin ja siten projektin etenemiseen ja ilmapiiriin. Projektin mielenkiintoisuus ja tavoite kuitenkin lisäsivät motivaatiota riittävästi, että kaikki osa-alueet tulivat valmiiksi, tavalla tai toisella. Motivoituneempien tekijöiden kanssa lopputulos olisi kuitenkin todennäköisesti ollut paljon lähempänä alkuperäistä tavoitetta.

## 3.4 Päätelmiä

Projektista saatujen kokemusten perusteella Arduino on helppokäyttöinen ja joustava pohja säätöjärjestelmälle. Eri osien liittäminen ja ohjelmointi on helppoa ja Arduinon suuren suosion takia myös apua ongelmiin löytyy helposti. Kaupallisiin lopputuotteisiin Arduinoa ei sellaisenaan ole järkevää käyttää, mutta tuotekehitystä sen avulla voidaan nopeuttaa. Sulautettujen järjestelmien opettelemiseen se sopii erinomaisesti.

Kantosiipiveneen säätöjärjestelmän kehittäminen tekemällä säätöteorian mukainen ohjelmisto Arduinoon käyttäen alkuarvoina pelkkiä olettamuksia, ja sen jälkeen toiminnan testaaminen, ei kuitenkaan ole oikea etenemistapa. Ensin pitäisi kerätä mittadataa ja analysoida sitä, minkä jälkeen säädössä käytettä-

viä parametreja ei tarvitsisi yksinomaan arvailla. Testaamista ei myöskään pitä tehdä liian myöhään, jolloin tarvittavien muutosten tekemiseen ei jää riittävästi aikaa, vaan aikaisimmassa mahdollisessa vaiheessa. Lisäksi säätöä ei tulisi tehdä puhtaasti reaktiiviseksi, vaan kannattaisi ottaa järjestelmän itsensä tekemien säätötoimenpiteiden tulevat vaikutukset huomioon, jolloin säätö olisi osittain prediktiivinen ja siten nopeampi, tarkempi ja värähtelemättömämpi.

Säätöjärjestelmän elektroniikka toimi kaikissa vaiheissa hyvin suolaveden kotelottomalle prototyypille aiheuttamia häiriöitä ja lopullisen järjestelmän vesivahinkoa lukuun ottamatta, joten vaikka kaikkia tavoitteita ei saavutettukaan, tulkitsen oman osuuteni projektista onnistuneeksi.

## LÄHTEET

Analog Devices. 2016. ADXL345 Datasheet Rev. E. Saatavissa: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf> [viitattu 1.5.2016].

Arduino verkkosivusto. Saatavissa: <http://www.arduino.cc> [viitattu 8.10.2015].

Atmel Corporation. 2014. Atmel-2549Q-AVR-ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V-Datasheet 02/2014. Saatavissa: [http://www.atmel.com/images/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf) [viitattu 1.5.2016].

Bosch Sensortec GmbH. 2011. BMP085 Data sheet Rev. 1.3. Saatavissa: <http://dl.nmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Pressure/BST-BMP085-DS000-06.pdf> [viitattu 4.6.2016]

Fastrax Ltd. 2005. uPatch100 GPS Receiver Technical Interface Description Rev 3.2. Saatavissa: [http://www.trtdigital.ca/images/upatch100/uPatch100\\_Interface\\_Description\\_3\\_2.pdf](http://www.trtdigital.ca/images/upatch100/uPatch100_Interface_Description_3_2.pdf) [viitattu 16.4.2016].

GY-80 piirikaavio. Tuntematon. Saatavissa: <http://www.haoyuelectronics.com/Attachment/GY-80/GY-80-ARDUINO.zip> [viitattu 5.6.2016]

Honeywell International Inc. 2013. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L Rev. E. Saatavissa: [http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense\\_Brochures-documents/HMC5883L\\_3-Axis\\_Digital\\_Compass\\_IC.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf) [viitattu 4.6.2016]

Kontronik + Sobek Drives GmbH. Kosmik 160 HV kuva. Saatavissa: <http://www.kontronik.com/fileadmin/kontronik-sobek/Public/Content/Images/Content/Produkte/kosmik.jpg> [viitattu 5.6.2016]

MaxBotix Incorporated. 2012. HRXL-MaxSonar®-WR™ Series Data sheet. Saatavissa: [http://www.maxbotix.com/documents/HRXL-MaxSonar-WR\\_Datasheet.pdf](http://www.maxbotix.com/documents/HRXL-MaxSonar-WR_Datasheet.pdf) [viitattu 17.5.2016].

MaxBotix Incorporated. MaxBotix HRXL kuva. Saatavissa: <http://www.maxbotix.com/pictures/HRXL-WR/High-Resolution-Pictures.zip> [viitattu 17.5.2016]

Philips Semiconductors. 2002. PCF8574 Data sheet. Saatavissa: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/PCF8574.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PCF8574.pdf) [viitattu 12.4.2016].

SainSmart verkkosivusto. SainSmart Sensor Shield V2. Saatavissa: <http://www.sainsmart.com/sainsmart-sensor-shield-v2-for-arduino-mega-2560-r3-1280-iic-bluetooth-lcd-sd-io.html> [viitattu 14.4.2016].

Shenzhen xq-power Model Electronics Co., Ltd. S5040D tuotesivu. Saatavissa: [http://www.xq-power.com/XQ-S50/show\\_90.html](http://www.xq-power.com/XQ-S50/show_90.html) [viitattu 30.5.2016]

SparkFun Electronics. SparkFun Triple Axis Accelerometer Breakout - ADXL345 –verkkosivu. Saatavissa: <https://www.sparkfun.com/products/9836> [viitattu 1.5.2016].

STMicroelectronics. 2010. L3G4200D Datasheet Rev. 3. Saatavissa:  
<http://www.st.com/resource/en/datasheet/l3g4200d.pdf> [viitattu 4.6.2016]

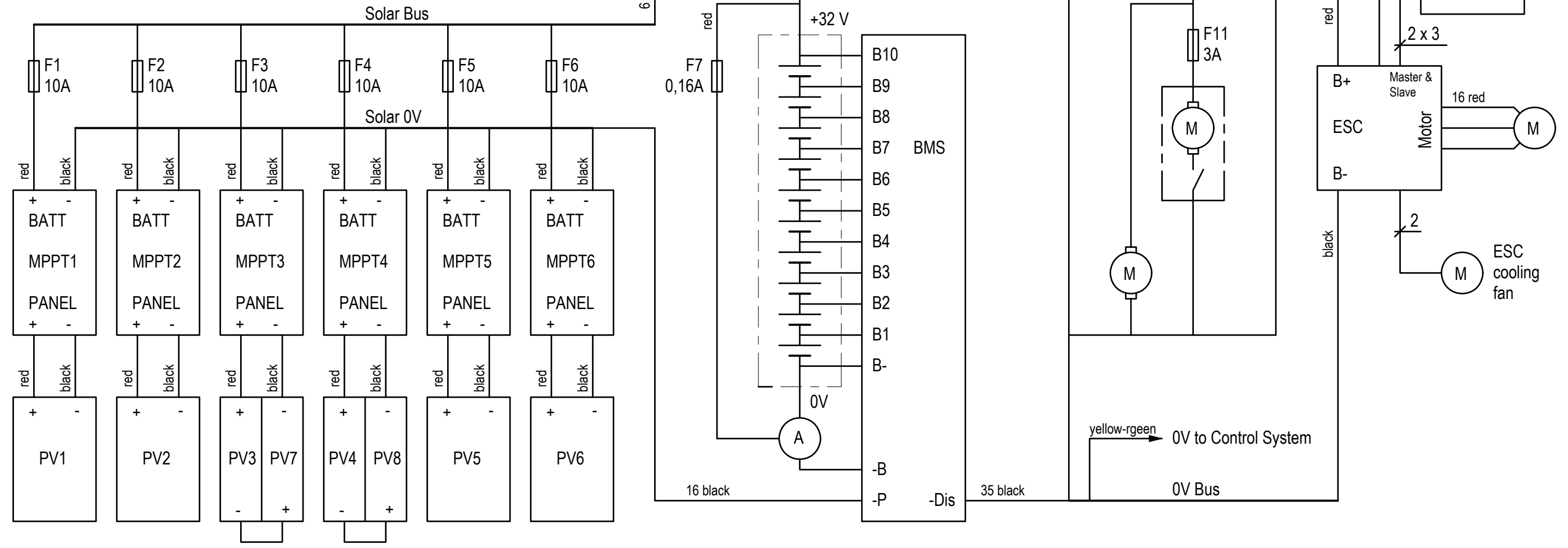


RevNo	Revision note	Date	Signature	Checked
A	Added side solar panels PV7, PV8	23.6.2014	TH	

Liite 1

ITEMS	Power (W)	Voltage (V)	Current (A)	Fuse (A)	Wire (mm2)
Solar Panel*	290	34	8	*	2,5
MPPT	290	36,5	8	10	2,5
Battery	4000	32	125	150	35
BMS**	-	32	125	**	35
ESC	-	32	125	150	35
Motor	4000	32	72	-	16

\* Panel and MPPT in series  
 \*\* BMS and Battery in series



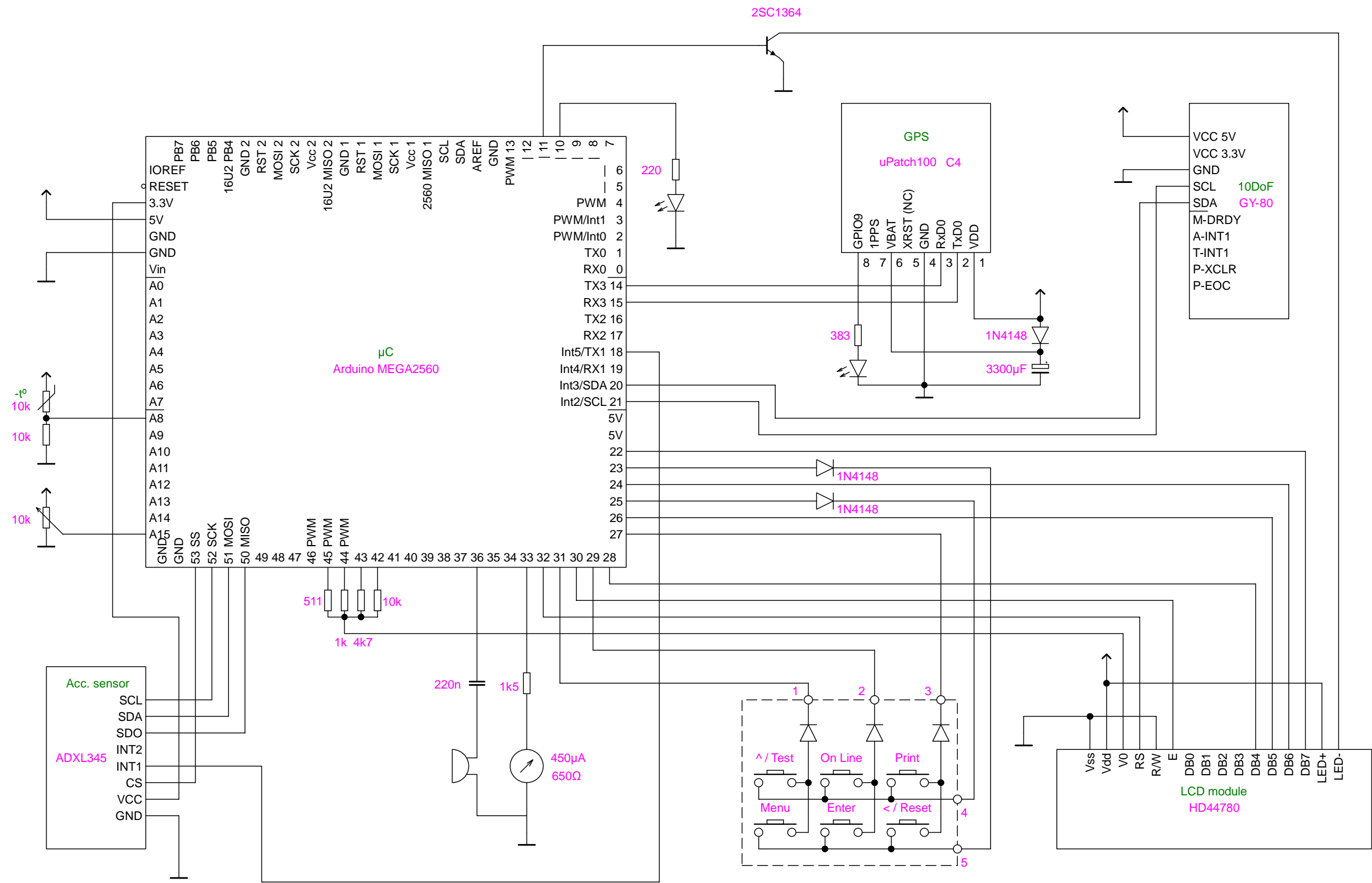
Solar panels and Maximum power point trackers

- Battery energy meter
- 10x3.2 V LiFePo4 Battery
- Battery management system
- DC/DC Converter
- Battery cooling fan
- Bilge pump
- ESC Motor Controller
- Comm. modules
- Drive motor

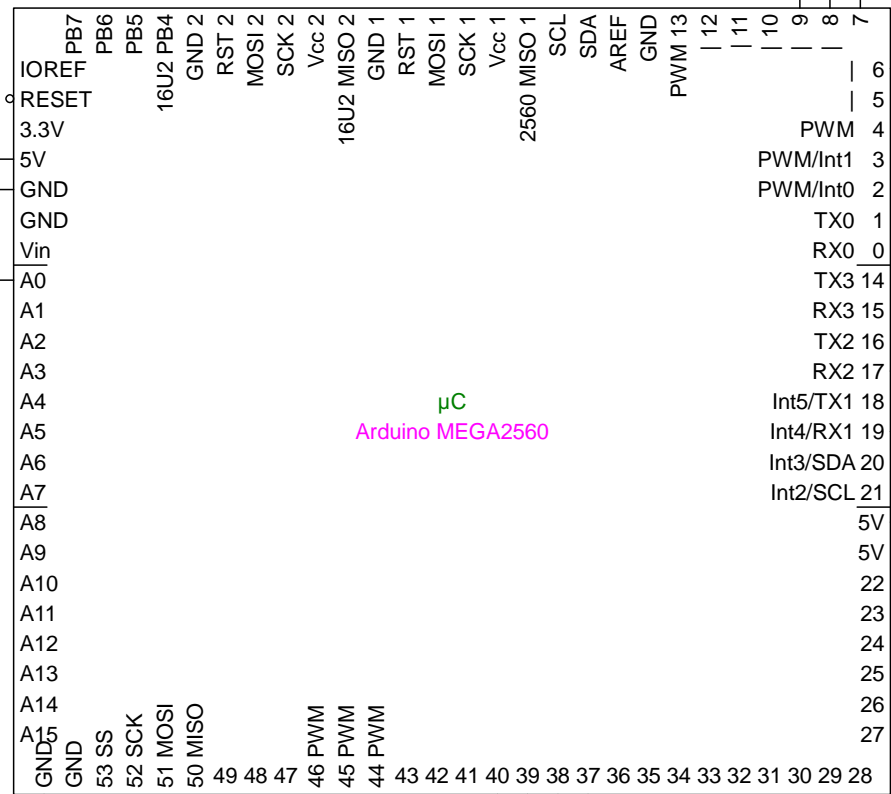
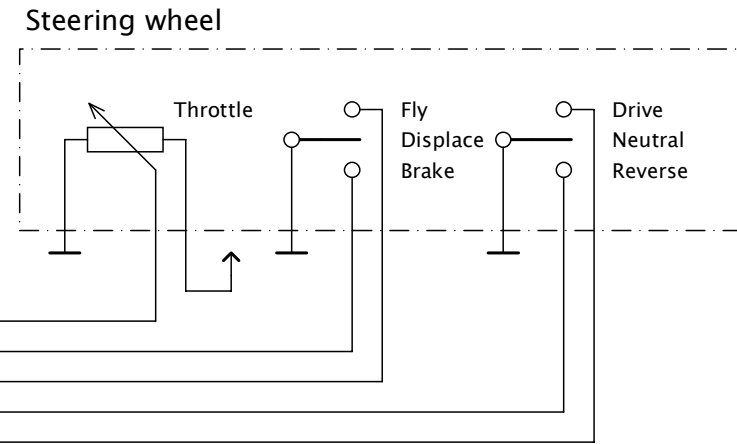
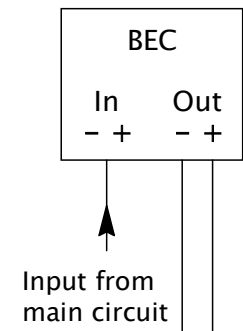
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by Terho Halme	Checked by -	Approved by - date -	File name XXX
Date 23.6.2014			Scale
Edition 0		Sheet 1/1	

**MIDNIGHT SUN KYAMK  
 TOP-CLASS SOLARBOAT**

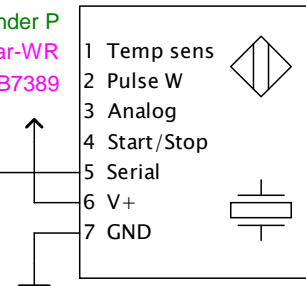
**MAIN CIRCUIT DIAGRAM  
 MSF2-006**



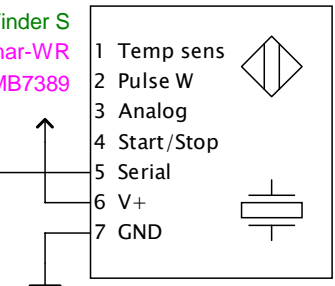
Responsible dep.	Technical reference	Created <b>Esa Mankki</b>	Approved		
		Document type	Document status		
		Title, supplementary title <b>MSF2 Control System Prototype, Main Unit</b>	<b>MSF2-101</b>	Rev.	
		Date of issue <b>17.5.2016</b>	Lang. <b>En</b>	Sheet <b>1/2</b>	



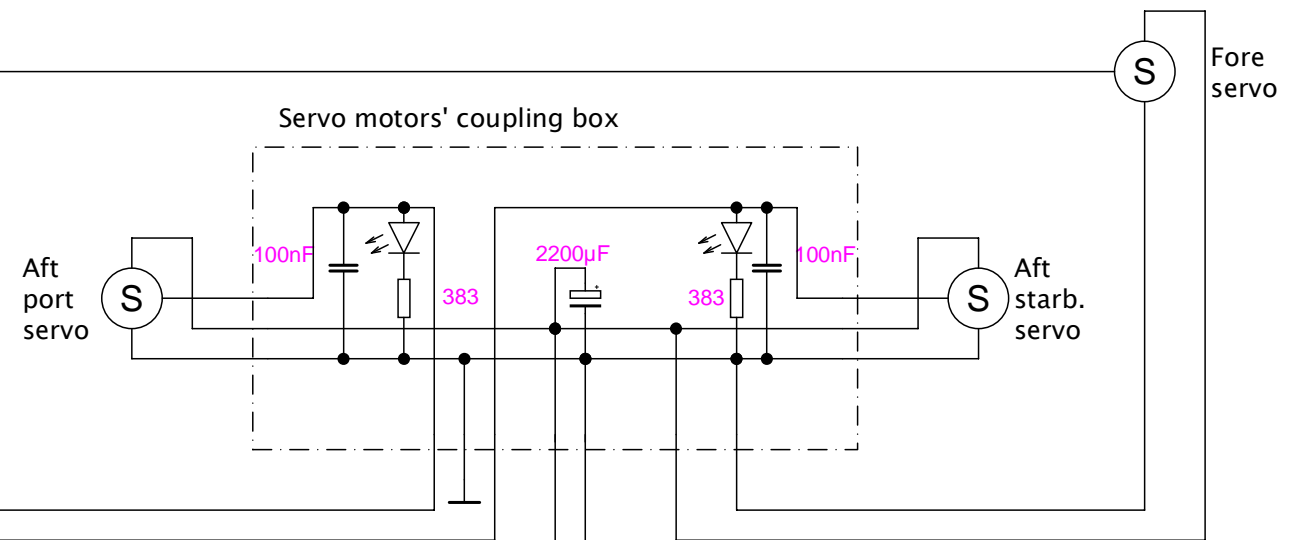
Ultras. Range Finder P  
HRXL-MaxSonar-WR  
MB7389



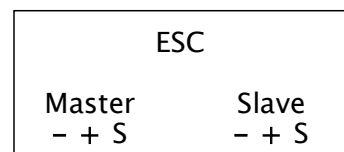
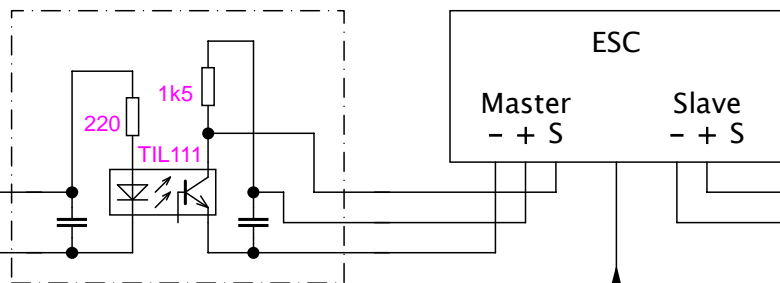
Ultrasonic Range Finder S  
HRXL-MaxSonar-WR  
MB7389



Servo motors' coupling box



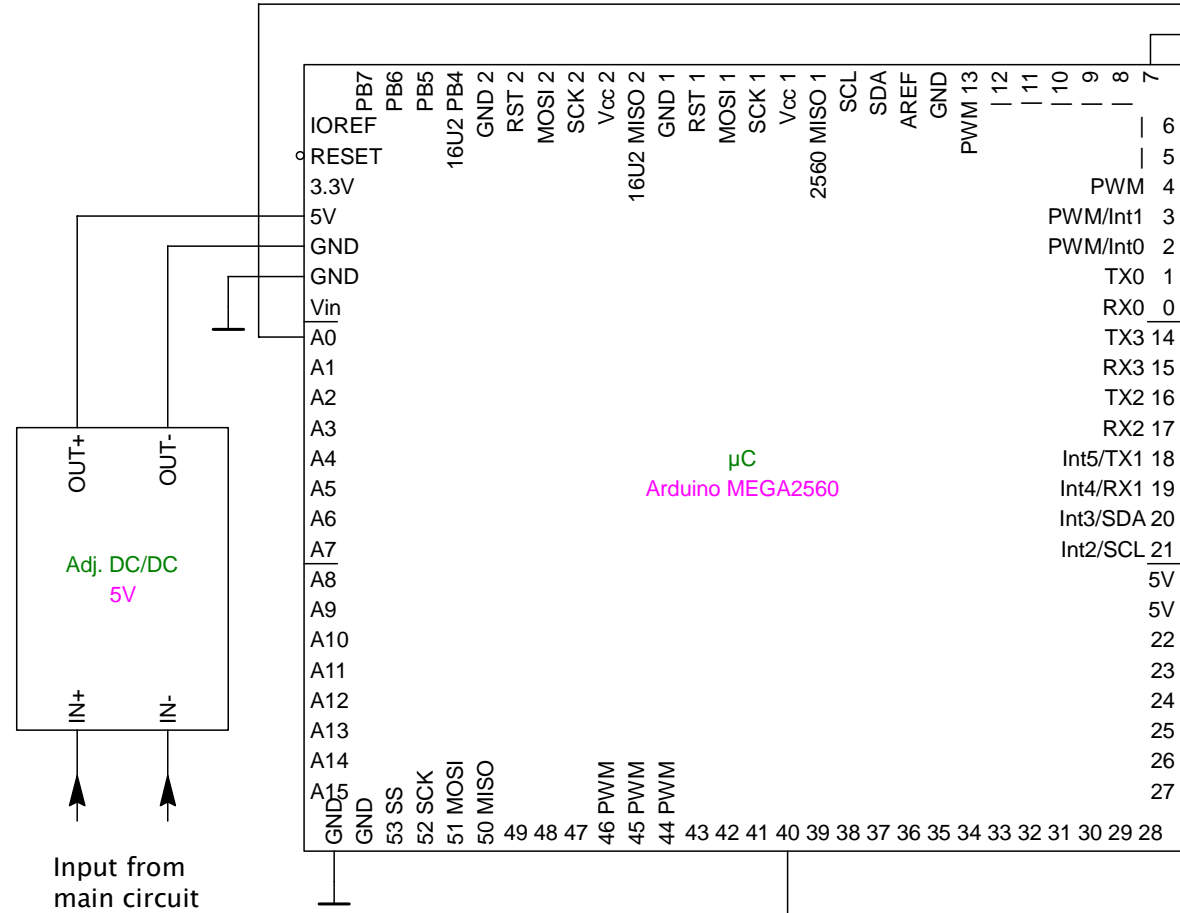
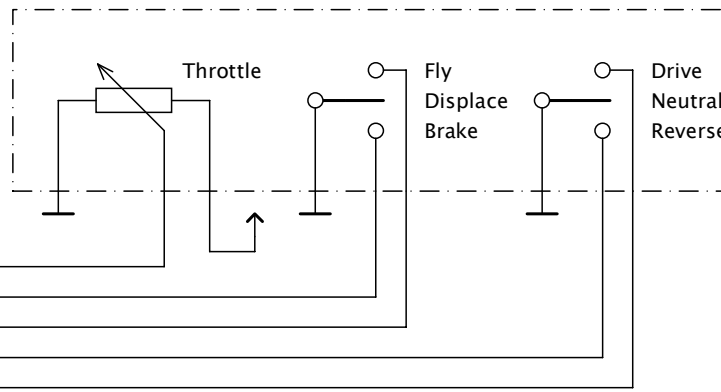
ESC optocoupling



Input from main circuit

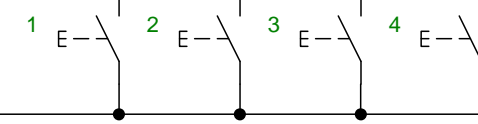
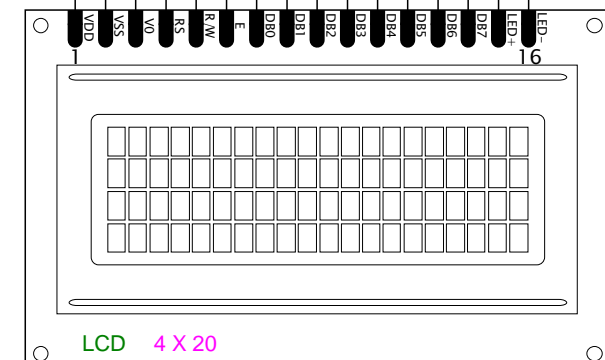
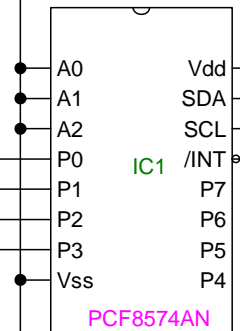
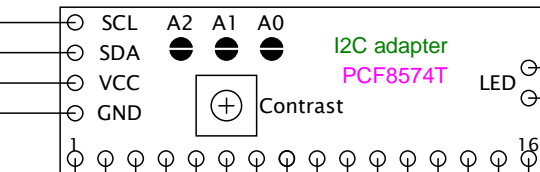
Responsible dep.	Technical reference	Created <b>Esa Mankki</b>	Approved	
		Document type	Document status	
		Title, supplementary title <b>MSF2 Control System Prototype, External Circuit</b>	<b>MSF2-102</b>	Rev.
		Date of issue <b>17.5.2016</b>	Lang. <b>En</b>	Sheet <b>2/2</b>

Steering wheel

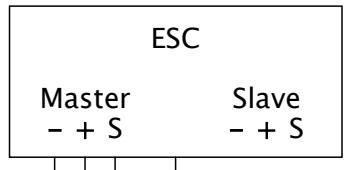
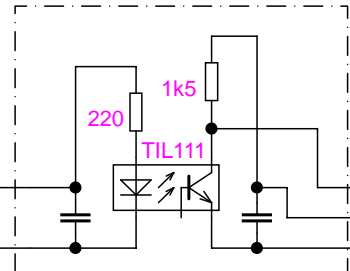


Input from main circuit

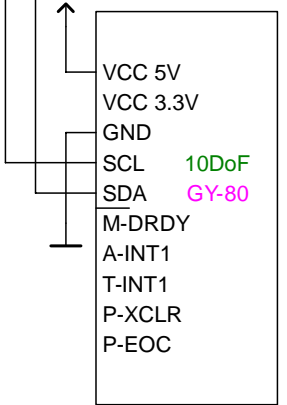
µC  
Arduino MEGA2560



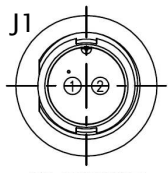
ESC optocoupling



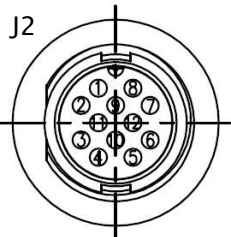
Input from main circuit



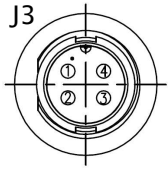
Responsible dep.	Technical reference	Created <b>Esa Mankki</b>	Approved	
		Document type	Document status	
		Title, supplementary title <b>MSF2 Control System Final Version</b>	<b>MSF2-103</b> Date of issue <b>17.5.2016</b>	Rev. Lang. <b>En</b> Sheet <b>1/1</b>



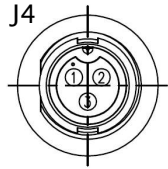
PIN ASSIGNMENTS  
FRONT VIEW



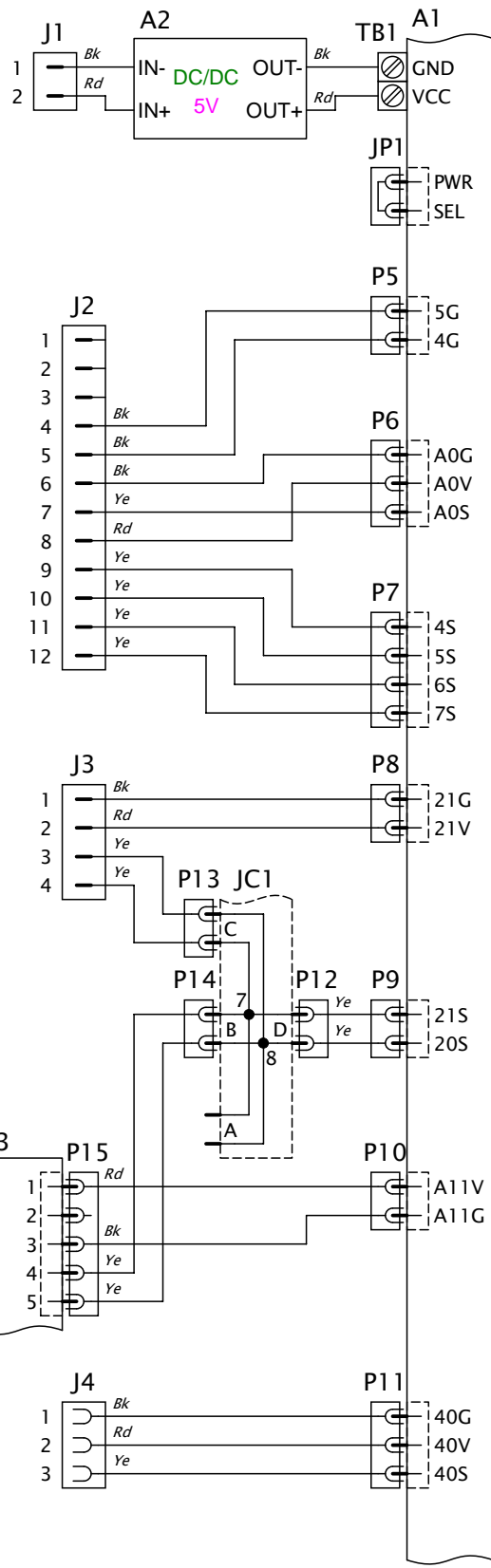
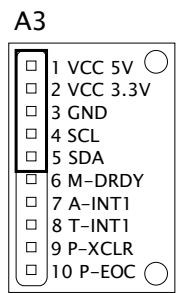
PIN ASSIGNMENTS  
FRONT VIEW



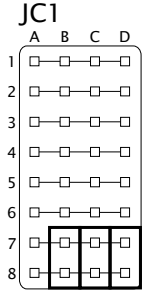
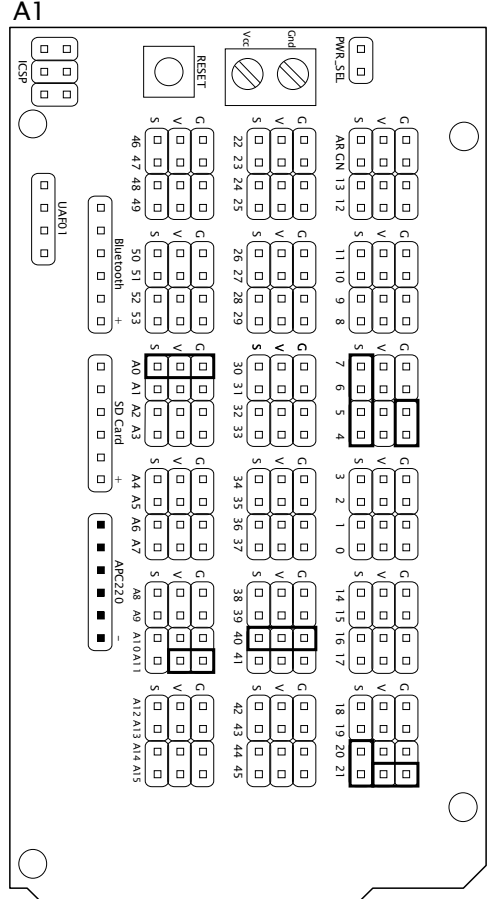
PIN ASSIGNMENTS  
FRONT VIEW



PIN ASSIGNMENTS  
FRONT VIEW

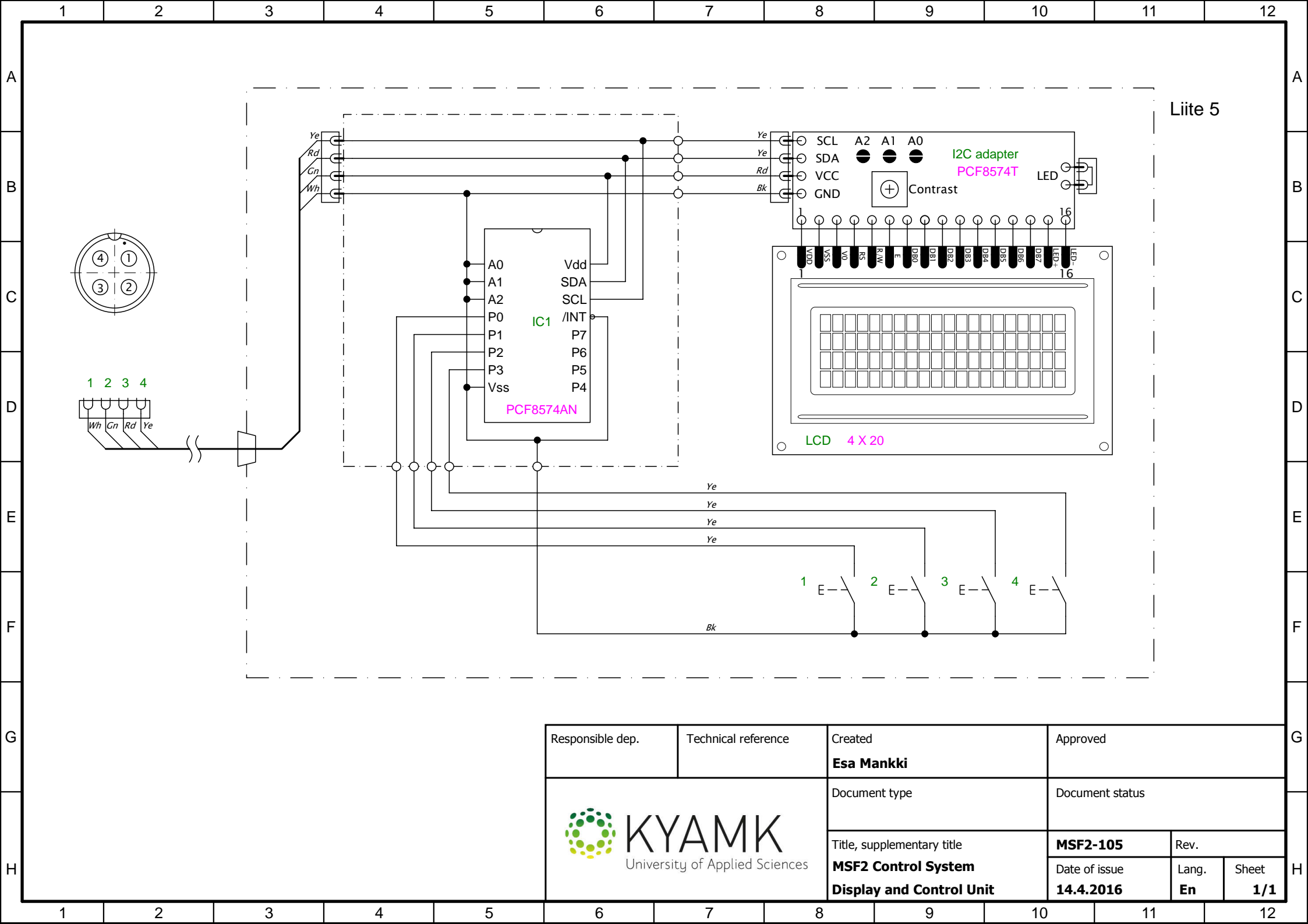


Liite 4




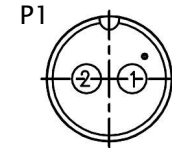
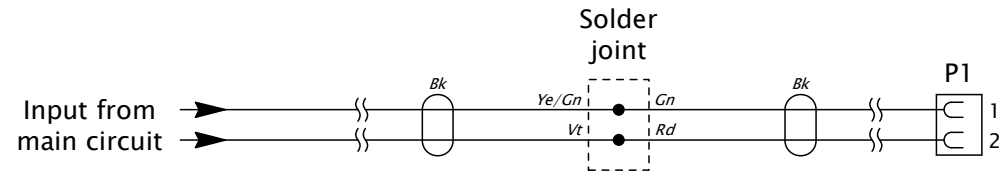
- A1 MEGA sensor shield v2.0
- A2 DC/DC converter
- A3 GY-80 sensor module
- J1 Power connector
- J2 Steering wheel connector
- J3 Display unit connector
- J4 Motor controller connector
- JC1 Joint connector

Responsible dep.	Technical reference	Created <b>Esa Mankki</b>	Approved	
		Document type	Document status	
		Title, supplementary title <b>MSF2 Control system Main unit Internal wiring schematic</b>	<b>MSF2-104</b>	Rev.
		Date of issue <b>12.5.2016</b>	Lang. <b>En</b>	Sheet <b>1/1</b>

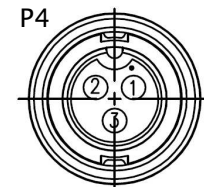
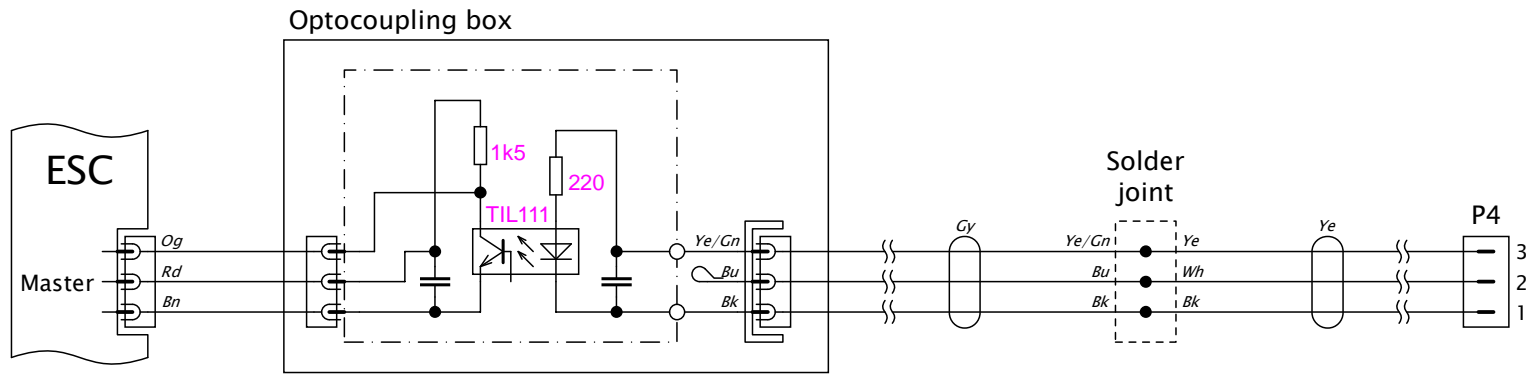


Liite 5

Responsible dep.	Technical reference	Created <b>Esa Mankki</b>	Approved	
		Document type	Document status	
		Title, supplementary title <b>MSF2 Control System</b>	<b>MSF2-105</b>	Rev.
		<b>Display and Control Unit</b>	Date of issue <b>14.4.2016</b>	Lang. <b>En</b>




Pin assignments front view



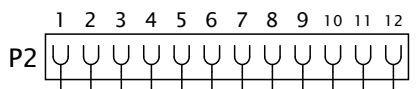
Pin assignments front view

P1 Power connector  
P4 Motor controller connector

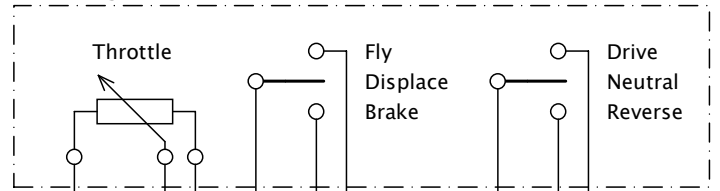
To control system main unit

Responsible dep.	Technical reference	Created <b>Esa Mankki</b>	Approved		
		Document type	Document status		
		Title, supplementary title <b>MSF2 Control system</b>	<b>MSF2-106</b>	Rev.	
		<b>Power and ESC wiring</b>	Date of issue <b>23.5.2016</b>	Lang. <b>En</b>	Sheet <b>1/1</b>

To control system main unit

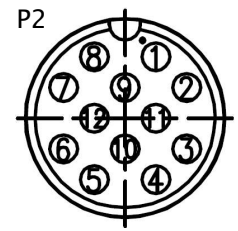
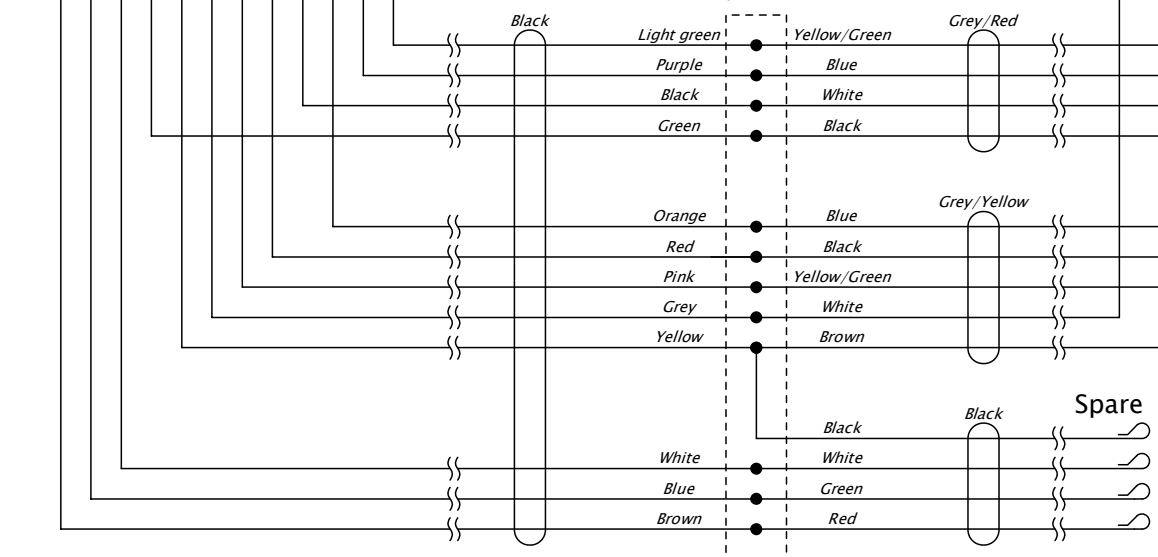


Steering wheel



Liite 7

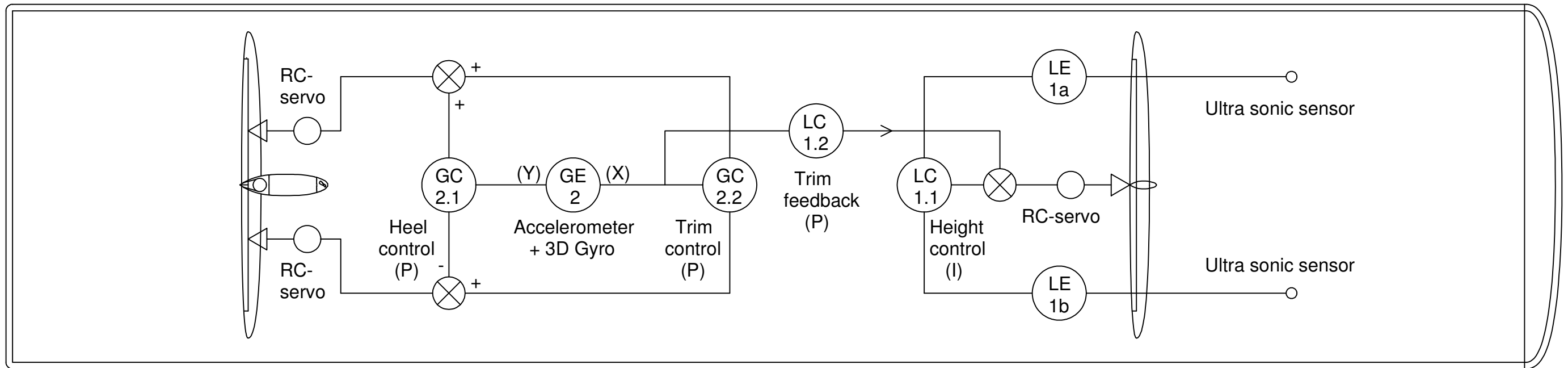
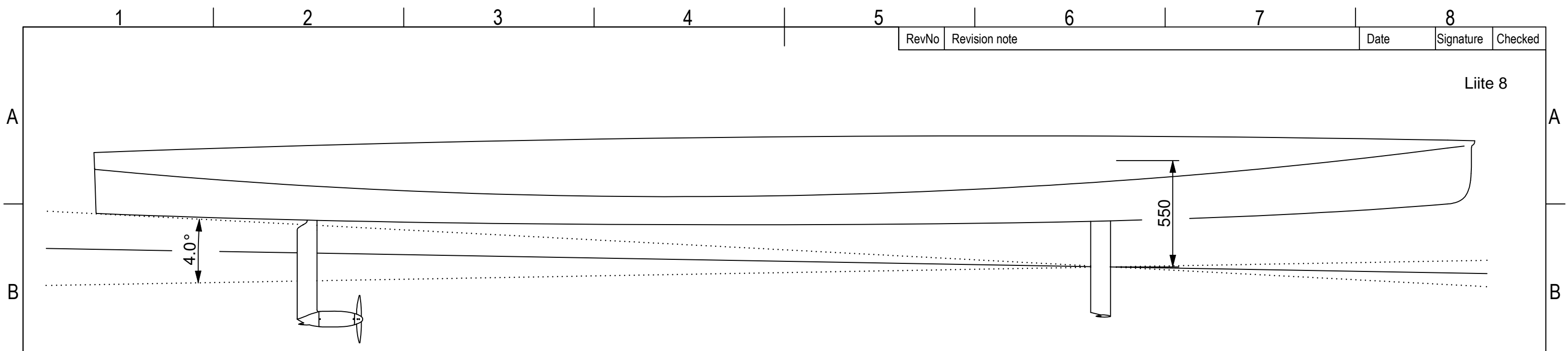
Solder joint



Pin assignments front view

Responsible dep.	Technical reference	Created <b>Esa Mankki</b>	Approved	
		Document type	Document status	
		Title, supplementary title <b>MSF2 Control system</b>	<b>MSF2-107</b>	Rev.
		<b>Steering wheel wiring</b>	Date of issue <b>20.05.2016</b>	Lang. <b>En</b>





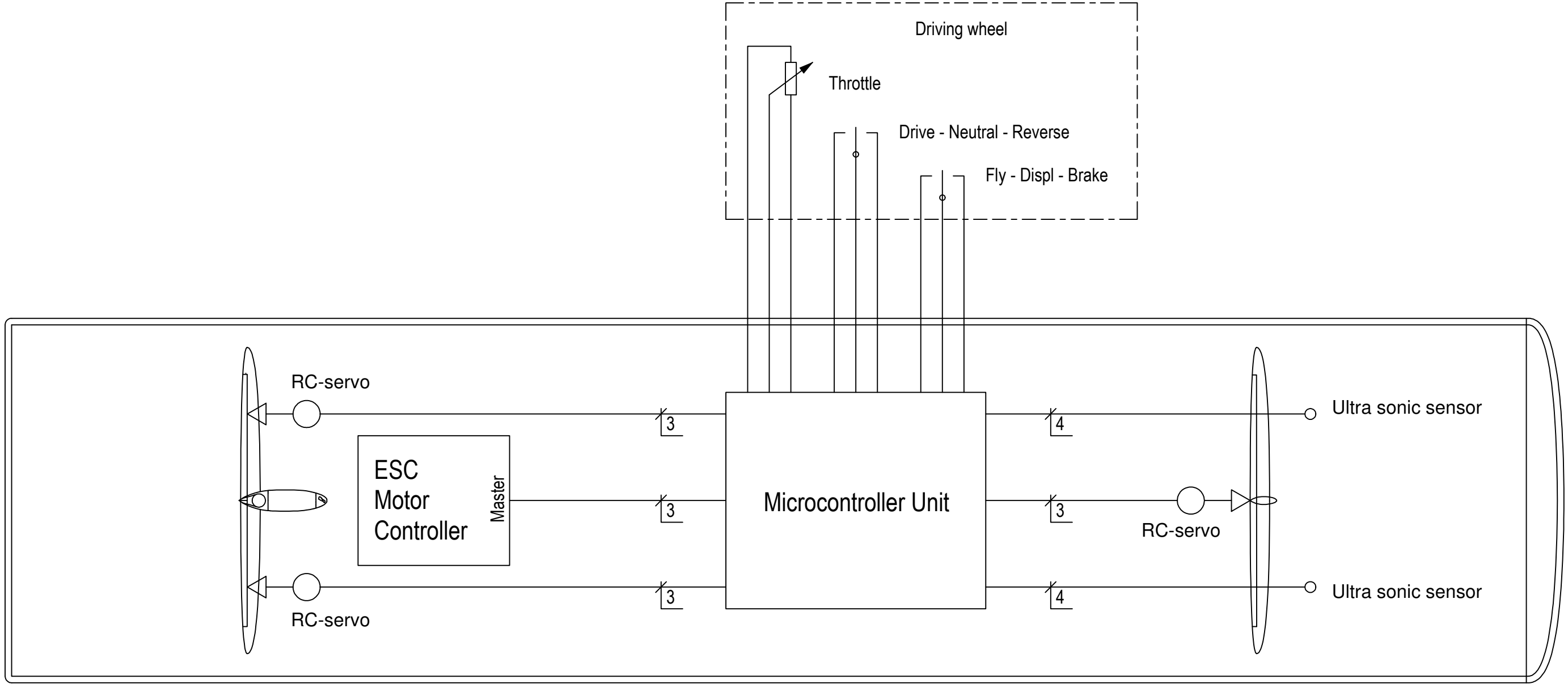
Heel Control GC-2.1  
P-control mode  
Proportional range: -10...+10 degree  
Set value: 0 degree  
Flap angle: -6...+12 degree  
Kp =

Trim Control GC-2.2  
P-control mode  
Proportional range: -1...+3 degree  
Set value: 1,0 degree  
Flap angle: -6...+12 degree  
Kp =

Trim Feedback LC-1.2  
P-control mode  
Trim angle: -1...+3 degrees  
Set value: 1,0 degree  
Flap angle: -1,6 x Trim angle  
Kp =

Height Control LC-1.1  
I-control mode  
Measure range: 300...5 000 mm  
Set value: 550 mm  
Flap angle: -6...+12 degree  
Ki =

Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference		
Designed by Terho Halme	Checked by -	Approved by - date -	File name XXX	Date 3.5.2014	Scale
MIDNIGHT SUN KYAMK TOP-CLASS SOLARBOAT			HYDROFOIL CONTROL		
			MSF2-009	Edition 0	Sheet 1/1



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference		
Designed by Terho Halme	Checked by _	Approved by - date _	File name XXX	Date 24.4.2014	Scale
MIDNIGHT SUN KYAMK TOP-CLASS SOLARBOAT			CONTROL CIRCUIT DIAGRAM		
			MSF2-007	Edition 0	Sheet 1/1

A

A

B

B

C

C

D

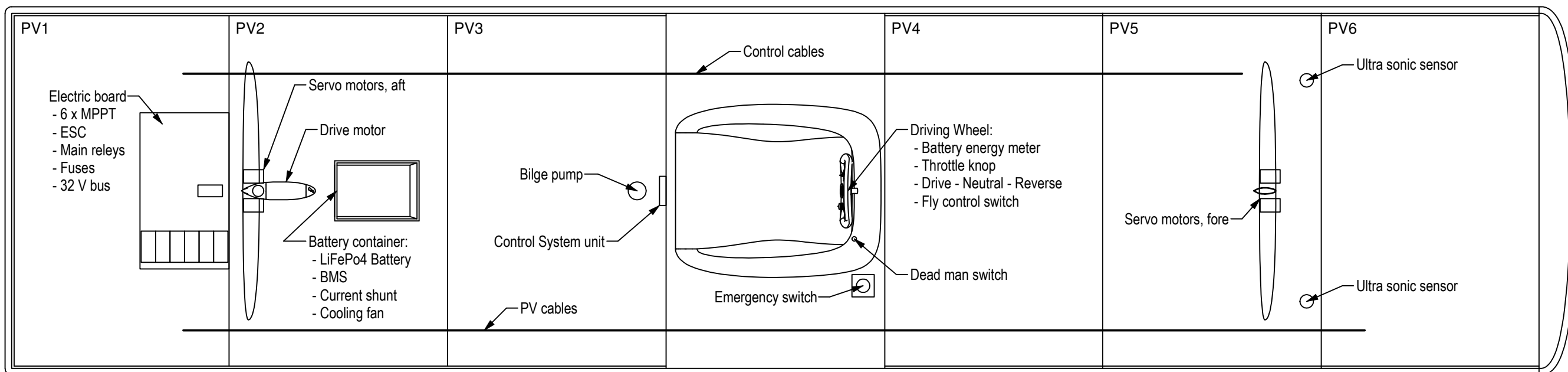
D

E

E

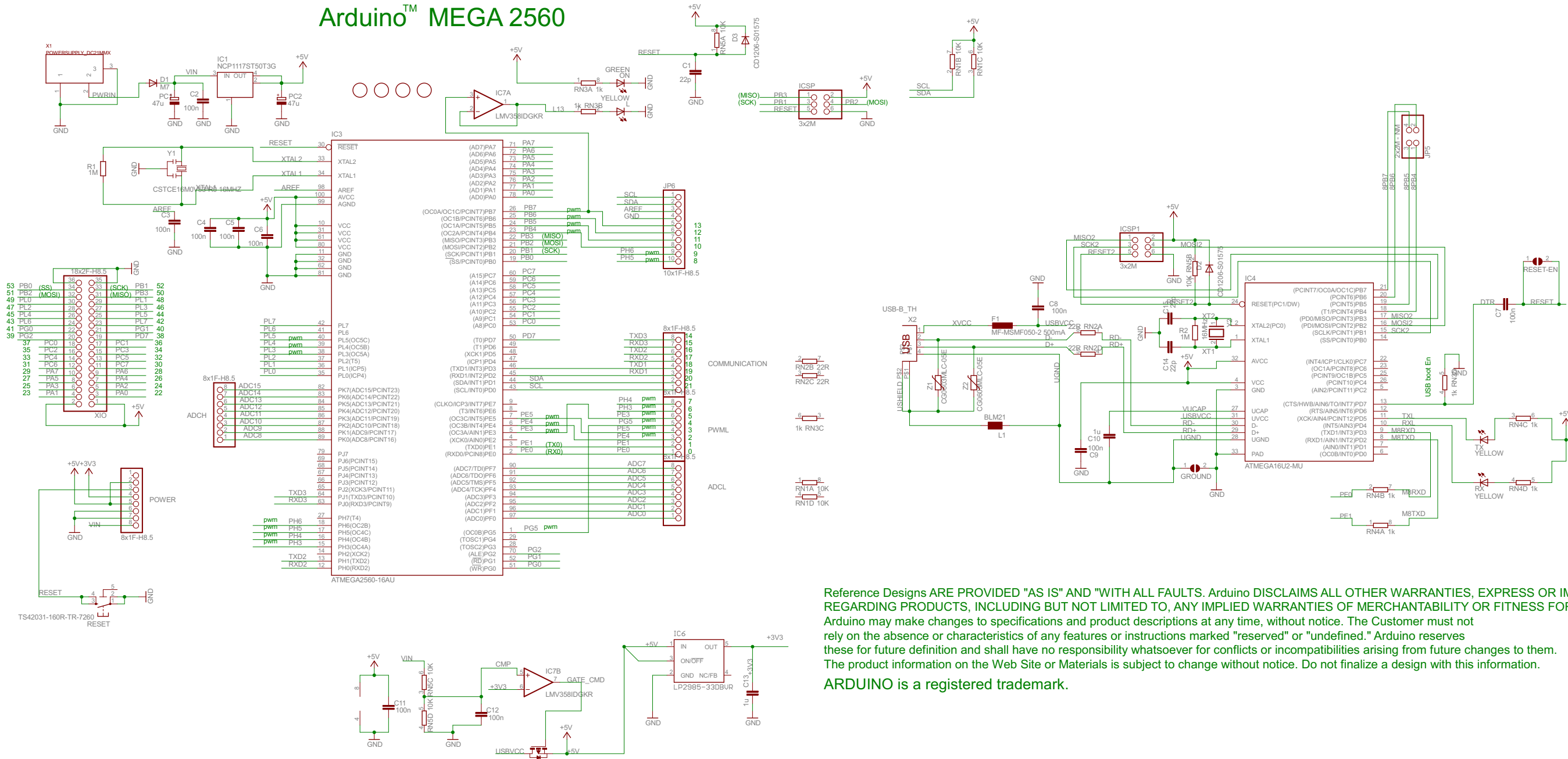
F

F



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference		
Designed by Terho Halme	Checked by _	Approved by - date _	File name _	Date 12.5.2014	Scale 1:20
MIDNIGHT SUN KYAMK TOP-CLASS SOLARBOAT			INSTALLATION LAYOUT		
			MSF2-008	Edition 0	Sheet 1/1

# Arduino™ MEGA 2560



Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS. Arduino DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information. ARDUINO is a registered trademark.

GY-80 Inertial Measurement Unit Schematic

