



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JARI-PEKKA KOSKINEN
KORKEAPAINEMAALIRUIKUN OHJAUSELEKTRONIIKAN
SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Diplomityö

Tarkastaja: Pekka Ruuskanen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan
tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 3. lokakuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

KOSKINEN, JARI-PEKKA: Korkeapainemaaliruiskun ohjauselektronikan suunnittelu ja toteutus

Diplomityö, 56 sivua

Kesäkuu 2015

Pääaine: Elektroniikka

Tarkastaja: Pekka Ruuskanen

Avainsanat: Elektroniikka, Piirilevyn suunnittelu, mikroprosessoritekniikka, moottorinohjaus, ohjelmointi

Korkeapainemaaliruisku on rakennustekniikassa käytettävä maaliruisku, jonka toimintaperiaate on nostaa mäntäpumpulla maalia järjestelmään sekä pitää haluttu työskentelypaine. Mäntäpumpun voimanlähteenä toimii sähkömoottori, jota ohjataan erillisellä ohjauselektronikalla.

Diplomityön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa elektroninen ohjausjärjestelmä *Larius*-merkkiselle kaupalliselle maaliruiskulle, jonka ohjauselektronikka oli rikkoutunut. Suunnittelun tavoitteena oli modernisoida järjestelmä toteuttamalla elektroniikka mikrokontrolleripohjaiseksi ratkaisuksi, jonka paineen takaisinkytkentätietona käytetään paineanturia painekeytkimen sijaan.

Diplomityössä suunniteltiin piirikaaviot ja piirilevyjen johdinkuviot sekä mikrokontrollerin ohjelmisto. Työssä pohdittiin myös erilaisten lisäominaisuuksien lisäämistä järjestelmään, kuten esimerkiksi langatonta käyttäjärajapintaa Bluetooth tekniikkaa käyttäen.

Suunnitellut piirilevyt valmistettiin piirilevynvalmistusyrityksessä, mutta piirilevyt kalustettiin käsityönä. Piirilevyille ja ohjelmiston logiikalle tehtiin toiminnalliset testit ja järjestelmä todettiin toimivaksi ohjauselektronikan osalta. Toiminnalliset testit tehtiin testausympäristössä, jossa simuloitiin takaisinkytkentätietoa ja moottoria ohjaavaa PWM virtasignaalin taajuutta mitattiin yleismittarilla.

Moottoria ohjaavan tehoelektronikan testejä ei työssä toteutettu, joten varsinaisen maalausjärjestelmän toiminnallisuuden testausta ei suoritettu.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Program in Electronics

KOSKINEN, JARI-PEKKA: Design and implementation of airless paint spray unit control system

Master of Science Thesis, 56 pages

June 2015

Major: Electronics

Examiner: Pekka Ruuskanen

Keywords: Electronics, PCB design, microprocessors, motor control, programming

A high pressure airless paint spray system is generally used in construction technology. The main working principle is to use a piston pump to pump paint into the system and simultaneously maintain the wanted working pressure in the system. The power source for the piston pump is an electric motor which is controlled by separate control system.

The objective of the Thesis Work was to design and implement a new electronic control system to a *Larius* airless paint spray system. The ambition in this design was to modernize the system by using electronic microcontroller technology and an analog pressure sensor instead of pressure switch in the feedback system.

Circuit diagrams, layout diagrams and software were designed in the course of Thesis Work. The Thesis Work also included an investigation of possible new features which might be added to the system to increase its functionality, for example a wireless remote control system based on Bluetooth technology.

The designed printed circuit boards were produced in the printed circuit manufacturing company but the component mounting was handled by hand. Functionality tests were made to the final printed circuit boards and to the software establish that the system was functioning within its design parameters. Functionality tests were also made in a test environment where feedback signal information was simulated and the frequency of the motor control PWM signal was measured by a multi meter.

The tests did not include a connection any high power systems, therefore testing of the whole painting system was not performed.

ALKUSANAT

Uskomatonta! Kirjoitan alkusanoja diplomityöhön.

Tämä lähes neljän vuoden urakka on vihdoin pääsemässä elinkaarensa päähän. Väliin on mahtunut niin pettymyksiä ja epätoivon hetkiä kuin onnistumisen riemuja. Mutta onnistuminen koko projektissa pistää unohtamaan kaikki ne huonot ajat.

Haluaisin kiittää ohjaavaa professoriani Pekka Ruuskasta, joka kärsivällisyydellään on antanut uskoa työn tekemiseen. Kiitoksen ansaitsee myös Teemu Kumpumäki, joka toimi alkuvaiheessa työn toisena ohjaajana ja auttoi tarpeen vaatiessa allekirjoittaneen oikeille raiteille.

Erityiskiitoksen ansaitsee avopuoliso Tiina Mäkelä, joka aina jaksoi uskoa tekemisiini. Kiitos myös kaikille kavereille, jotka tukivat minua!

Raumalla 7.4.2015

SISÄLLYS

| | |
|---|-----|
| Tiivistelmä | II |
| Abstract | III |
| Alkusanat | IV |
| Termit ja niiden määritelmät | VII |
| 1. Johdanto | 1 |
| 2. Teoria | 2 |
| 2.1. Mäntätoimisen maaliruiskun rakenne..... | 2 |
| 2.2. Tasasähkömoottorin käyttö | 2 |
| 2.2.1. Sähkömoottorikäytön määritelmä | 2 |
| 2.2.2. Sähkömoottorikäytön prosessi | 3 |
| 2.2.3. Tasasähkömoottori | 4 |
| 2.3. Elektroniikan komponentit | 6 |
| 2.3.1. Mikrokontrolleri | 6 |
| 2.3.2. Seitsemän segmentti led- näyttö..... | 8 |
| 2.3.3. Muuntaja | 9 |
| 2.3.4. Jänniteregulaattori | 10 |
| 2.3.5. IGBT transistori ja sen ohjaus..... | 11 |
| 2.3.6. Optoerotin | 14 |
| 2.3.7. Tasasuuntaaja | 15 |
| 2.4. Magnetoidun tasasähkömoottorin ohjaus mikrokontrollerilla..... | 18 |
| 2.5. Mitattavat suureet ja niiden anturointi..... | 19 |
| 2.5.1. Anturointi | 19 |
| 2.5.2. Paine ja sen mittaus | 19 |
| 2.5.3. Lämpötila ja sen mittaus | 22 |
| 2.6. Tiedonsiirtostandardit..... | 24 |
| 2.6.1. RS-232 | 24 |
| 2.6.2. Bluetooth..... | 26 |
| 3. Toteutus..... | 28 |
| 3.1. Maalausjärjestelmän toimintaperiaate | 28 |
| 3.1.1. Hallintapaneeli | 29 |
| 3.1.2. Kontrollyksikkö | 29 |
| 3.1.3. Tehoyksikkö..... | 30 |
| 3.1.4. Moottori, pumppu ja maalauspistooli | 32 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1.5. | Paineanturi MSP350 | 32 |
| 3.1.6. | Etäohjausyksikkö | 33 |
| 3.2. | Piirilevyjen suunnittelu ja toteutus | 34 |
| 3.2.1. | Piirikaavion suunnittelu | 34 |
| 3.2.2. | Johdikuvioiden suunnittelu | 35 |
| 3.2.3. | Piirilevyjen valmistus | 38 |
| 3.2.4. | Piirilevyjen komponentit ja kalustus | 39 |
| 3.2.5. | Ohjelmointi ja sen prosessikaaviot | 39 |
| 4. | Testaus ja tulokset | 46 |
| 4.1. | Testauksen suunnittelu | 46 |
| 4.2. | Toiminnan testaus | 46 |
| 4.2.1. | Analogiatulon toiminta | 47 |
| 4.2.2. | Näytön tulostuksen toiminta | 48 |
| 4.2.3. | Painonappien toiminta | 50 |
| 4.2.4. | PWM lähdön toiminta | 51 |
| 4.2.5. | Yhdistetty automatisoitu toiminta | 53 |
| 5. | Johtopäätökset | 56 |
| | Lähteet | 57 |
| | Liitteet | 59 |

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

| | |
|-----------|---|
| ATMega644 | Atmel Avr Mikrokontrollerivalmistajan kontrollerityyppi |
| AVR | Mikrokontrolleri valmistaja Atmelin mikrokontrollerimalli |
| BJT | Bipolar Junction Transistor |
| C | Transistorin Kollektori eli <i>Collector</i> |
| DCE | Sarjaliikennekommunikaation kommunikointilaite: <i>Data Circuit terminating Equipment</i> |
| DTE | Sarjaliikennekommunikaation päätelaite: <i>Data Terminal Equipment</i> |
| E | Transistorin Emitteri |
| EIA | Toimialajärjestäjä Electronic Industries Association |
| G | Transistorin Hila eli <i>Gate</i> |
| I/O | Lyhenne sanoista <i>input</i> ja <i>output</i> . Kuvaa analogista tai digitaalista tuloa tai lähtöä |
| IGBT | Transistorityyppi: <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> |
| LAN | Lähiverkko: <i>Local Area Network</i> |
| LED | Valodiodi eli <i>Light Emitting Diode</i> |
| MOSFET | Transistorityyppi: <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> |
| NPN | Transistorityyppi, joka on dopattu P tyypin puolijohteella |
| PNP | Transistorityyppi, joka on dopattu N tyypin puolijohteella |
| PWM | Pulssinleveysmodulaatio, <i>Pulse Width Modulation</i> |
| RJ45 | Tietoliikenneporttityyppi: <i>Registered Jack</i> |

| | |
|-------|--|
| RoHS | <i>The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment.</i> Euroopan Unionin säännös, jolla rajoitetaan haitallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. |
| RS232 | <i>Recommended Standard 232,</i> Sarjamuotoinen tietoliikennestandardi |
| TQFP | Elektroniikkapintaliitoskomponentin pakkaustyyppi: <i>Thin Quad Flat Pack</i> |

1. JOHDANTO

Diplomityön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa uusi elektroninen ohjausjärjestelmä maaliruiskulle. Maaliruiskuna toimi vanha kaupallinen laite, jonka ohjauselektronikka oli rikkoutunut. Maaliruisku oli merkiltään *Larius Torpedo*, joka oli toimintaperiaatteeltaan mäntätoiminen korkeapainemaaliruisku. Maaliruisku koostui elektronikasta, jonka tehtävänä oli ohjata sähkömoottoria ja sähkömoottori toimi mäntäpumpun voimanlähteenä. Vanhan alkuperäisen järjestelmän toiminta perustui asetetun paineen ylläpitämiseen. Paineen asetus tapahtui painekeytkimen kytkentäarvoa säätämällä. Elektronikan tehtävänä oli ohjata moottoria kytkintiedon perusteella.

Uuden elektronikan suunnittelun tavoitteena oli toteuttaa mikrokontrolleripohjainen ratkaisu, jonka paineen takaisinkytkentätietona käytetään analogista paineanturia ja käyttöliittymänä toimivat painonapit sekä näyttö. Mikrokontrolleripohjainen ratkaisu mahdollisti myös langattoman käyttöliittymän sekä muiden anturointien lisäämisen järjestelmään, joita ei kuitenkaan käytännössä toteutettu vaan jätettiin tässä työssä teoria-asteelle.

Diplomityön rakenne koostuu teoriaosuudesta, toteutusosuudesta sekä testaus ja tulokset osuudesta. Teoriaosuudessa käsitellään mäntätoimisen maaliruiskun rakennetta, sähkömoottorikäyttöä, elektronikan komponentteja, mikrokontrolleriohjausta, mitattavia suureita sekä tiedonsiirtostandardeja. Toteutusosiossa käsitellään maalausjärjestelmän toimintaperiaatetta sekä piirilevyn suunnittelua ja toteutusta. Toimintaperiaateosiossa käydään läpi järjestelmän eri osat teoriatasolla. Piirilevyjen suunnittelu ja toteutus osiossa käsitellään piirikaavioiden ja piirilevyjen johdinkuvioiden suunnitteluprosessia sekä piirilevyjen valmistusta ja komponenttien kalustusta. Osiossa käydään läpi myös ohjelmointia sekä ohjelmiston rakennetta. Testaus ja tulokset osiossa käsitellään testauksen suunnittelua, raudan sekä ohjelmiston eri toimintojen testausta. Testauksen suunnitteluosiossa esitellään testauslaitteisto sekä alustetaan toiminnan testausta. Eri toiminnoista käydään läpi analogiatulon toiminta, näytön toiminta, painonappien toiminta, PWM lähdön toiminta sekä koko ohjausjärjestelmän yhdistetty automatisoitu toiminta.

Työn johtopäätöksenä voitiin todeta, että saatiin toteutettua toimiva ohjausjärjestelmä maalausjärjestelmälle. Simuloimalla saatujen testihavaintojen perusteella voitiin todeta, että asianmukaisella paineanturoinnilla ja moottoria ohjaavalla tehoelektronikalla yhdistettynä suunniteltuun ohjausjärjestelmään, saatiin toimiva kokonaisuus.,

2. TEORIA

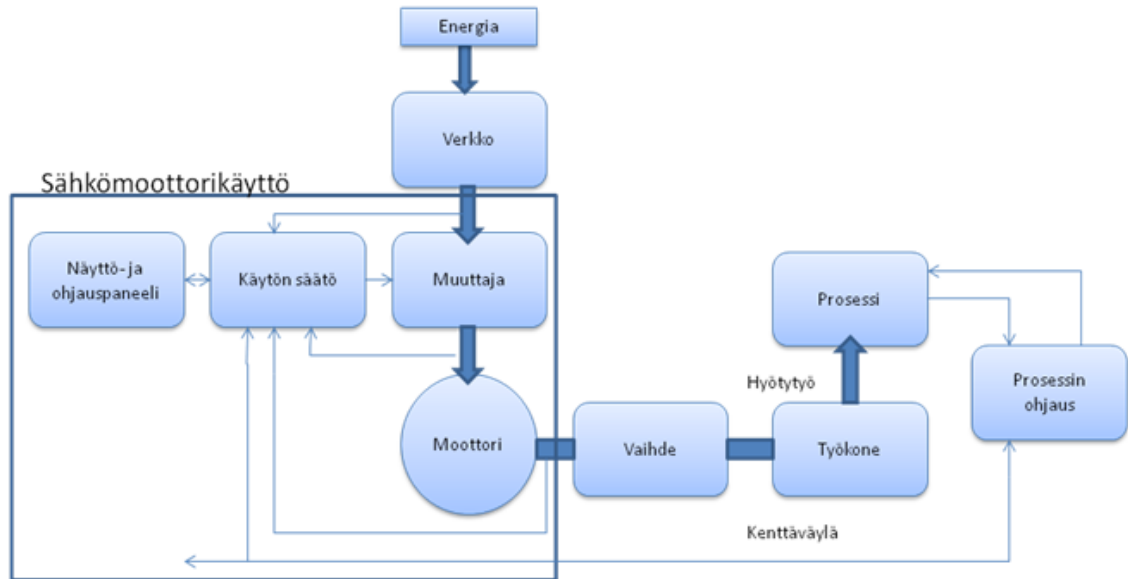
2.1. Mäntätoimisen maaliruiskun rakenne

Maaliruiskut voidaan kategorisoida mm. niiden toimintaperiaatteensa perusteella. Yleisimmät rakennusalalla käytettävät maaliruiskut ovat joko mäntätoimisia tai kalvotoimisia. Mäntätoimiset maaliruiskut voidaan edelleen kategorisoida sähkömoottorin tyyppin perusteella joko vaihto- tai tasasähkökoneisiin. Maaliruiskut ovat pääsääntöisesti syöttöjännitteeltään vaihtosähkökoneita, mutta osassa laitteista on käytössä tasasähkömoottori, jossa vaihtosähkö on suunnattu tasasähköksi. Seuraavassa kappaleessa perehdyttiin perusteellisemmin tasasähkömoottorikäyttöön.

2.2. Tasasähkömoottorin käyttö

2.2.1. Sähkömoottorikäytön määritelmä

Sähkömoottorikäyttö eli sähkökäyttö on syötetyn energian, esimerkiksi valtakunnan sähköverkon, ja prosessin välinen energiamuunnin. Energiamuunnin muuntaa verkon energian sähkömoottorin käyttämän työkoneen avulla hyötytyöksi prosessiin. Muunnosprosessia hallitaan muuttajan avulla. Muuttajat perustuvat nykyään puolijohdetehokytkimillä toteutettuihin vaihtosuuntaajiin, tasasuuntaajiin ja tasasähkökatkajiin. Sähkömoottorikäyttö jakautuu sähkömekaaniseen osaan, joka toimii energian siirtäjänä, ja ohjaavaan säätöosaan. Kuvassa 1 on esitetty sähkömoottorikäytön kaaviokuva. (Niiranen 2000)



Kuva 1. Sähkömoottorikäyttö osana sähkökäyttöjärjestelmää. (Niiranen 2000)

2.2.2. Sähkömoottorikäytön prosessi

Päätarkoitus sähkökäytöllä on tehdä hyötytyötä prosessille. Sähkökäytön tekemä työ liittyy aina materiaalin siirtoon tavalla tai toisella. Työkone muuntaa sähkömoottorin akselin pyörimisliikkeen materiaalin siirtoon soveltuvaksi liikkeeksi. Esimerkiksi nesteen pumppauksessa pitää ottaa huomioon oleelliset tiedot, kuten nostokorkeus, suurin virtausmäärä ja tieto virtauksen ajallisesta vaihtelusta. Virtauksen ajallinen vaihtelu vaikuttaa myös käytön mitoitukseen. Käyttämällä sähkömoottorin hetkellistä ylikuormitettavuutta saadaan katettua mahdolliset lyhytaikaiset tehohuiput.

Kun tiedetään työkoneen, esimerkiksi pumpun, ominaisuudet, voidaan prosessin teho vaatimukset muuntaa moottorin vääntömomentin riippuvuudeksi ajasta ja pyörimisnopeudesta. Vääntömomentin T , tehon P ja akselin kulmanopeuden Ω välinen riippuvuus ilmenee yhtälöstä 1.

$$T = \frac{P}{\Omega} = \frac{P}{2\pi n} \quad (1)$$

Kaavassa 1 kulmanopeuden yksikkö on radiaaneja sekunnissa ja n on moottorin akselin pyörimisnopeus kierroksina sekunnissa. Työkoneen ja moottorin väliin voidaan myös asentaa vaihte, jolla voidaan vaikuttaa akselin pyörimisnopeuteen ja sen kautta vääntömomenttiin.

Kaava 1 pätee kaikissa oloissa, eli myös kiihdytyksessä ja jarrutuksessa, kun tehoon P on laskettu mukaan käytön mekaanisen systeemin massojen liike-energian muuttumiseen kulunut teho. Käytännön kannalta on mukavampi jakaa

vääntömomenttiyhdytälö kahdeksi osaksi eli pysyvän tilan ja muutostilan vääntömomentteihin.

$$T(t) = \frac{P_{stat}}{\Omega} + J_{ekv} \frac{d\Omega}{dt} \quad (2)$$

Kaavassa 2 P_{stat} on teho vakiokulmanopeudella Ω , J_{ekv} on moottorin akselille redusoitu massajärjestelmän hitausmomentti, joka oletetaan vakioksi. $\frac{d\Omega}{dt}$ on kulmanopeuden derivaatta ajan suhteen eli kulmakihtyvyys.

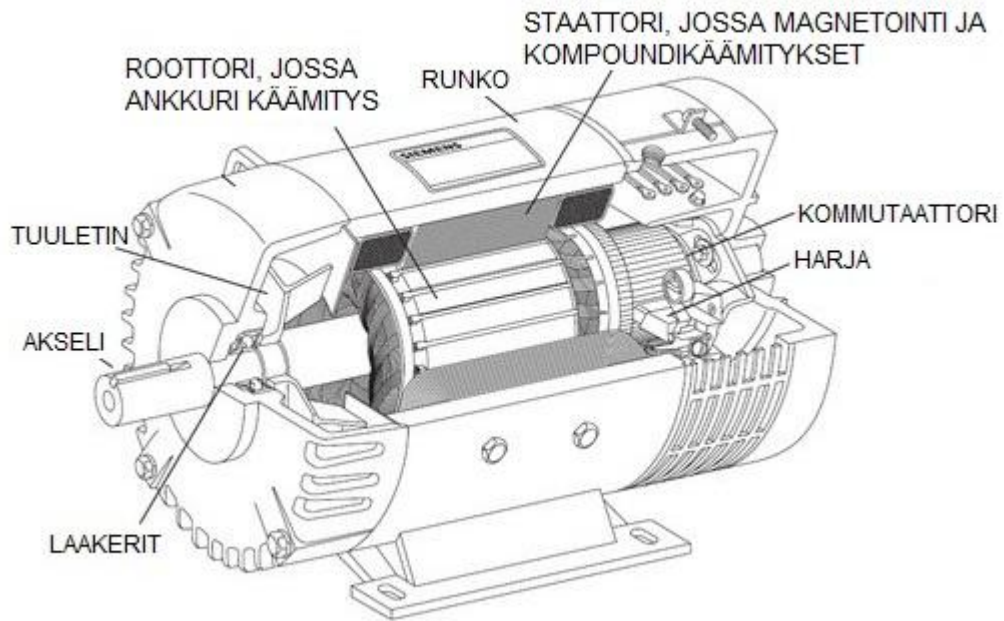
Suunniteltaessa käyttöä, voidaan käyttää pelkästään pysyvän tilan vääntömomenttia, mikäli kiihtyvyydet ovat niin hitaita, että muutostilaan liittyvä termi $J_{ekv} \frac{d\Omega}{dt}$ on alle 5-10% moottorin nimellisarvomomentista.

Hyvin usein käytössä olevista prosesseista pysyvän tilan vääntömomentti riippuu vain pyörimisnopeudesta. Yleinen riippuvuus on ns. neliöllinen vääntömomenttikäyrä, jollainen on mm. useimmilla pumpuilla ja puhaltimilla. Neliöllisen vääntömomenttikäyrän etuna on pienillä nopeuksilla oleva pieni vääntömomenttitarve, koska monella käytöllä on säätö tai toimintaperiaatteesta johtuvia rajoituksia nopeuden ollessa lähellä nollaa. (Niiranen 2000)

2.2.3. Tasasähkömoottori

Tasasähkömoottori on vanhin konetyyppi, jota on käytetty säädetyissä käytöissä. Tasasähkömoottorin staattorissa on navat, joita ympäröi magnetointikäänitys, jota syötetään tasasähköllä. Ankkurikäänitystä, joka on sijoitettu koneen roottorin uriin, syötetään vaihtosähköllä.

Vaihtosähkön tuottaa kommutaattori, joka on samalla akselilla kuin roottori. Kommutaattori vaihtosuuntaa mekaanisesti sen lamelleille harjojen välityksellä syötetyn tasasähkön. Roottorin käänityksessä kulkevan virran taajuus vastaa aina pyörimisnopeutta, koska se on samalla akselilla kuin kommutaattori.



Kuva 2. Tasasähkökoneen periaattellinen rakenne. (Hughes&Drury 2013)

Tasasähkömoottorin tyhjäkäyntinopeus n_0 määräytyy kaavasta:

$$n_0 = \frac{U_A}{2\pi K\phi} \quad (3)$$

jossa U_A on ankkurijännite eli kommutaattorin harjojen välinen tasajännite, ϕ on magnetointikäätymyksen virran aikaansaama vuo sekä K on vakio, joka on konekohtainen ja riippuu napapariluvusta. Kaavasta voidaan päätellä, että tasasähkömoottorin nopeutta voidaan kasvattaa kasvattamalla ankkurijännitettä tai pienentämällä vuota.

Tasasähkökoneen vääntömomentti määräytyy kaavasta:

$$T = K\phi I_A \quad (4)$$

jossa I_A on ankkurivirta eli harjoille menevä tasavirta. Kaavat 3 ja 4 pätevät myös, kun koneen nopeus tai virta ovat negatiivisia, joka kuvaa siis jarrutusta tai pyörimissuunnan muutosta. Monet käytöt, kuten esimerkiksi pumppu- ja puhallinkäytöt, pyörivät aina samaan suuntaan, eikä kuormaa tarvitse koskaan jarruttaa.

Kentän heikennys saadaan tehtyä, kun pienennetään magnetointikäämin virtaa. Kuitenkin on otettava huomioon, että vuon ja magnetointivirran välillä oleva riippuvuus on myös tasasähkömoottoreissa epälineaarinen magneettisen kyllästyksen takia.

Sähkömoottorin magnetointikäämi voidaan korvata myös kestopagneetilla, jolloin se on *magnetoitu tasasähkömoottori*. Tällä moottorityypillä kentänheikennys ei ole mahdollista.

Edellä mainittujen ankkuri- ja magnetointikäämitysten lisäksi tasasähkömoottoreissa voi olla myös kompensatiokäämitys, kääntönapakäämitys ja kompondikäämitys. Kompensatiokäämityksen tarkoituksena on kumota ankkurikäämityksessä kulkevan virran vaikutus moottorin ilmvälivuohon. Tätä kutsutaan ankkurireaktioksi. Kääntönapakäämityksen tarkoituksena on vähentää kipinöintiä, jota esiintyy kommutaattorissa. Kääntönapakäämitys helpottaa virran kääntymistä kommutaattorin harjojen oikosulkemassa käämivyyhdessä. Kompondikäämitys on erillinen magnetointikäämi eli se on rakennettu magnetointinavoille ja siinä kulkee ankkurivirta. Sen avulla voidaan kuormituksesta riippuen joko vahvistaa tai heikentää moottorin vuota.

Kompondi-, kompensatio- ja kääntönapakäämitykset ovat aina kytkettyinä ankkuripiirin kanssa sarjaan, joten niissä kaikissa kulkee ankkurivirta. Kun magnetointikäämin virta syötetään erillisestä virtalähteestä, konetta kutsutaan erillismagnetoiduksi tai vierasherätteiseksi tasasähkömoottoriksi. Sarjakoneeksi kutsutaan konetta, jossa magnetointikäämi on kytketty sarjaan ankkuripiirin kanssa. Mikäli magnetointikäämi ja ankkurikäämi on kytketty rinnan, niin koneen tyyppi on sivuvirtakone. (Niiranen 2000; Niiranen 2007)

2.3. Elektroniikan komponentit

Kappaleessa esiteltiin työssä käytettyjen kriittisimpien komponenttien ominaisuuksia ja toiminnallisuutta.

2.3.1. Mikrokontrolleri

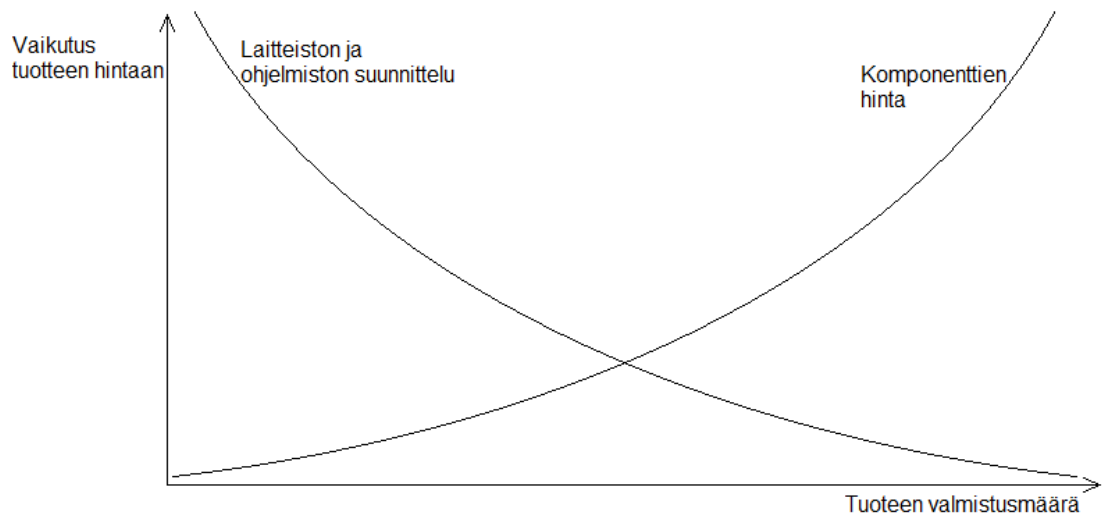
Suurin osa sulautetuista järjestelmistä on toteutettu mikro-ohjaimen eli mikrokontrollerin avulla. 8-bittinen mikrokontrolleri on käytetyin komponentti, mutta vaativimmissa laitteissa on käytössä 16- tai 32-bittinen mikrokontrolleri.

Sulautetun järjestelmän suunnittelu aloitetaan usein mikrokontrollerin valinnalla, koska se saattaa olla laitteiston lähes ainut komponentti. Kun valitaan mikrokontrolleria, voidaan lähtökohtana pitää seuraavia tekijöitä:

- hinta
- suorituskyky

- kehitystuki ja aikaisemmat investoinnit
- ominaisuudet
- piirin saatavuus

Pelkästään ei kannata tarkastella mikrokontrollerin hintaa, koska se on hyvin suhteellista ja riippuu tuotteen valmistusmääristä. Kuvassa 3 on esitetty suunnittelun ja komponenttien kustannukset tuotteen valmistusmäärän funktiona.



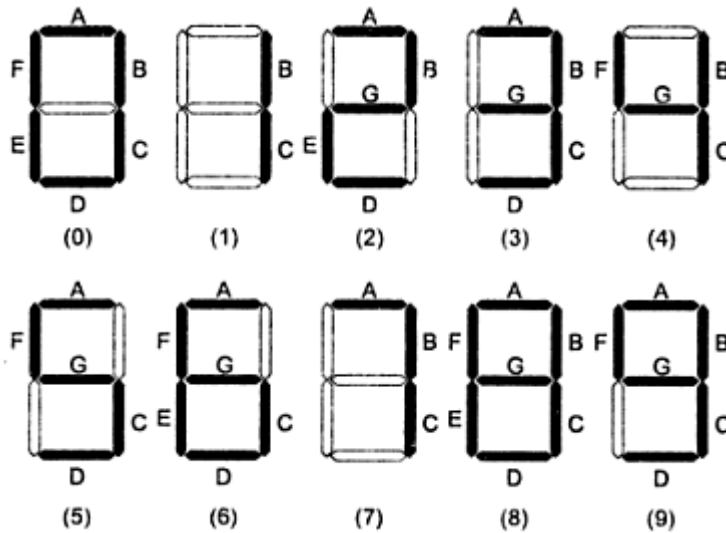
Kuva 3. *Suunnittelun ja komponenttien kustannukset tuotteen valmistusmäärän funktiona. (Koskinen 2004)*

Mikrokontrollerin suorituskyky on yksi keskeinen kehityskohde. Piireistä pyritään saamaan koko ajan tehokkaampia, jolloin niiden suorituskyky kasvaa. Mikrokontrollerin valintaa tehdessä tulee siis ottaa huomioon mikä on suunniteltavan sovelluksen prosessorikapasiteetti. Tuotteeseen ei tulisi valita vajaatehoista mikrokontrolleria.

Kehitystyökalujen merkitys on suuri, kun tuotteen valmistusmäärät ovat pieniä. Kuvasta 3 voidaan päätellä, että kehityskustannukset ovat paljon suuremmat kuin laitteiston hinta. Kehitystyökalujen merkitys voi olla suurempi, kuin mikrokontrollerin hinta tai ominaisuudet. Esimerkiksi ohjelmointikielen vaihto saattaa olla hyvin suuri kynns, koska siitä saatavan hyödyn tulee olla erittäin merkittävä, jotta se on kannattavaa. (Koskinen 2004)

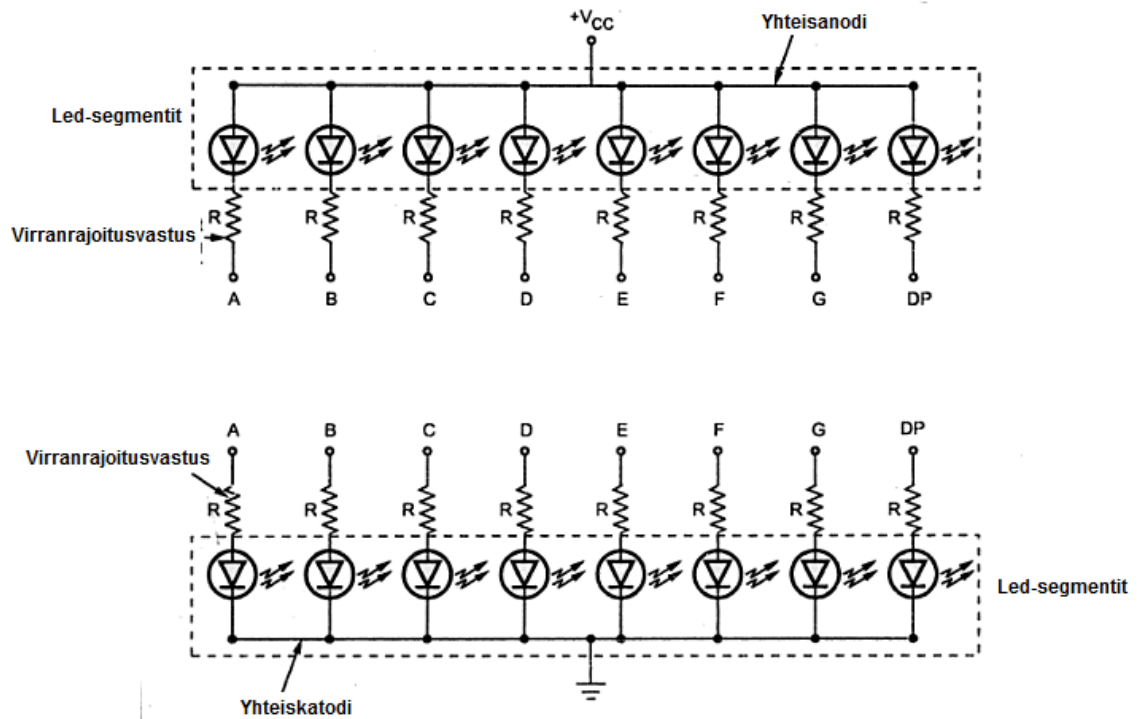
2.3.2. Seitsemän segmentti led- näyttö

Seitsemän segmentti näyttö koostuu seitsemästä ledistä, minkä jokaista lediä kutsutaan segmentiksi. Segmenttien eri kombinaatioilla voidaan tulostaa näytölle numeroita ja kirjaimia halutulla tavalla. Numerot 0-9 sekä kirjaimet A, B, C, D, E ja F ovat yleisimmät näytölle tulostettavat symbolit. Kuvassa 4 nähdään erilaisia symboleja näytölle tulostettuna.



Kuva 4. Seitsemän segmenttinäytön eri numeroita. (Bakshi&Godse 2009)

Näyttö komponenttina voidaan jakaa kahteen kategoriaan: yhteisanodi- sekä yhteiskatodityyppiin. Yhteisanodityypissä kaikkien ledien ensiöpuolet on kytketty toisiinsa ja ensiöpuoli on kytketty käyttöjännitteeseen. Jokainen led vaatii virranrajoitusvastuksen ledin ja maataston välille. Yhteiskatodityypissä ledien toisiopuolet on kytketty toisiinsa ja maahan. Virranrajoitusvastus on kytketty käyttöjännitteen ja ledin välille. Kuvassa 5 näkyy yhteisanodi sekä yhteiskatodityyppinen kytkentä. (Bakshi&Godse 2009)



Kuva 5. Ylhäällä yhteisanodikytkentä ja alhaalla yhteiskatodikytkentä. (Bakshi&Godse 2009)

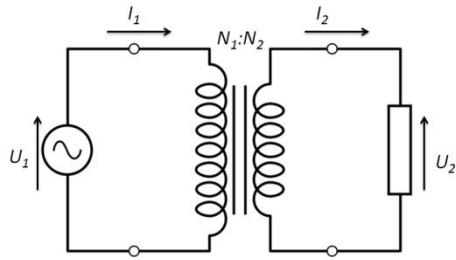
2.3.3. Muuntaja

Muuntajalla tarkoitetaan laitetta, joka muuntaa vaihtojännitteen tai vaihtovirran samantaajuiseksi eriarvoiseksi vaihtojännitteeksi tai vaihtovirraksi. Yksinkertaisimmillaan muuntaja koostuu kolmesta osasta: ensiökäämistä, toisiökäämistä sekä magneettimateriaalista koostuvasta sydäimestä. Tavallisesti sydän on rautaa ja sen ympärille on erotettu toisistaan ensiö- ja toisiökäämi. Energia käämistä toiseen siirtyy niiden välisen keskinäisinduktanssin välityksellä. Ensiökäämiin tuleva vaihtovirta muodostaa muuntajan sydämeen muuttuvan magneettivuon, joka indusoi toisiökäämiin siitä lähtevän toisiovirran.

Ensiökäämin ja toisiökäämin kierroslukujen suhde on suoraan verrannollinen käämien napojen väliseen jännitteeseen sekä kääntäen verrannollinen käämeissä kulkevaan virtaan:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (5)$$

missä, N_1 on ensiökäämin kierrosten lukumäärä, N_2 on toisiökäämin kierrosten lukumäärä, U_1 on ensiökäämin jännite, U_2 on toisiökäämin jännite, I_1 on ensiökäämin virta ja I_2 on toisiökäämin virta. Kuvassa 6 on esitetty muuntaja yksinkertaisena piirikaaviona.



Kuva 6. Muuntaja esitettyä yksinkertaisena piirikaaviona. (Young&Freedman 2004)

Ideaalitilanteessa muuntajaan syötetty teho on sama kuin muuntajasta saatu teho. Ohmin laki siis pätee myös muuntajassa:

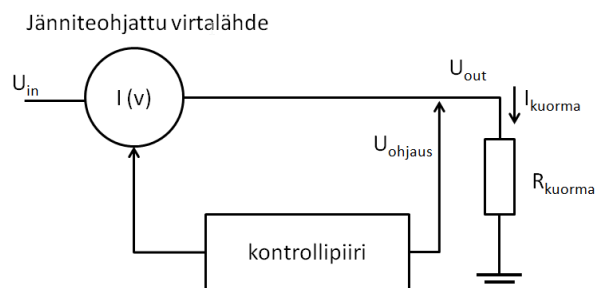
$$P_1 = U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2 = P_2 \quad (6)$$

Kuitenkin käytännössä teho ensiöpuolella on suurempi kuin toisiopuolella, koska muuntajan lämpöhäviöön kuluu energiaa. (Young&Freedman 2004; Croft, Summers &Hartwell 2008)

2.3.4. Jänniteregulaattori

Elektroniset laitteet ja niiden sisäiset aktiivikomponentit tarvitsevat toimiakseen jonkin tietyn käyttöjännitteen, joka on tavallisesti vakiojännite. Jänniteregulaattori on laite, jolla saadaan laitteen käyttöjännite pidettyä vakiona riippumatta piirin kuormasta tai siinä kulkevista virroista. Jänniteregulaattori on helppokäyttöinen halpa ja lähes idioottivarma komponentti erilaisille vakiojännitettä vaativille elektroniikkaratkaisuille.

Lineaarinen jänniteregulaattori toimii käyttämällä jänniteohjattua virtalähdettä ja pakottaa näin jänniteregulaattorin lähtöpinnan jännitteen vakioksi. Kuvassa 7 on esitetty jänniteregulaattorin toimintaperiaate.



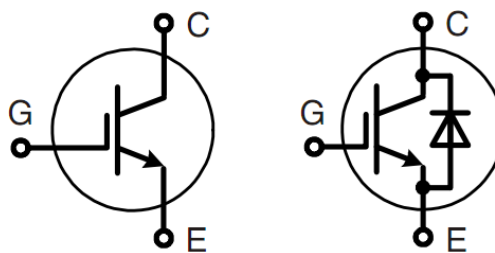
Kuva 7. Lineaarisen jänniteregulaattorin toimintaperiaate. (Texas Instruments 2011)

Jänniteregulaattorissa olevan kontrollipiirin tehtävä on valvoa lähtöjännitettä U_{out} ja säätää virtalähdettä siten, että lähtöjännite pysyy vakiona. Virtalähteen suunnittelulla määritellään maksimi kuormitusvirta, jolla voidaan haluttua jännitteentasausta suorittaa. Lähtöjännitettä kontrolloidaan takaisinkytkennällä, jolla kompensoidaan piirin stabiilisuutta. Monissa lineaarisissa jänniteregulaattoreissa on sisäänrakennettu kompensatiokytkentä, eivätkä ne tarvitse erillisiä komponentteja toimiakseen vakaasti. (Texas Instruments 2011)

2.3.5. IGBT transistori ja sen ohjaus

Rakenne

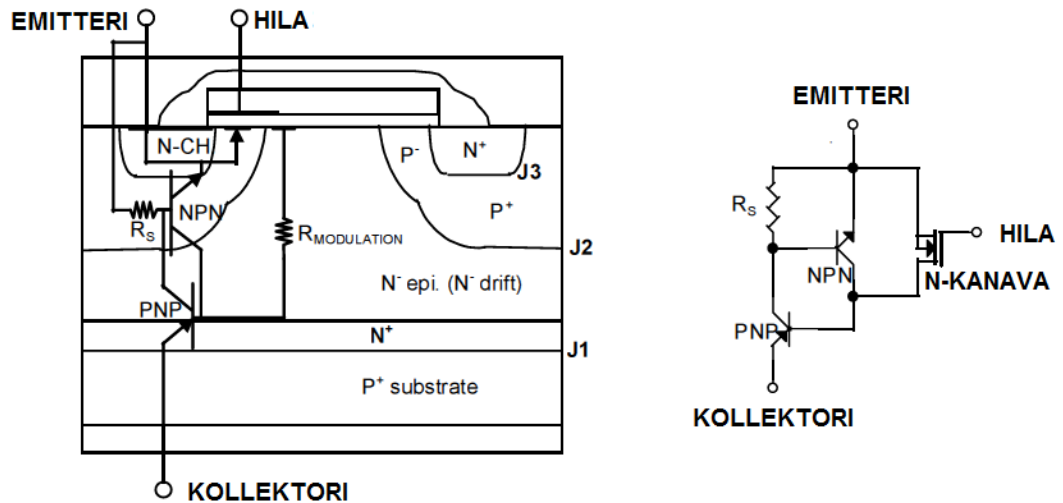
IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) eli eristetyllä hilalla varustettu bipolaaritransistori on suuritehoinen transistori, jolla on MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) transistorin ja BJT (Bipolar junction transistor) tehotransistorin ominaisuudet. IGBT:n rakenne ja sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 9. Kuten kuvasta näkyy, IGBT:n rakenne on kuin MOSFETilla, mutta siihen on lisätty p-tyypin puolijohdealue drain- alueen jatkoksi. Tällä lisätyllä p-tyypin puolijohdealueella on merkittäviä seurauksia, sillä sen tuottamat aukot pitävät IGBT:n jännitehäviön kohtuullisena vielä isoillakin virroilla. Toisin kuin MOSFETilla IGBT- transistorilla ei ole sen p-alueen johdosta sisäistä diodia. Tästä on se haitta, että ulkoisen diodin käyttö on siltakytkennöissä välttämätön. Nykyään on kuitenkin myös saatavilla integroidulla diodilla valmistettuja IGBT transistororeja. Kuvassa 8 on esitetty IGBT- transistorin piirrosmerkki.



Kuva 8. Perinteisen sekä diodilla varustetun IGBT- transistorin piirrosmerkit. (IXYS 2004)

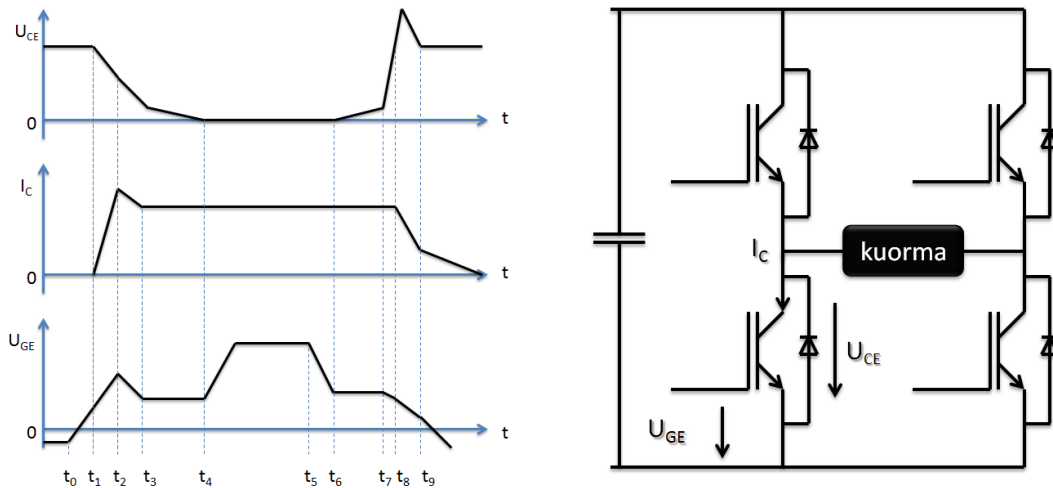
Toimintaperiaate

IGBT:tä ohjataan sen MOSFET osan hilalla G, kuva8. IGBT:n kollektorin C ja emitterin E välissä on sekä pnp-transistori että npn transistori. MOSFETin tehtävänä on ohjata pnp-transistorin kantavirtaa. Komponentissa kulkeva virta koostuu MOSFETin elektronivirrasta ja pnp-transistorin aukkovirrasta. Npn-transistori pyritään pitämään virrattomana sen kannan ja emitterin välissä olevan resistanssin avulla. Mikäli npn-transistori tulisi aktiiviseksi, niin pnp- ja npn-transistorin yhdistelmä muodostaisi tyristorin, jonka virtaa ei pystyisi enää katkaisemaan MOSFETin ohjauksella. (Oh 2003)



Kuva 9. IGBT transistorin rakenne ja sijaiskytkentä. (Oh 2001, 3; Khanna 2003)

IGBT:n teoreettiset käyrämuodot kytkentäsuojapiirittömässä siltakytkennässä päällekytkennän ja katkaisun aikana on esitetty kuvassa 10. Alussa oletetaan, että virta kulkee vasemmanpuoleisen ylemmän vastadiodin kautta induktiivisesta kuormasta välipiirikondensaattoriin. Ajanhetkellä $t=t_0$ vasemmanpuoleisen alemman IGBT:n hilalle kytketään jännite. Hilajännite alkaa nousta hilapiiriin resistanssin ja kapasitanssin määräämällä aikavakiolla. Hilajännite ylittää MOSFET osan kynnysjännitteen hetkellä $t=t_1$ ja IGBT alkaa johtaa. Koska piirin hajainduktanssi on pieni, IGBT:n virta kasvaa nopeasti. Vastaavasti diodin virta pienenee ja lopulta suunta kääntyy. IGBT:n kollektorivirrassa I_C näkyvä ylitys johtuu vastadiodin takavirrasta.



Kuva 10. IGBT:n teoreettiset käyrämuodot päällekytkennän ja katkaisun aikana kytkentäsuojattomassa siltakytkenässä. (Um 2002; Niiranen 2007)

Ajanhetkellä $t=t_2$ kollektori- emitteri -jännite U_{CE} laskee nopeasti diodin takavirran alkaessa katketa. Samalla diodin jännite kasvaa. Hetkellä $t=t_3$ IGBT:n sisäinen JFET-transistori ei enää rajoita virtaa ja hilan jännite jää hilalla vaikuttavan Miller-kapasitanssin takia vakioarvoon hetken t_4 saakka, jolloin U_{CE} ei enää laske. Hila latautuu hilaa syöttävään jännitteeseen, joka on noin 10..15V.

Katkaisu alkaa hetkellä $t=t_5$, jolloin hila-emitteri-jännite syöttö kytketään estotilan arvoonsa, joka on tyypillisesti -15..0V. Tästä seuraa, että hilan jännite alkaa laskea. Kollektorivirta alkaa rajoittumaan hetkellä $t=t_6$ ja samalla kollektorin ja emitterin välinen jännite U_{CE} alkaa nousta sekä Miller-efektin takia hilajännitteen lasku keskeytyy. Hetkellä $t=t_7$ MOSFET osa alkaa katkaista virtaa ja kollektorijännite nousee äkillisesti. Koska MOSFETin virta on IGBT:n sisäisen pnp-transistorin kantavirtaa, alkaa pnp-transistori katkaista virtaansa vasta ajanehetken $t=t_8$ tietämällä. Samoihin aikoihin myös ylempi vastadiodi alkaa johtaa. MOSFETin virta katkeaa hetkellä $t=t_9$, jonka jälkeen IGBT transistorissa kulkeva virta on pnp- transistorin jälkivirtaa. (Niiranen 2007; Oh 2001)

Koska MOSFET transistori ei sovellu korkean jännitteen tai virran sovelluksiin ja BJT transistorilla on rajoituksia suurtaajuussovelluksissa, niin IGBT transistori on hyödyllinen sovelluksissa, joissa tarvitaan korkeaa jännitettä tai virtaa sekä toimitaan suurilla taajuuksilla ja kytkentänopeudella.

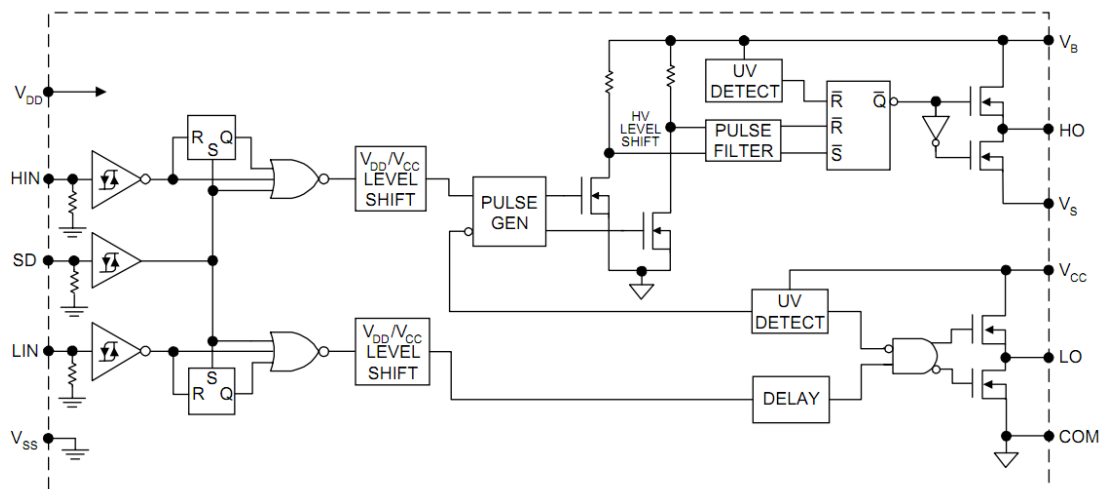
IGBT:n kytkentäominaisuuksia voidaan säädellä hilaa tehtävän kytkennän avulla (*Gate driver*). On erittäin tärkeää suunnitella asianmukainen hilaohjaus IGBT:n suorituskyvyn kannalta. Esimerkiksi ns. kovan kytkennän sovelluksissa (*hard switching applications*),

kuten moottorin ohjauksessa, asetetaan hilaohjauksen parametrit asianmukaisesti. Näin varmistetaan, että IGBT:n aaltomuodon toiminta-alue ei ylitä, vaan pysyy turvallisella jännitealueella. (Um, 2002)

IGBT ohjainpiiri

IGBT transistorin optimaalinen toimiminen vaatii oman ohjainpiirin. Piiri voidaan toteuttaa komponenteista suunnittelemalla, mutta markkinoilla on myös valmiita ohjainpiirejä. Ohjainpiiri on yksinkertaisimmillaan vain logiikkatason komponentteja, joilla saadaan signaalia vahvistettua. Piireissä voi myös olla lähdöt useammalle eri potentiaalissa olevalle ohjauslähdölle, jolloin on mahdollista ohjata yhdellä piirillä useampaa IGBT transistoria. (Niiranen 2007)

Kuvassa 11 on esitetty lohkokaavio eräästä kahta IGBT transistoria ohjaavasta ohjainpiiristä. Toisen komponentin emitterin on oltava COM nastan potentiaalissa, mutta toinen voi olla mielivaltaisessa potentiaalissa välillä 0..1200V. Piiri sisältää myös alijännitevalvonnan (UV DETECT) ja etenemisviiveen sovituksen (DELAY). Tasonsiirtopiirin (HV LEVEL SHIFT) kautta viedään ohjaussignaali ylemmälle puolijohteelle.

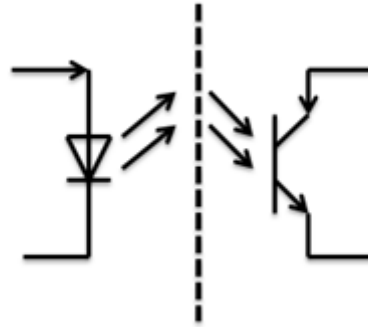


Kuva 11. IGBT komponentille soveltuvan ohjainpiirin (IR2110) lohkokaavio. (IRF, 2005)

2.3.6. Optoerotin

Optoerotin eli optoisolaattori on komponentti, jota käytetään tiedon siirrossa potentiaalista toiseen. Tyypillisesti siirretään esimerkiksi tehopuolijohteiden ohjaussignaaleja sekä niiden tilatietoja tai erilaisia mittaustietoja, jolloin se myös toimii galvaanisena erottimena eri lähteen ja kohteen välillä. Optoerottimella on mahdollista

siirtää myös analogista dataa, mutta sen epälinearisuudesta ja lämpötilaryöminnystä johtuen tiedonsiirto on pääasiassa digitaalista.



Kuva 12. Optoerotin toimintaperiaate. (Niiranen 2007)

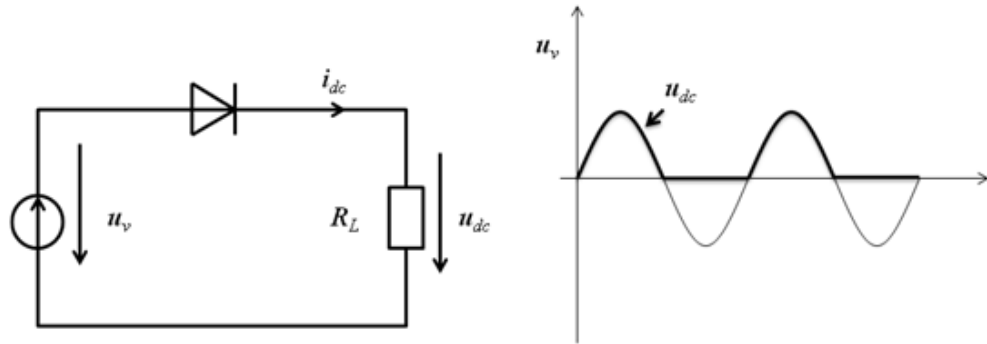
Kuvasta 12 käy ilmi optoerotin toimintaperiaate. Optoerotinissa oleva valodiode eli LED (*Light Emitting Diode*) välittää tiedon näkyvänä valona eristeen läpi. Eristeen toisella puolella on valoherkkä transistori, jonka kantaemitteriliitokseen valo on kohdistettu. Valolla siis voidaan ohjata kollektorivirtaa kantavirran tavoin.

Tärkeitä tekijöitä optoerotin toiminnan kannalta ovat transistorin kollektorivirran suhde diodin virtaan sekä diodin ja transistorin välinen kapasitanssi. Tyypillisesti kollektorivirran suhde diodin virtaan on 10-200% riippuen komponentista. Diodin ja transistorin välinen kapasitanssi on yleensä noin 1pF luokkaa. Vaikka kapasitanssi on pieni, niin sen aiheuttamat häiriövirrat ovat merkittävää suuruusluokkaa valon generoimaan kantavirtaan verrattuna jännitteen muutosnopeuden ylittäessä 50-100 V/ μ s arvon. Arvon ylittäminen on hyvin tavallista tehoelektronikkalaitteissa. Häiriövirtojen aiheuttaman kollektorivirtamuutosten vaikutus digitaalisignaaleihin tulee estää huolellisella elektronikkasuunnittelulla.

Optoerotin etenemisviiveissäkin on eroja riippuen niiden käyttötarkoituksesta. Nopeimmissa komponenteissa etenemisviive on alle 100ns, mutta hitaimmissa etenemisviive voi olla jopa yli 20 μ s. Tyypillisesti kuitenkin nopeimmat komponentit on suunniteltu digitaalisen signaalin siirtoon ja niissä on valmiina TTL- tyyppiselle 5V logiikkasignaaleille sovitettuja tulo- ja lähtöpiirejä. Lähtöpiirien jännitteen nopeuskestoisuus on myös hyvä, yli 10kV/ μ s. (Niiranen 2007)

2.3.7. Tasasuuntaaja

Tasasuuntaajaa tarvitaan, kun halutaan suunnata vaihtosähkö sykkiväksi tasasähköksi. Yksinkertainen tasasuuntauskytkentä koostuu sarjaan kytketyistä vastuksesta ja diodista. Kuvassa 13 on esitetty yksinkertainen tasasuuntauskytkentä.



Kuva 13. Yksinkertainen tasasuuntauskytkentä, jolla muodostetaan kuormalle puoliaaltosuunnattu jännite. (Niiranen 2007)

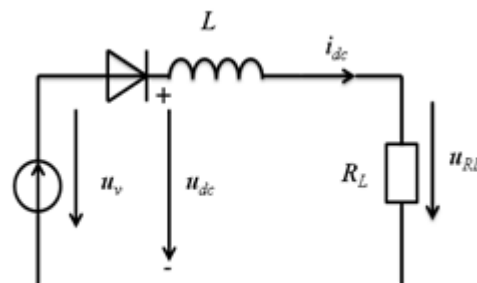
Diodin läpi kulkee virta vain silloin, kun diodin anodi on katodiin nähden positiivinen. Katodin ollessa positiivinen anodiin nähden diodi estää virran kulun. Diodia voidaan verrata kytkimeen, joka avautuu anodin ollessa negatiivinen ja sulkeutuu anodin ollessa positiivinen. Vastuksen R_L ylivaikuttava jännite ja virta muodostuvat siniaallon puolikkaista. Tällaista tasasuuntauskytkentää kutsutaan puoliaaltosuuntaajaksi.

Puoliaaltotasasuunnatun kuormajännitteen keskiarvo saadaan seuraavasta integrointilausekkeesta:

$$U_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \sqrt{2} U_v \sin \omega t \, dt = \frac{1}{\pi} \sqrt{2} U_v = 0,45 U_v \quad (7)$$

missä ωT on 2π ja ω on $2\pi f$.

Käytännössä kuormalaitteissa ja syöttöverkossa on induktiivisuutta, joten kytkentään voidaan olettaa kuormaksi sarjaan induktanssi L kuormaresistanssin R_L kanssa. Kuvassa 14 on esitetty kuormapiiri.



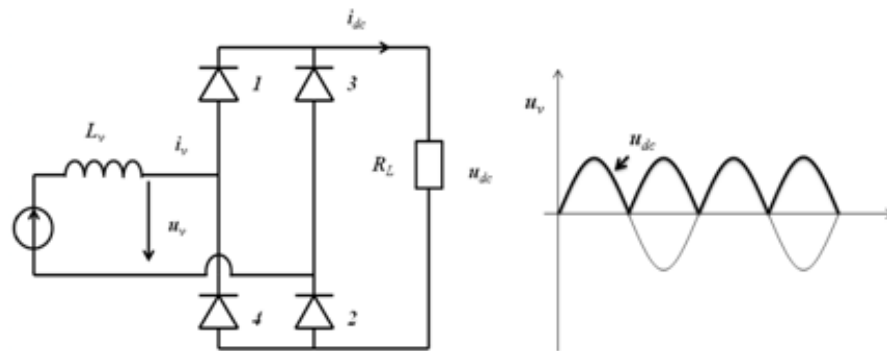
Kuva 14. Kuormapiiri, jossa resistanssin lisäksi induktiivisuutta. (Niiranen 2007)

Diodin ollessa johtamattomassa tilassa piirin virta on nolla. Kun jännite nousee, diodi menee johtavaan tilaan ja kuormavirta alkaa johtua. Kun diodi on johtavassa tilassa, voidaan piirin toimintatila laskea seuraavalla kaavalla:

$$u_v = R_L i + L \frac{di}{dt} \quad (8)$$

missä $u_L = L \frac{di}{dt}$ on induktanssin yli kytkeytyvän jännitteen suuruus. Virran kasvaessa derivaatta on positiivinen ja jännite positiivinen. Virran pienentyessä tilanne on päinvastoin eli virran termi on negatiivinen.

Tehokas tasasuuntauskytkentä saadaan niin sanotulla diodisillalla, jossa kytketään neljä diodia sillaksi. Kuvassa 15 on esitetty diodisiltakytkentä.



Kuva 15. Diodisilta, jolla saadaan toteutettua yksivaiheinen kokoaltosuuntaus. (Niiranen 2007)

Diodisilta kytkennällä voidaan vaihtovirran molemmat puolijaksot käyttää hyödyksi. Diodit D_1 ja D_2 johtavat positiivisella puolijaksolla ja D_3 ja D_4 johtavat negatiivisella puolijaksolla. D_3 ja D_4 kääntävät vaihtojännitteen vaiheen 180 astetta, joten jännite U_L on negatiivisen puolijaksion aikana vaihtojännitteen peilikuvan mukainen. Loppujenlopuksi molemmat vaihtojännitteen puolijaksot voidaan käyttää hyväksi. Kytkentää kutsutaan niin sanotuksi siltakytkennäksi ja se on hyvin yleisessä käytössä erilaisten elektroniikkalaitteiden jännitelähdeosissa, kuten esimerkiksi yksi vaiheisissa verkkolatauslaitteistoissa.

Kokoaltotasasuunnatun kuormajännitteen keskiarvo saadaan seuraavasta integrointilausekkeesta:

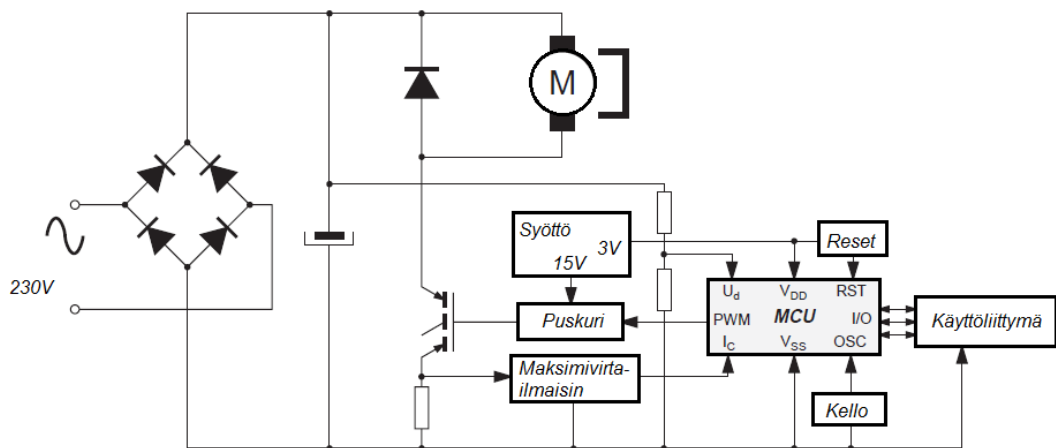
$$U_{dc} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \sqrt{2} U_v \sin \omega t \, dt = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} U_v = 0,90 U_v \quad (8)$$

missä ωT on 2π ja ω on $2\pi f$.

(Niiranen 2007; Aumala 2001)

2.4. Magnetoidun tasasähkömoottorin ohjaus mikrokontrollerilla

Magnetoidun tasasähkömoottorin ohjaus voidaan toteuttaa mikrokontrollerin avulla. Mikrokontrollerilla voidaan hallita suoraan katkoja piiriä (chopper circuit), joka ohjaa sähkömoottoria. Katkojapiiri voidaan yksinkertaisesti toteuttaa *IGBT* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) bipolaaritransistorin avulla. Tämän tyyppisellä säätöpiirillä voidaan ohjata moottoria vain yhteen pyörimissuuntaan, jolloin jarruttaminen ei ole mahdollista. Edellä mainittu toimintatapa on riittävä esimerkiksi pumpuissa, pesukoneissa ja porakoneissa. (Nicolai&Castagnet 1994)



Kuva 16. Sovelluksen lohkokkaavio, jossa mikrokontrolleri tuottaa PWM (Pulse Width Modulation) signaalin puskurivahvistimen kautta IGBT transistorille. (Nicolai&Castagnet 1994)

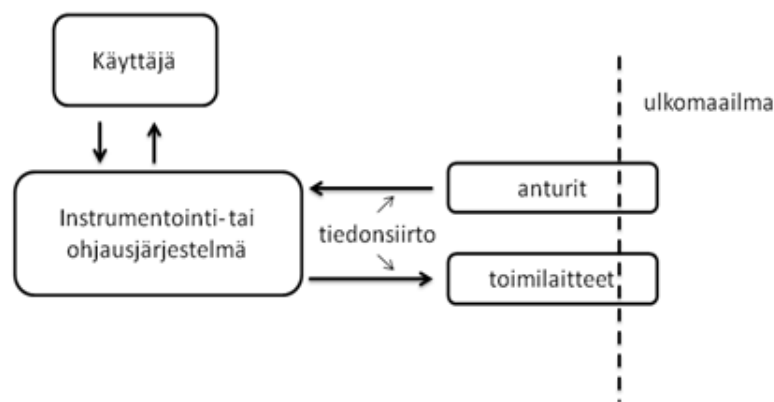
Pulssinleveysmodulaatio (*Pulse Width Modulation, PWM*) on modulointitapa, jossa kuormaan menevää jännitettä saadaan säädettyä muuttamalla pulssin leveyttä eli pulssisuhdetta. PWM:ssä pulsseilla on vakio toistotaajuus tai toistosykli. Monien prosessien ohjaukseen tarvittava säädetty analoginen signaali voidaan toteuttaa PWM:n avulla. PWM signaalia käytetään enemmän mekaanisten laitteiden ohjaukseen kuin vain tiedon välittämiseen. Esimerkiksi sähkömoottorin ohjauksessa, PWM-lähdöllä voidaan ohjata transistoria, joka toimii moottorin on/off kytkimenä, eli kuorman kanssa sarjassa oleva kytkin on aina täysin johtava tai täysin sulkuutilassa. PWM on täten myös hyvin taloudellinen menetelmä ohjata suuriakin tehoja, koska kytkimessä syntyvä tehohäviö on mahdollisimman pieni. Moniin mikrokontrollereihin on varustettu erityisellä PWM-yksiköllä, mutta PWM voidaan myös toteuttaa ohjelmallisesti. (Ganssle&Barr 2003; Koskinen 2004; Niiranen 2007)

2.5. Mitattavat suureet ja niiden anturointi

Kappaleessa käsiteltiin paineen ja lämpötilan mittausta sekä niiden anturointimenetelmiä. Anturoinnissa syvennyttiin elektronisiin antureihin eli mikroantureihin.

2.5.1. Anturointi

Elektroninen anturi on laite tai komponentti, joka suodattaa ympäristön tarjoamasta informaatiosta halutun mitattavan signaalin ja muuttaa signaalin energiamuodon sähköiseksi vastineeksi. Anturi on siis laite, joka hankkii tietoa ja tarvittaessa toimii reaaliajassa häiritsemättä tutkittavaa prosessia. Kuvassa 17 on esitetty anturin asema järjestelmässä.



Kuva 17. Anturi järjestelmän osana (Kuivalainen 1993)

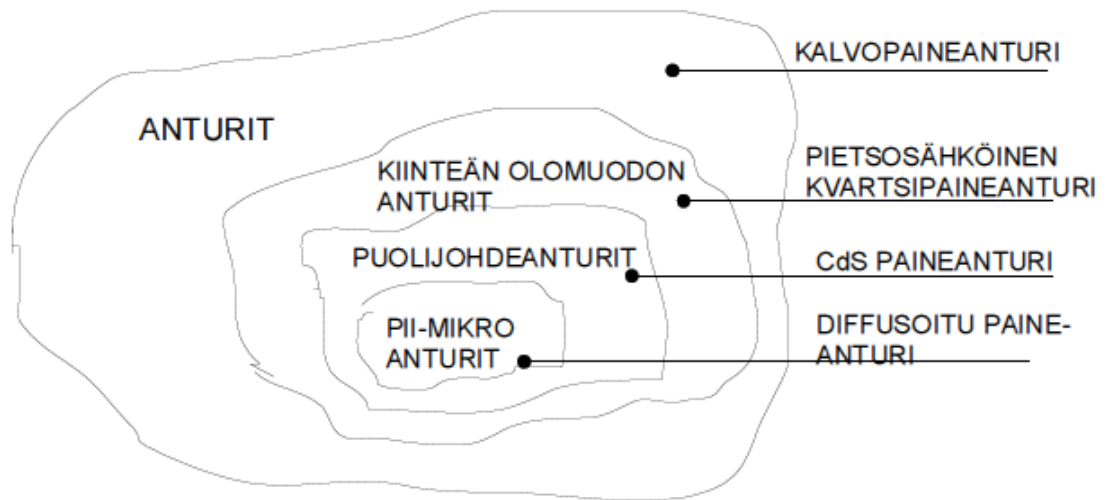
Yleisesti anturi voidaan määritellä laitteeksi, joka muuttaa signaalienergiaa muodosta toiseen. Nykyään kuitenkin halutaan lähes aina sähköinen signaali, jolloin sen käsittelyyn voidaan soveltaa pitkälle kehittyneitä elektroniikkaa ja tietotekniikkaa.

Mikroanturit valmistetaan pii-planaaritekniikalla, jossa komponentit tehdään piikiekon pinnalle fotolitografiatekniikkaa käyttäen. Piikiekolle syntyy suuri määrä integroituja piirejä, joista anturit voidaan valmistaa. Näin yksittäiseen anturin hinta saadaan pysymään kohtuullisena. Puolijohdeantureita, jotka signaalin aistimisen lisäksi suorittavat myös signaalin muokkaamista, kutsutaan ns. integroiduiksi antureiksi. Älykkääksi anturiksi kutsutaan laitetta, joka suorittaa myös signaalinkäsittelyä. (Kuivalainen 1993)

2.5.2. Paine ja sen mittaus

Paine, p on suure, joka ilmaisee pinta-alayksikköön kohdistuvaa suoraa voimaa. SI-järjestelmässä paineen yksikkö on $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$ (pascal). Yleisessä käytössä on myös yksikkö baari (bar), jolla ilmoitetaan kaasun ja nesteen painetta. $1 \text{ bar} \approx 100 \text{ kPa}$.

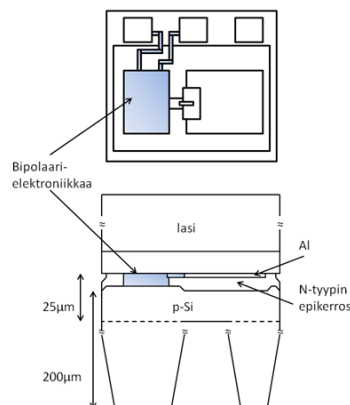
Mikropaineanturointi voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, mutta seuraavissa kappaleissa käsiteltiin tarkemmin pii-puolijohde paineanturityyppeihin perustuvia anturiratkaisuja. Kuvassa 18 näkyy pii-mikroanturin paikka anturikentässä, jossa on eri tekniikoin valmistettuja paineantureita.



Kuva 18. Piianturin paikka anturikentässä. (Kuivalainen 1993)

Kapasiitiivinen pii-paineanturi

Kapasiitiivinen pii-paineanturi on integroitu puolijohdeanturi, joka koostuu kondensaattorista. Kondensaattorin alaelektrodi on piitä ja yläelektrodi on lasille höyrystetty alumiiniohutkalvo. Kuvassa 19 on esitetty kapasiitiivinen pii-paineanturi.



Kuva 19. Integroitu kapasiitiivinen paineanturi ylhäältä katsottuna sekä poikkileikkaus. (Kuivalainen 2003)

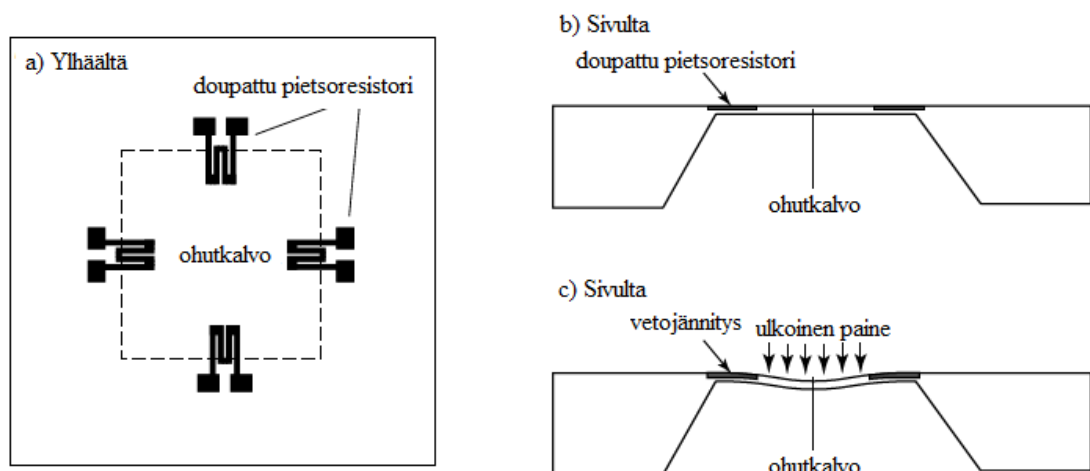
Piielektrodin alapuolelta on etsaamalla poistettu piitä siten, että piielektrodi on ohuen piembraanin päällä. Näin ollen paineenmuutokset näkyvät, kun ohut piikalvo taipuu paineen kasvaessa. Piikalvon taipuessa anturikondensaattorin kapasitanssi muuttuu ja tämä muutos voidaan havaita sähköisesti.

Kapasitiivisessa pii-paineanturissa kalvon venyminen muuttaa anturin ominaiskapasitanssia. Kapasitiivinen anturi on erityisen hyvä matalapainesovelluksissa. Anturi voidaan valmistaa yhdestä piipalasta, joka maksimoi anturin toimintavarmuuden. Piikalvon siirtymä mitataan sen keskiosasta toisin kuin pietsoresistiivisessä anturissa. Ylipaineen varalta piikalvon reunat suojataan mekaanisesti. Kapasitiivisen piipaineanturin suunnittelussa huomioon otavin osa on kalvon paksuus. Kalvon paksuuden tasaisuudella taataan anturin lineaarisuus. (Kuivalainen 1993;Fraden 2010)

Pietsoresistiivinen pii-paineanturi

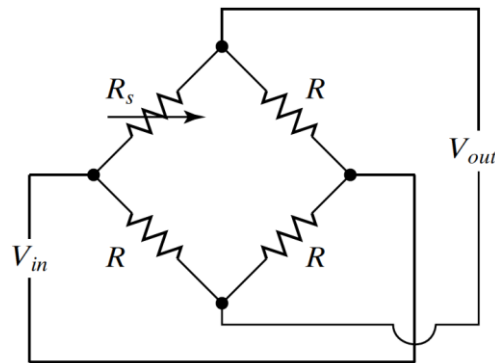
Pietsoresistiivinen pii-paineanturi perustuu nimensä mukaisesti resistanssin muutokseen materiaaliin vaikuttavan voiman tai venymän seurauksesta.

Pietsoresistiivisyyden käytetään tavanomaisesti mikroanturitekniikassa. Seostetun eli dopatun piin luonteenomainen piirre on sen huomattava pietsoresistiivinen herkkyys. Mikroanturitekniikan ensimmäisiä anturityyppejä olivat paineanturit. Pietsoresistiivinen paineanturi on ollut kaupallinen menestys muun muassa sen korkean tarkkuuden ja luotettavuutensa vuoksi. Varhaisimmat ja yhä yleisimmin sarjatuotannossa olevat ohutkalvopaineanturit ovat valmistettu yksikiteisestä piistä. Kuvassa 20 näkyy esimerkki pietsoresistiivisestä pii-paineanturista.



Kuva 20. Pietsoresistiivinen pii-paineanturi. (Liu. 2012)

Anturin vastukset sijaitsevat jokaisen neljän reunan keskikohdassa, joihin kohdistuu suurin mahdollinen vetojännitys kun kalvo taipuu paineen voimasta. Neljä vastusta on yhdistetty niin sanottuun Wheatstonen siltaan. Wheatstonen silta on kaksihaarainen niin sanottu kristallimainen piiri, jonka rakenne selviää tarkemmin kuvasta 21. (Liu 2012; Fraden. 2010.)



Kuva 21. Wheatstonen siltakytken peruseriaatekaavio. (Liu 2012; Fraden 2010)

2.5.3. Lämpötila ja sen mittaus

Lämpötila on erittäin tärkeä tilasuure fysiikassa. Lämpötila vaikuttaa eri materiaalien olomuotoon ja tilaan. Lämpötila vaikuttaa paljonko materiaali sisältää energiaa ja kuinka kemialliset reaktiot vaikuttavat materiaalissa.

SI- järjestelmässä lämpötilan yksikkönä on kelvin (K), mutta sen lämpötilaero on sama kuin arkikäytössä olevalla celsiuksella ($^{\circ}\text{C}$). Absoluuttinen nollapiste $0\text{K} = -273,15^{\circ}\text{C}$.

Lämpötilaa voidaan mitata useiden eri fysikaalisten ominaisuuksien avulla. Ensimmäiset lämpömittarit perustuivat yksinkertaisesti nesteen lämpölaajenemiseen. Vastaavasti nesteen lisäksi myös muiden olomuotojen kuten höyryn ja kaasun lämpölaajenemisen avulla voidaan mitata lämpötilaa. Bimetallilämpömittari on mittari, jossa on liitettyä yhteen kaksi eri lämpölaajenemiskertoimen omaavaa metalliliuskaa. Lämpötilan muutos aiheuttaa liuskaan kiertymisen. Esimerkiksi saunan mittari on tällainen bimetallimittari, jossa on liuskaan liitetty osoitin, joka osoittaa hetkellistä lämpötilaa. Lämpötilaa voidaan mitata myös äänen nopeutta mittaamalla, koska lämpötila vaikuttaa äänen etenemisnopeuteen. Tietyllä tavalla leikattua kvartsikidettä voidaan käyttää lämpötila-anturina, koska sen värähtelytaajuus on lähes lineaarisesti verrannollinen kiteen lämpötilaan.

Sähkönjohtavuus muuttuu kaikissa aineissa jonkin verran lämpötilan muuttuessa. Aineen lämpötilariippuvuuden tuntiessa voidaan lämpötila saada selville mittaamalla aineen vastusta eli resistanssia. Puolijohteessa sen yli menevään jännitteeseen vaikuttaa

lämpötila. Tätä ominaisuutta käytetään useissa puolijohdepohjaisissa lämpötila-antureissa.

Vastusanturi on lämpötila-anturi, jonka lämpötilariippuvuuden eli toisin sanoen resistanssin avulla saadaan mitattua lämpötilaa. Vastusanturi on metallinen ja sen varsinainen tuntoelin on ohut metallilanka tai metallikalvo, jonka resistanssi muuttuu lämpötilan mukaan. Metalleista tavallisimmin käytetään platinaa, nikkeliä kuparia ja volframia.

Yleisimmin käytetty materiaali on platina. Platinan resistanssi 0 °C lämpötilassa on 100Ω. Se tunnetaan yleisemmin nimellä Pt100 ja sen mitta-alue on -250 ... +1000 °C. Suurissa lämpötiloissa platina-anturin käyttöä rajoittaa sen suojavaipan aiheuttamat muutokset itse platinalankaan. Tämä aiheuttaa sen resistanssiin pysyviä muutoksia. Pt100 on stabiilisuutensa vuoksi tarkin lämpötila-anturi.

Lämpötilan vaikutusta Pt100 anturin resistanssiin voidaan approksimoida seuraavien kaavojen mukaisesti:

$$R(T) = R(0)[1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100)] \quad (-200^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}) \quad (10)$$

$$R(T) = R(0)[1 + AT + BT^2] \quad (0^\circ\text{C} \leq T < 630^\circ\text{C})$$

missä $R(T)$ on resistanssi lämpötilassa T , $R(0)$ on resistanssi lämpötilassa 0 °C ja vakiot ovat:

$$A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$$

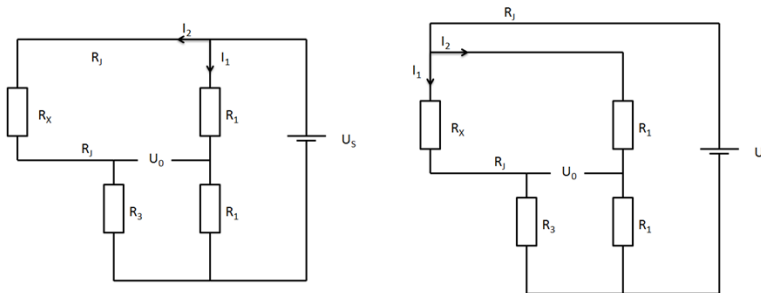
$$C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$$

Koska vakiot B ja C ovat suhteellisen pieniä, niin resistanssi muuttuu lähes lineaarisesti suhteessa lämpötilaan.

Anturin mittausepä-tarkkuus vaihtelee 0,3 ... 5 °C välillä. Anturin tarkin kohta on lämpötilan ollessa 0 °C. Anturin epätarkkuuteen vaikuttaa anturissa kulkeva virta, joka lämmittää anturia. Tavallisesti virta rajoitetaan 10mA:iin. Itse resistanssiarvo muutetaan mitattavaksi signaaliksi anturin lähetinyksikössä. Lähetinyksikkö perustuu siltakytkentään, jossa johdinresistanssien vaikutusta kompensoidaan kaksi- tai kolmijohdinkytkennällä. Kuvassa 22 on esitetty Pt100- anturin mittasiltana toimivat kaksi- ja kolmijohdinsilta.

Kaksijohdinsillassa molempien mittausjohtimien resistanssia kuvataan R_j :llä ja ne summautuvat tutkittavan vastuksen resistanssiin R_x . Tämä summautuminen on

systemaattinen virhe, joka tulee eliminoida tuloksesta molempien johtimien resistanssi erikseen ja vähentää ne saadusta mittaustuloksesta. (Aumala 1993; Fraden 2010)



Kuva 22. Kaksi- ja kolmijohdinsiltakytkennät Pt100- anturin mittasiltana. (Aumala 1993)

2.6. Tiedonsiirtostandardit

2.6.1. RS-232

RS-232 (recommended standard-232) on tietoliikenteen rajapintastandardi kahden elektronisen laitteen liittämiseen ja protokolla alhaisen nopeuden sarjaliikenteelle päätelaitteen ja kommunikaatiolaitteen välillä. RS-232 on hyvin yleisesti käytetty tietoliikenneprotokolla tietokoneiden sarjaliikenneporteissa. Vuonna 1987 toimialajärjestäjä Electronic Industries Association (EIA) julkaisi uuden version standardista ja muutti sen nimeksi EIA-232-D. Monet kuitenkin kutsuvat kyseistä standardia joko RS-232C:ksi tai pelkästään RS-232:ksi.

RS-232 on standardiprotokolla, jota käytetään asynkroniseen sarjaliikennekommunikaatioon kahden laitteen välillä. Laitteita kutsutaan DTE (Data Terminal Equipment) ja DCE (Data Circuit-terminating equipment) laitteiksi. DTE laite on päätelaite, joka muuntaa halutun informaation lähetettäväksi sarjamuotoiseksi signaaliksi tai vastaavasti muuntaa vastaanotetun signaalin informaatioksi. DCE on puolestaan kommunikaatiolaite, joka tavallisesti on esimerkiksi modeemi.

RS-232 liitäntätyyppinä on kolme erilaista: yhdeksän pinninen D-tyypin liitin, 25 pinninen D-tyypin liitin sekä RJ45 (Registered Jack) liitin. Yhdeksän pinninen eli DB9-liitin on standardisoitu ja sen pinnijärjestys on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. DB9 pinnijärjestys ja signaalit sekä niiden kuvaukset. (Bai, 2005)

| Pinninumero | Signaali | |
|-------------|----------|---------------------|
| 1 | DCD | Data carrier detect |
| 2 | RxD | Receive Data |
| 3 | TxD | Transmit Data |
| 4 | DTR | Data terminal ready |
| 5 | GND | Signal ground |
| 6 | DSR | Data set ready |
| 7 | RTS | Ready to send |
| 8 | CTS | Clear to send |
| 9 | RI | Ring Indicator |

Taulukossa 2 on esitetty 25- pinninen RS-232 liitin, jota kutsutaan DB25-liittimeksi. Suurin osa DB25- liittimen pinneistä ei ole käytössä normaalissa PC käytössä, koska nykyisin PC tietokoneissa on vain käytössä vain yhdeksän pinniä eli DB9- liitin.

Taulukko 2. DB25 pinnijärjestys ja signaalit sekä niiden kuvaukset. (Bai, 2005)

| Pinninumero | Signaali | | Pinninumero | Signaali | |
|-------------|----------|-------------------|-------------|----------|-------------------------|
| 1 | PG | Protective ground | 14 | STD | Secondary TD |
| 2 | TD | Transmitted data | 15 | TC | Transmit Clock |
| 3 | RD | Received data | 16 | SRD | Secondary RD |
| 4 | RTS | Request to send | 17 | RS | Receiver clock |
| 5 | CTS | Clear to send | 18 | | Ready to Send |
| 6 | DSR | Data set ready | 19 | SRS | Secondary RTS |
| 7 | SG | Signal Ground | 20 | DTR | Data Terminal Ready |
| 8 | CD | Carrier detect | 21 | SQD | Signal Quality Detector |
| 9 | + | Voltage (testing) | 22 | RI | Ring Indicator |
| 10 | - | Voltage (testing) | 23 | DRS | Data rate select |
| 11 | | 11 | 24 | XTC | External Clock |
| 12 | SCD | Secondary CD | 25 | | 25 |
| 13 | SCS | Secondary CTS | | | |

Kolmas liitäntätyyppi RS-232 liitännälle on kahdeksan pinninen RJ45- liitin, joka on paremmin tunnettu lähiverkkoliittimenä eli LAN (Local Area Network) liittimenä erityisesti ethernet lähiverkkoratkaisuissa. Toisin sanoen RJ-45 on yksinkertainen liitin digitaaliseen tiedonsiirtoon yli perinteisen puhelinkaapelin. Kaapeli voi olla joko kierretty parikaapeli tai kiertämätön. Taulukossa 3 on esitetty RJ45- liitännän pinnijärjestys. (Bai 2005)

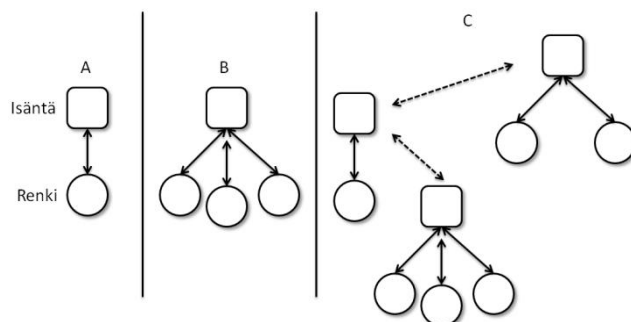
Taulukko 3. RJ45 pinnijärjestys ja signaalit sekä niiden kuvaukset. (Bai. 2005)

| Pinninumero | Signaali | |
|-------------|----------|-------------------------------|
| 1 | DSR/RI | Data set Ready/ring indicator |
| 2 | DCD | Data Carrier Detect |
| 3 | DTR | Data Terminal Ready |
| 4 | SGND | Signal Ground |
| 5 | RD | Receive Data |
| 6 | TD | Transmit Data |
| 7 | CTS | Clear to Send |
| 8 | RTS | Request to Send |

2.6.2. Bluetooth

Bluetooth on avoin tietoliikennestandardi, joka on kehitetty korvaamaan lyhyen kaapeleita kiinteiden tai liikkuvien laitteiden välillä. Bluetooth toimii 2,4GHz ISM-alueella (*Industry, Science, Medical*) eli 2,4-2,4835 GHz alueella. Bluetooth jakaa alueen 1 MHz kaistoihin, joita on Euroopassa käytössä 79 kappaletta. Ensimmäinen Bluetooth kanava alkaa taajuudesta 2,402GHz.

Bluetooth tekniikka vaatii toimiakseen vähintään kaksi laitetta. Bluetooth toimii isäntä-renki (master-slave) arkkitehtuuriin perustuen, eli yksi laite on aina isäntä ja muut ovat renkejä. Laitteena isäntä ei poikkea muista, vaan laitteella on vain isännän rooli. Kuvan 23 A-kohdassa on esitetty pienin mahdollinen Bluetooth verkko sekä verkko, jossa on kolme renkilaitetta.

**Kuva 23.** Bluetooth-topologiat. (Hakala&Vainio. 2005)

Tällainen isäntä-renki bluetooth-verkko on käytännössä kaksipisteysteys, eli *point to point* yhteys. Siinä kaksi samanlaista laitetta välittää tietoa toisilleen. Kuvan 18 B-kohdassa on esitetty hieman laajempi ratkaisu, jossa isännän alaisuudessa toimii kolme renkiä. Tällaista verkkoa kutsutaan *Piconetiksi* ja siinä voi yhteensä olla korkeintaan seistämän renkilaitetta. Kuvan 18 C-kohdassa on esitetty ratkaisu, jossa yksi laite toimii

yhdyskäytävänä verkkojen välillä. Koska bluetooth-verkko voidaan perustaa vain kahdeksan laitteen välille, voidaan useampaan laitteeseen ottaa yhteys näin pitämällä yhden verkon isäntää yhdyskäytävänä verkkojen välillä. Tällaista verkkoa kutsutaan *Scatternetiksi*.

Bluetooth laitteiden yhdistäminen tapahtuu yleensä luomalla pariliitos laitteiden välille. Avaimena voidaan käyttää PIN-koodia (*Personal Identification Number*). Esimerkiksi tietokoneen ottaessa yhteyttä Bluetooth- verkossa näkyvään matkapuhelimeen, matkapuhelimeen tulee ilmoitus yhteydenottopyynnöstä. Tämän jälkeen yhteys hyväksytään ja matkapuhelimeen syötetään PIN-koodi, jonka jälkeen tietokoneelle tulee ilmoitus, että yhteys voidaan luoda ja samalla se pyytää PIN-koodia. Kun PIN koodi on syötetty laitteiden välille muodostuu pariliitos. PIN-koodi voidaan siis luoda yhteyttä muodostaessa tai se voidaan konfiguroida laitteeseen kiinteäksi. Yleensä laitteissa, joissa ei ole omaa käyttöliittymää, on kiinteä PIN- koodi. Tällainen laite on esimerkiksi langattomat kuulokkeet. Esimerkiksi Bluetooth-sarjaliikenne porttia voidaan konfiguroida tietokoneeseen asennetun ohjelmiston avulla jolloin laite on yhdistetty USB-kaapelilla (*Universal Serial Bus*) kiinteästi.

Bluetooth-spesifikaatiolla on määritetty tiedonsiirtoon kolme eri lähetysteholuokkaa taulukon 4 mukaisesti. Suurin osa käytössä olevista laitteista käyttävät 1mW:n lähetystehoa. (Hakala&Vainio 2005)

Taulukko 4. *Bluetooth-spesifikaation tiedonsiirron ominaisuudet. (Hakala&Vainio, 2005)*

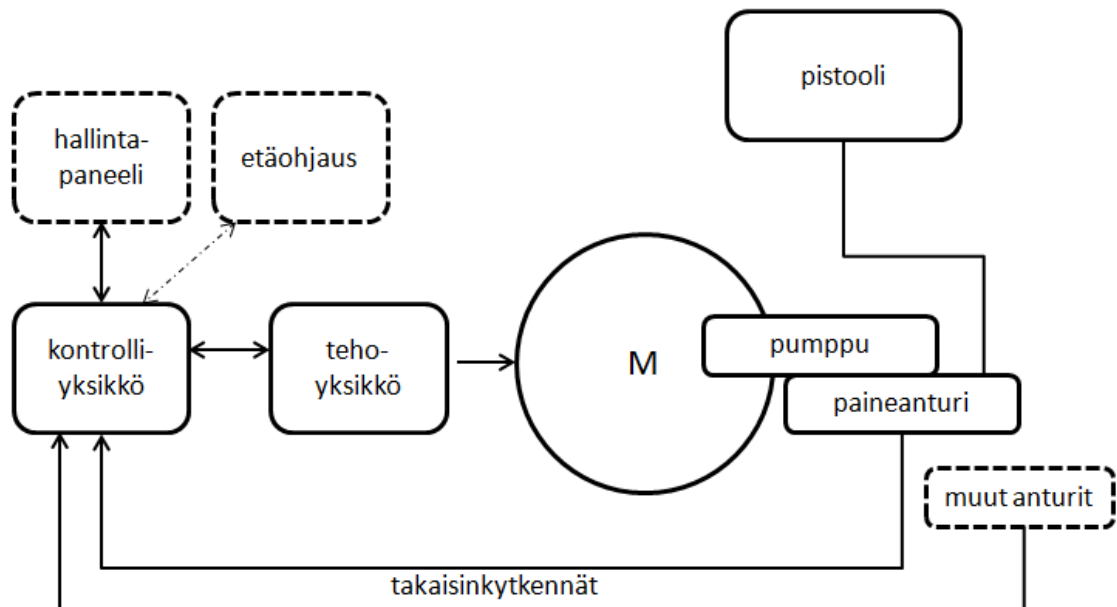
| Kantama | Teholuokka | Suurin teho | Pienin teho | Tehonsäätö |
|---------|------------|-------------|-------------|---------------|
| 100m | 1 | 100mW | 1mW | pakollinen |
| 10m | 2 | 2,5mW | 1mW | ei pakollinen |
| 10m | 3 | 1mW | 1mW | ei pakollinen |

3. TOTEUTUS

3.1. Maalausjärjestelmän toimintaperiaate

Maaliruisku *Larius Torpedon* toimintaperiaate on nostaa maalia järjestelmän letkustoon ja pitää haluttu työskentelypaine. Maaliruiskun toiminta perustuu neljään pääosaan, jotka ovat moottori-pumppu yhdistelmä, säädettävä painekeytkin, ohjauselektronikka sekä pistooli. Järjestelmä on suljettu järjestelmä ja katkoo moottorin ohjausta saavutettuaan säädetyt paineen.

Maaliruiskun uusi toimintatapa perustuu kuuden eri pääosan toimintaan. Pääosat ovat pistooli, hallintapaneeli, kontrolliyksikkö, tehoyksikkö ja moottori-pumppu yhdistelmä sekä paineanturi. Kappaleessa on esitetty kaikkien pääosien tekninen toteutus sekä toiminta yksityiskohtaisesti. Järjestelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 24. Kuvassa katkoviivalla merkityt kaaviot ovat lisäosia, joita järjestelmä ei tarvitse toimiakseen, mutta ovat optioita joita voidaan liittää järjestelmään.



Kuva 24. Uuden järjestelmän pääosat ja niiden vuorovaikutussuhteet.

3.1.1. Hallintapaneeli

Hallintapaneelilla nimensä mukaisesti hallitaan järjestelmää. Sen pääasiallinen tehtävä on kuitenkin asettaa haluttu työskentelypaine. Paineen asettaminen tapahtuu hallintapaneelissa olevien näppäimien avulla ja asian helpottamiseksi paneelissa on myös näyttö. Näytöllä on kaksi tehtävää, jotka ovat asetettavan paineen näyttäminen sekä todellisen paineen näyttäminen. Hallintapaneelien nappien avulla asetetaan haluttu työskentelypaine, joka näkyy näytöllä numeroina ja yksikkönä on baari. Tämän jälkeen painetaan toimintonappulaa, joka lähettää halutun painetiedon kontrolliyksikölle. Kontrolliyksikkö käynnistää moottorin, jolloin pumppu alkaa nostamaan maalia ja paine alkaa samalla nousta. Pumpun ja pistoolin väliin on asetettu paineanturi, joka on takaisinkytketty kontrolliyksikköön. Paineanturi antaa kontrolliyksikölle kokoajan tietoa järjestelmässä olevasta paineesta ja tulostaa sen hallintapaneelin näytölle. Kun letkussa oleva paine on sama kuin haluttu paine, niin kontrolliyksikkö sammuttaa moottorin.

Hallintapaneeli voi olla asetettuna joko suoraan kontrolliyksikköön tai se voi olla etäohjattava joko langattomasti tai kiinteästi.

3.1.2. Kontrolliyksikkö

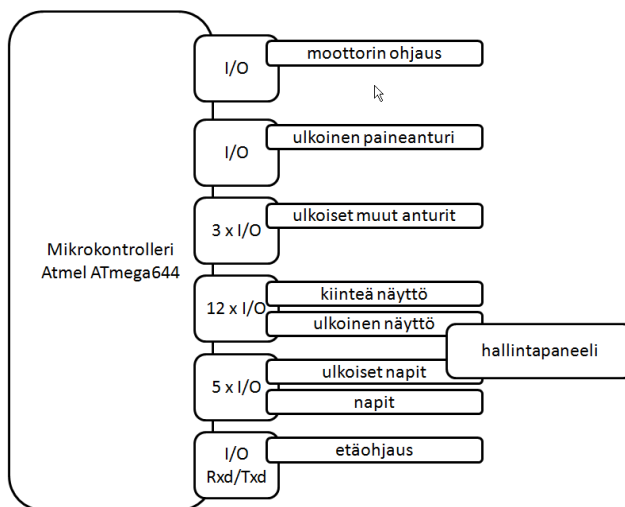
Kontrolliyksikkö koostuu piirilevystä, jossa on mikrokontrolleri, viisi nappia, näyttö, tulo- ja lähtöliittimet sekä toiminnan edellyttäviä vastuksia, kondensaattoreita ja transistoreja. Painonapit sekä näyttö on yhdistettävissä aikaisemmin mainittuun erilliseen hallintapaneeliin.

Mikrokontrollina on 44 -jalkainen Atmelin ATmega644, jonka tarkemmasta toiminnasta on kerrottu kappaleessa 2.3.1. Atmega644 mahdollistaa usean toiminnan kontrolloimisen analogisten sekä digitaalisten I/O- (*input/output*) eli tulo- ja lähtöporttien lukumäärän ansiosta. Moottorin ohjaukseen on varattu yksi I/O portti, joka toimii lähtönä moottoria ohjaavalle tehotransistorikytkennälle.

Eniten digitaalituloporteja mikrokontrollerista vie kontrollilevyllä oleva näyttö. Näyttö koostuu neljästä seitsemän segmentti led- näytöstä, eli se vaatii kaikkiaan kaksitoista I/O porttia. Kahdeksan I/O:ta on tarkoitettu jokaiselle yhden näyttönumeron segmentille sekä puolipisteelle. Neljä I/O:ta on transistoreille, jotka ohjaavat näytön eri näyttönumeroja. Transistoreilla toteutetaan näytön toimiminen niin sanotulla vuorotteluperiaatteella, eli jokaisen näyttönumeron ledit palavat vuorotellen, kuitenkin niin suurella taajuudella, että ihmissilmä ei sitä erota ja näyttäisi siltä, että kaikki neljä näyttönumeroa olisivat samaan aikaan päällä.

Kontrolliyksikössä on yksi I/O portti varattu paineanturille ja kolme I/O:ta on varattu muille antureille, esimerkiksi lämpötila-anturille. Paineanturin I/O toimii tulona eli antaa takaisinkytkentätietona hetkellisen toimintapainetiedon kontrollerille.

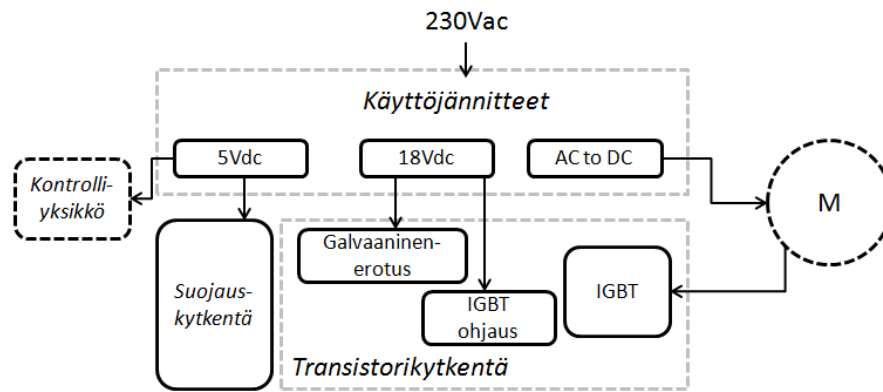
Hallintaan tarkoitetuille painonapeille on varattuna viisi I/O porttia, jotka ovat tuloportteja kontrollerille. Kontrolliyksikön painonapit ovat kytkettynä yksinkertaisesti siten, että nappia painettaessa kytkentä menee maatasoon eli tulo menee nolllaksi. Näin ollen ohjelmoinnissa voidaan luoda eri toimintoja napeille. Erilliselle etäohjausmoduulille eli kauko-ohjaukselle on varattuna yksi I/O portti sekä tiedon vastaanottamiseen ja lähettämiseen tarkoitetut portit eli rxd (*receive data*) ja txd (*transfer data*). Kuvassa 25 on esitetty I/O porttien liitännät eri toiminnoille.



Kuva 25. Tulo- ja lähtöporttien kytkennät.

3.1.3. Tehoyksikkö

Tehoyksiköllä tarkoitetaan järjestelmässä olevaa teholähdettä, jonka syöttönä toimii verkkosähkö 230Vac. Tehoyksikön toiminnallinen tarkoitus on käyttää sähkömoottoria kontrolliyksiköltä tulevan signaalin perusteella. Tehoyksikkö toimii myös jännitelähteenä järjestelmässä oleville erilaisille aktiivikomponenttikytkennöille. Käyttöjännitelähdöt on toteutettu käyttämällä muuntajia, jänniteregulaattoreita sekä tasasuuntauskytkentöjä. Kontrolliyksikkö sekä tehoyksikössä oleva piirin suojauskytkentä toimivat viiden voltin (5V) jännitteellä. Tehoyksikössä oleva transistorikytkentä, jossa on galvaaninen erotuspiiri sekä IGBT transistorin ohjauspiiri, toimii 18 voltin tasajännitteellä. Moottorille menevä käyttöjännite on tasasuunnattu suoraan verkkosähköstä tasasuuntaussillan ja isojen kondensaattorien avulla. Kuvassa 26 on esitetty eri jännitteillä toimivat kytkennät.



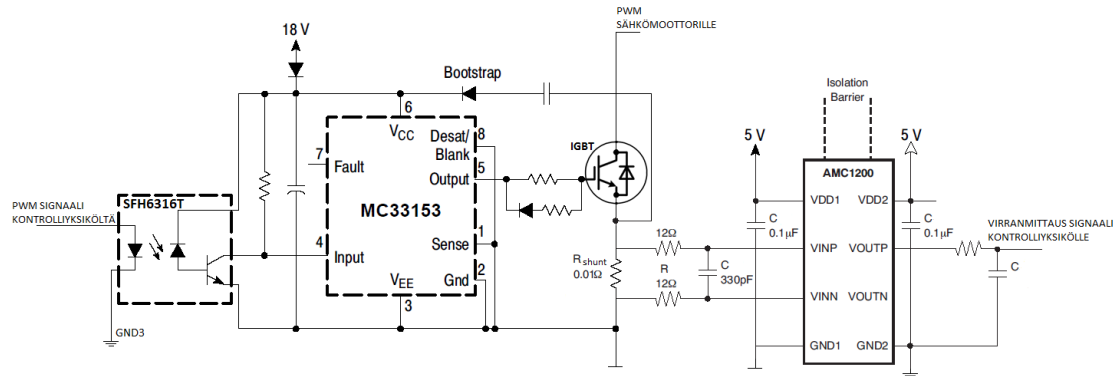
Kuva 26. Tehoyksikön kaaviokuva, jossa näkyy eri kytkennöille menevät käyttöjännitteet.

Moottorinohjaus kontrolliyksiköltä moottoriin on toteutettu siten, että ensimmäisenä komponenttina on optoerotin. Optoerotin toimii siis galvaanisena erottimena transistorikytkennän ja kontrolliyksikön välillä.

Galvaanista erotusta tarvitaan eristämään kontrolliyksikkö ja transistorikytkentä toisistaan. Galvaaninen erotin estää varauksenkuljettajien siirtymisen osien välillä eli niiden välillä ei kulje tasavirtaa. Galvaanisella erotuksella on merkitys niin eri yksiköiden välisten virta- ja jännitepiikkien ehkäisyssä kuin sähköturvallisuudessa.

Optoerotin toimintaperiaate on selitetty tarkemmin kappaleessa 2.3.6. Optoerotin lähtö on kytketty IGBT- transistorin erillisen ohjauspiiriin tuloporttiin jonka sisäinen logiikka vahvistaa signaalia kappaleen 2.3.5:ssä esitettyyn teoriaan nojaten. Vahvistettu signaali ohjataan suoraan IGBT- transistorin hilalle. Transistorin kollektori on kytketty suoraan tasasähkömoottoriin ja emitteri on kytketty maahan. Emitterin ja maan välillä on kuitenkin pieni 0,01 ohmin ja viiden watin (5W) tehoa kestävä niisanottu shuntvastus, jonka ympärille on luotu piiriä suojaava suojakytkenä.

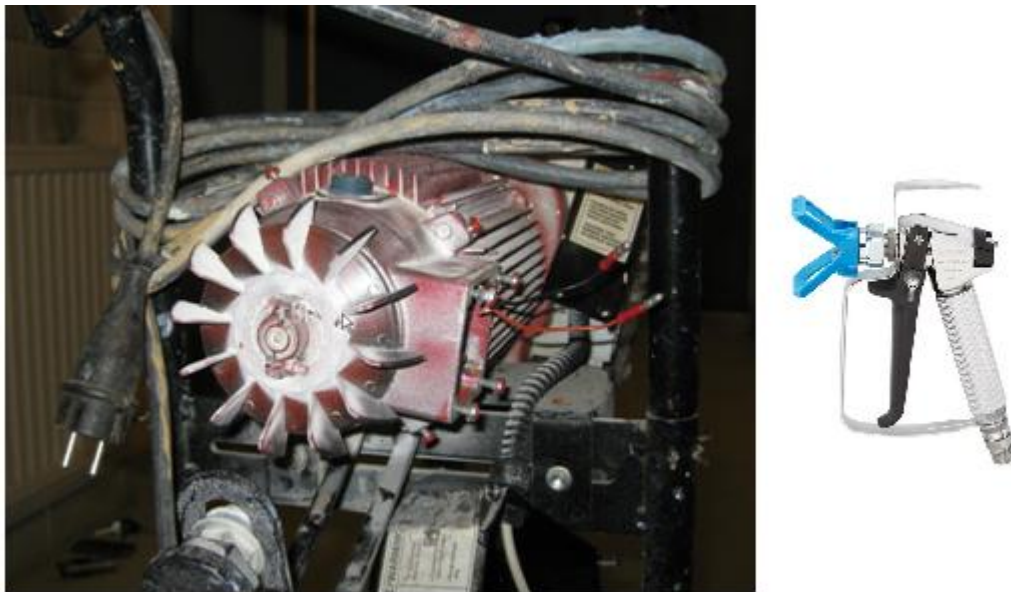
Suojakytkenän tarkoituksena on mitata kytkennässä kulkevaa virtaa vertailemalla shunt- vastuksen molemmilla puolilla olevaa jännitettä. Isolaatiovahvistimen lähtö on takaisinkytketty kontrolliyksikköön, jossa ohjelmallisesti signaalin perusteella valvotaan moottorille menevää virtaa ja näin ehkäistään piirin hajoamiseen johtavat virtapiikit. Kuvassa 27 on esitetty tehoyksikön transistorikytkentä.



Kuva 27. Tehoyksikön transistorikytkentä ja suojauskytkentä.

3.1.4. Moottori, pumppu ja maalauspistooli

Maalausjärjestelmän modernisoinnissa ei tehty muutoksia moottoriin eikä mekaanisiin laitteisiin eli pumppuun ja maalauspistooliin. Moottorina toimii alkuperäinen 0,75 kW:n ja 205V:n tasasähkömoottori, johon on suoraan kytketty mäntäpumppujärjestelmä. Koska järjestelmässä toimii alkuperäinen moottori-pumppu yhdistelmä, niin ei ole tarpeellista tehdä mitoituslaskelmia prosessin tehovaatimuksista.



Kuva 28. Maaliruiskun sähkömoottori, josta poistettu vanha elektroniikka sekä maalauspistooli Larius AT-250.

3.1.5. Paineanturi MSP350

Järjestelmän erottavimpana tekijänä on takaisinkytkentänä toimiva paineanturi. Paineanturina toimii Measurement Specialitiesin MSP 350 paineanturi. MSP 300 sarjan paineanturit ovat edullisesta hinnasta huolimatta tarkoitettu vaativiinkin olosuhteisiin. Anturi on ruostumatonta terästä ja se on koneistamalla tehty yhdestä kappaleesta. Siinä

ei ole O-renkaita tai hitsaussaumoja, joten sen kestävyys on erinomainen. Anturi on pii-pietsoresistiivinen paksukalvo tekniikalla toimiva anturi, jossa korkeita lämpötiloja kestävään lasiin on sulautettu ruostumattomasta teräksestä valmistettu kalvo. Tämä poikkeaa tavanomaisista mikrokoneistamalla tehdyistä PN-liitoksella toimivista antureista. Pii-pietsoreistiivisten antureiden tarkempaa toimintatapaa on tarkasteltu kappaleessa 2.5.2. (MSP. 2012)

3.1.6. Etäohjausyksikkö

Etäohjausyksikön tarkoituksena on helpottaa työskentelyä olosuhteissa, joissa tarvittaisiin kaksi miestä halutun työskentelypaineen asettamiseksi. Tällainen tilanne on esimerkiksi talon katon maalaus, jossa työ tehdään joko katon päällä tai henkilönostimesta. Ihanteellinen työskentelypaine saadaan vain säätämällä se sopivaksi. Etäohjausyksiköllä voidaan säätää paras mahdollinen työskentelypaine työkohteessa.

Etäohjausyksikkö koostuu piirilevystä, painonapeista, 9V jännitelähteestä ja Bluetooth radio-osasta. Piirilevy on yksinkertainen piiri, jossa on mikrokontrolleri, MAX232 sarjaliikennettä ohjaava mikropiiri ja niiden ympärille tarvittavat komponentit ja liittimet sekä RS232 sarjaliikenneportti. Sarjaliikenneportti on linkki maaliruiskun kontrolliyksikköön. Etäyhteys etäohjausyksikön ja maaliruiskun kontrolliyksikön välille voidaan toteuttaa kiinteänä langallisena tai se voidaan toteuttaa erillisen Bluetooth-moduulin avulla. Bluetooth moduuli on valmis kaupallinen sarjaliikenne porttiin liitettävä osa, jonka avulla voidaan kiinteä sarjaliikenneyhteys korvata Bluetooth radioyhteydellä. Kuvassa 29 on esitetty LM Technologiesin Bluetooth sarjaliikenne moduuli.



Kuva 29. LM Technologiesin Bluetooth sarjaliikenne moduuli.

3.2. Piirilevyjen suunnittelu ja toteutus

Piirilevyjen suunnittelu toteutettiin *CadSoft Eagle* ohjelmistolla. Käytetty ohjelmisto oli ilmainen opiskelijaversio, eli suunnittelussa oli tiettyjä rajoituksia, mm. piirilevyn koko oli rajattu.

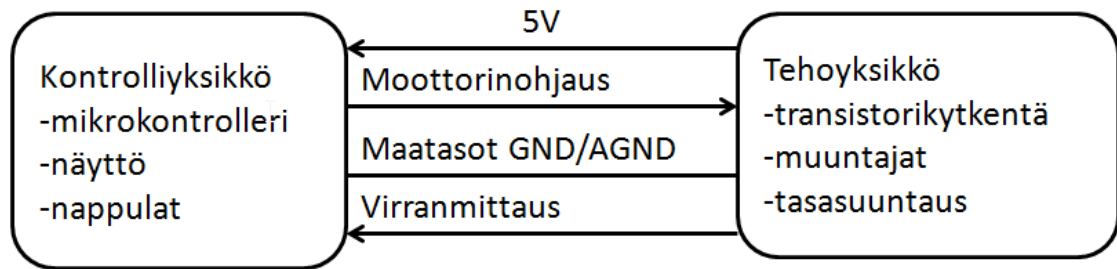
Ohjelmistolla luotiin ensin piirikaavio, jonka perusteella suunniteltiin piirilevyn layout eli komponenttien jalkojen juotoskuviot aseteltiin levyille ja johdinkuviot luotiin komponenttien välille. Piirilevyjen suunnittelussa käytettiin valmiita komponenttikirjastoja, mutta myös osa komponenteista luotiin itse todellisen piirin fyysisten mittojen sekä sähköisten ominaisuuksien perusteella.

Ensimmäinen versio elektroniikasta suunniteltiin yhdelle piirilevyille, jossa oli molemmat piirit sekä ohjaus eli kontrolliyksikkö että tehoyksikkö. Suunniteltu elektroniikka oli kuitenkin ahdas ja komponentit olivat epäloogisesti aseteltuina, päätettiin elektroniikan suunnittelu jakaa kahdelle erilliselle piirilevyille. Elektroniikan jako kahdelle levyille helpottaa tulevaisuudessa ohjelmistojen päivitystä, testausta ja simulointia, jolloin kontrolliyksikkö voidaan irrottaa itse laitteesta ja suorittaa ohjelmointi turvallisemmin ulkoista 5V tasajännitelähdettä käyttäen.

3.2.1. Piirikaavion suunnittelu

Uuden maalausjärjestelmän kontrolliyksikön ja tehoyksikön elektroniikka suunniteltiin yhtenä piirikaaviona vaikka se ne ovat fyysisesti erotettu toisistaan. Piirikaavion suunnittelun ja luomisen tarkoituksena oli kuvata eri komponenttien kytkentää toisiinsa nähden. Toisin kuin piirilevyn johdinkuviossa, piirikaaviosta voidaan nähdä selkeästi komponenttien väliset yhteydet, jotka on kuvattu viivojen avulla. Komponenttien fyysinen sijoittelu ei ole piirikaaviossa sama kuin johdinkuvio, vaan tarkoituksena sillä on kuvata mahdollisimman loogisesti ja helppolukuisesti piirin toimintaa.

Suunnittelu yhtenä isona kokonaisuutena helpotti kokonaiskuvan hahmottamista. Valmiin piirikaavion, toiminnan ja komponenttivalintojen perusteella jaoteltiin piirikaavio kahdeksi eri piiriksi, jotka ovat yhdistettyinä kaapelin avulla. Jaottelu tehtiin loppukäyttäjän toimintaa tukevaksi. Kontrolliyksikön piiriin valittiin toiminnan perusta eli mikrokontrolleri sekä hallintakomponentit, eli painonapit ja näyttö sekä niiden tukikomponentit: transistorit, kondensaattorit sekä vastukset. Kontrolliyksikön piirissä vältettiin suurien jännitteiden käyttö, eli sen aktiivikomponentit olivat kaikki 5 voltin jännitteellä toimivia. Tehoyksikköön valittiin tehoelektroniikan komponentit eli kappaleessa 2.3. esitetyt transistorikytkennän komponentit, tasasuuntaussilta, isot kondensaattorit sekä muuntajat. Kontrolliyksikön ja tehoyksikön välinen yhteys on esitetty kuvan 30 kaaviossa.



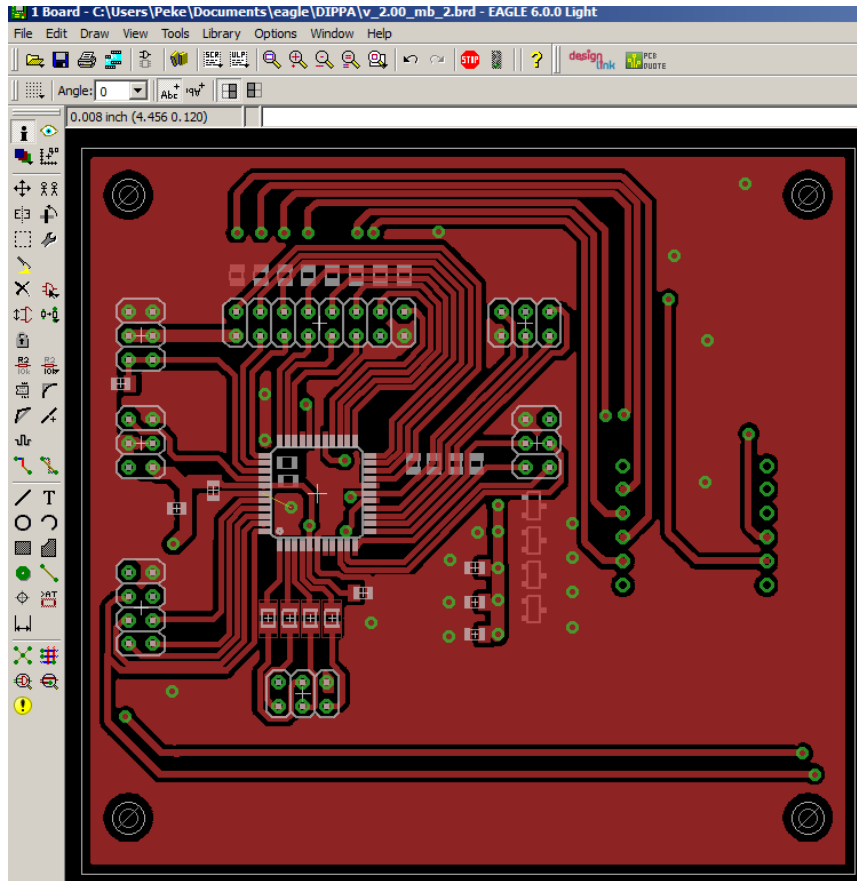
Kuva 30. *Kontrolliyksikön ja tehoyksikön väliset kytkennät.*

Kontrolliyksikön piirikaavio suunniteltiin Atmel Atmega644 mikrokontrollerin ympärille. Atmega644:ssa on 44 pinniä, joista I/O portteja on 32. I/O porttien lisäksi on neljä käyttöjännitepinniä, neljä maapinniä, kiteen kaksi pinniä, referenssi pinni analogiatuloille sekä ohjelmoinnissa tarvittava reset pinni. Liitteessä 1 on esitetty Atmega644 *TQFP*- pakkauksella varustetun mikrokontrollerin pinnijärjestys sekä I/O-pinnien vaihtoehtoiset käytöt. I/O porttien toiminnallisuudesta kontrolliyksikössä kerrottiin kappaleessa 3.1.2.

Suunnittelussa otettiin huomioon eri pinnien ja I/O porttien käyttötarkoitukset piirilevyn johdinkuvio- suunnittelua varten. Kappaleessa 3.1.2 esitettyjen toiminnallisuuden mukaan valittiin eri I/O portit eri toiminnoille. Liitteessä 2 on esitetty kontrolliyksikön piirikaavio.

3.2.2. Johdinkuvioiden suunnittelu

Piirilevyjen johdinkuviosuunnittelu eli johdinkuvioiden suunnittelu piirilevyille suoritettiin Eaglen layout editorilla. Johdinkuvioiden suunnittelu toteutettiin suoraan piirikaavion perusteella. Eaglen ohjelmiston etuna oli se, että piirikaavio voitiin suoraan viedä johdinkuvio eli layout puolelle, jolloin ohjelmisto siirsi kaaviokuvaa vastaavat komponentit layout puolelle ja säilytti komponenttien väliset yhteydet. Johdinkuvioiden suunnitteluun ei ollut varsinaisesti mitään oikeaa tapaa, mutta joitain käytännön asioita ja komponenttien sähköiset ominaisuudet tuli ottaa huomioon johdinkuvioiden suunnittelussa. Johdinkuvioiden suunnittelua ei voi muuten oppia, kuin itse tekemällä. Suunnittelun haasteena oli luoda piirilevy, jossa oli mahdollisimman vähän nollavastuksia eli nollavastuksia, joilla hypätään johtimen yli ja jatketaan vetoa toisella puolen. Suunnittelemalla johdinkuviot monikerroksiseksi, voitaisiin piirissä johtimet vetää kulkemaan eri kerroksissa, jolloin ei tarvitsisi käyttää nollavastuksia. Tarkoituksena oli saada piirilevyistä mahdollisimman kompaktit eli saada komponentit mahdutettua mahdollisimman pienelle levyille. Kuvassa 31 on esitetty kuva Eaglen Layout editorista, jossa on suunnittelussa kontrollilevyn päälipuoli eli niin sanottu top-puoli.

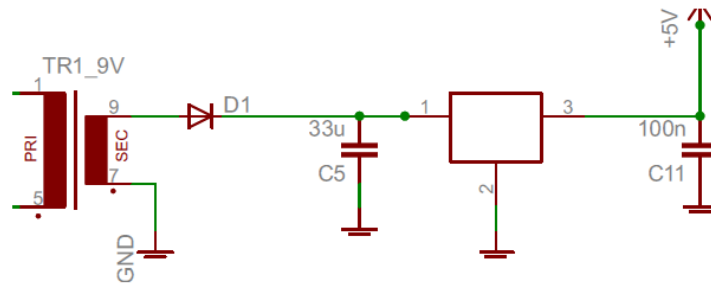


Kuva 31. Layout editori, jossa suunnittelussa kontrollilevyn top-puoli.

Piirilevyjen johdinkuviot suunniteltiin kaksipuoleisiksi. Kaksipuolisuudella saatiin jo puolittettua piirilevyn koko ja saatiin karsittua jo aikaisemmin mainitut nollavastukset minimiin läpivientejä hyväksikäyttäen. Läpivientien avulla myös johtimet vietiin toisella puolella oleville komponenteille. Eri puolelle tulevien komponenttien sijoittelua ajateltiin myös loppukäyttäjän näkökulmasta. Kontrollilevyn päälipuolelle asetettiin toimintokomponentit: napit sekä painonapit, liitännät ja prosessori asetettiin toiselle puolelle levyä. Teholevyllä puolestaan komponentit lähes kaikki asetettiin päälipuolelle niiden suuren kokonsa ja ladontatavan vuoksi. Suuremmat komponentit olivat läpiladottavia komponentteja, joka vaikeutti komponenttien asettelua tasaisesti molemmiin puolin.

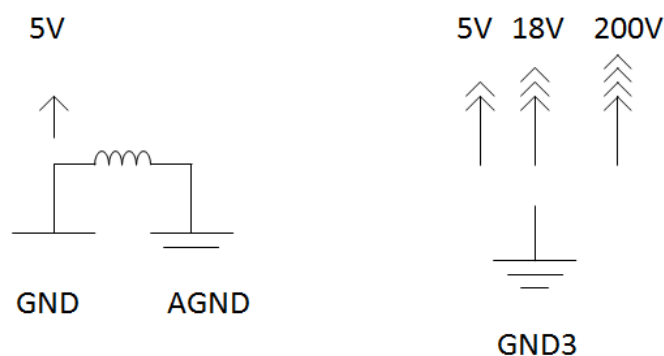
Sähköisiä ominaisuuksia, joita otettiin huomioon, olivat häiriönestokondensaattoreiden asettelu eri komponenttien ympärille, maa-alueiden luominen, eri potentiaalia käyttävien komponenttien erottelu, sekä virtasilmukoiden välttäminen levyllä. Aktiivikomponentit kuten mikroprosessorin, transistorien, tehotransistorin ohjauspiiriin, optoerottimen, isolaatiovahvistimen ja regulaattorien läheisyyteen asetettiin suodinkondensaattorit. Suodinkondensaattorien tehtävänä oli estää komponenteille tulevat häiriöt. Kondensaattorit asetettiin komponentin tulo ja lähtöpuolelle, joista ne kytkettiin maahan. Suodinkondensaattorien kapasitanssit määriteltiin siten, että

tulopuolen kondensaattori on lähtöpuolen kondensaattoria paljon suurempi. Esimerkiksi jänniteregulaattorin tapauksessa tulopuolella oli 33uF ja lähtöpuolella oli 100nF kondensaattorit. Kuvassa 32 on esitetty esimerkki kondensaattorien asettelusta.



Kuva 32. Esimerkki kondensaattorien asettelusta jänniteregulaattorin ympärille.

Suunnittelussa piirissä oli kolme eri maatasoa ja yhteensä neljä eri toiminnallisessa käytössä olevaa potentiaalia, jotka ovat kaksi 5 voltin sekä 18 voltin ja 200 voltin jännitepotentiaalit. 5 voltin potentiaalit ovat käytössä mikroprosessorilla sekä optoerottimella ja isolaatiovahvistimella. Mikroprosessorille on kytketty analogi-digitalimuutosta varten oma referenssi maa-alue, joka on erotettu mikroprosessorin maasta kelalla. Isolaatiovahvistin toimii eri potentiaaleissa olevilla 5 voltin käyttöjännitteillä ja se suunniteltiin siten, että toinen on tehpuolella ja toinen kontrollipuolella. Kytkenässä on siis huomioitu mahdolliset jännitepiikit, jotka voivat tulla tehpuolelta. Moottoria ohjaavan IGBT transistorin ohjauskomponentin käyttöjännite 18V ja sähkömoottorille menevä tasasuunnattu 200V ovat kytkettyinä tehpuolen maahan, jonne isolaatiovahvistimen 5VDC on kytketty. Kuvassa 33 on tarkemmin esitetty eri maatasot potentiaalit.



Kuva 33. Piirillä olevat potentiaalit ja maa-alueet.

Suunnittelussa otettiin huomioon virtasilmukoiden välttäminen. Virtasilmukat syntyvät, kun joudutaan vetämään vetoja komponentilta toiselle pitkän matkaa levyllä. Komponentit pyrittiin asettelemaan levyllä siten, että ei syntyisi virtasilmukoita ja vedot on hajautettu, siten että eri komponenttien käyttöjännitteet on pyritty asettamaan rinnan.

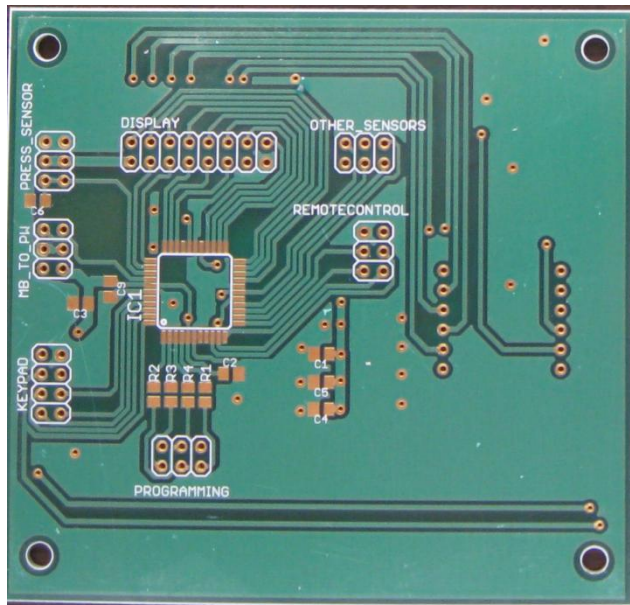
3.2.3. Piirilevyjen valmistus

Suunnitellut piirilevyt teetettiin piirilevynvalmistusfirmassa. En lähtenyt valmistamaan itse piirilevyä, vaikka siihen olisi ollut mahdollisuus yliopiston laboratoriotiloissa. Itse tekemällä olisin ehkä säästänyt muutaman euron, mutta laatu olisi kärsinyt erittäin paljon.

Piirilevyt teetettiin Olimex nimisessä piirilevynvalmistusfirmassa, jonka toimitilat sijaitsevat Bulgariassa. Olimexiin päädyin kaverin suosittelun perusteella. Olimexin etuina olivat alhainen hinta eikä siellä ollut minimimäärää tilattavalle levymäärälle. Tilattavalle levyille ei myöskään ollut rajoituksia, montako eri piirikaaviota sille on suunniteltu. Levyjen ainoana rajoituksena oli koko. Painava syy, miksi levyt teetettiin ulkopuolisella toimijalla, oli se, että levyt oli suunniteltu kaksipuoleiseksi. Kaksipuolisuus olisi asettanut omat haasteensa piirilevyn valmistuksessa ja läpivientien luomisessa. Teettämällä piirilevyt ammattilaisella minimoitiin epäonnistumisen riskit.

Lisäksi Olimexin tuotteet olivat RoHS (*The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*) direktiivin mukaisia. RoHS on Euroopan Unionin säännös, jolla rajoitetaan haitallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa.

Piirilevyjen tilaus tehtiin lähettämällä Eaglen layout tiedostot Olimexille, jossa johdinkuviolle tehtiin vielä niinsanottu *design rule check* eli mahdolliset suunnitteluvirheet tarkistettiin ja korjattiin. Tilaus oli toimitettuna Suomeen noin parissa viikossa tilausajankohdasta. Tilasin levyistä kahdet kappaleet ja levyjen laatu oli kiitettävä. Kuvassa 34 on esitetty Olimexilta saapuneet piirilevyt.



Kuva 34. Valmiin kontrollilevyn top-puoli kalustamattomana.

3.2.4. Piirilevyjen komponentit ja kalustus

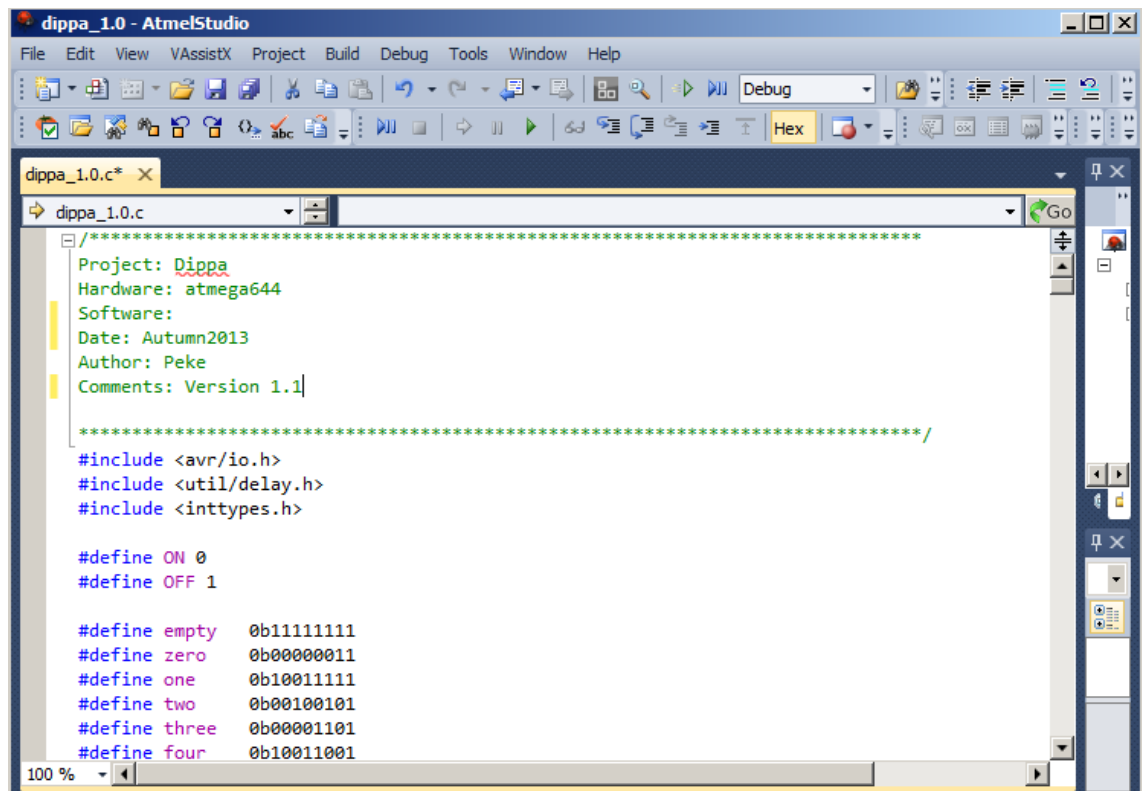
Piirilevyille asennettavat komponentit olivat pääosin pintaliitoskomponentteja lukuun ottamatta tehoelektronikan komponentteja. Suurien volyymien tapauksessa pintaliitoskomponenttien juottaminen tavallisesti tehdään juotospastaa käyttäen ja pastan juotosprosessi tapahtuu uunissa. Komponentit päädyttiin juottamaan käsin kolvia ja tinaa käyttäen, koska kyseessä oli vain yksi piirilevy ja sen komponentit. Haastavinta juotosprosessissa oli mikroprosessorin juottaminen levyille, joka oli 44 pinninen TQFP-pakkauksella oleva komponentti. Reilusti fluksia käyttämällä ja kolvia liu'uttamalla pitkin komponentin jalkariviä saatiin kiitettävä juotostulos, jossa ei ole oikosulkuja

Yhteensä komponentteja piirilevyllä oli noin 80, joista 35 tehovevyllä ja 45 kontrollilevyllä. Pääosa komponenteista hankittiin Yhdysvaltaisesta elektroniikka-alan verkkokaupasta, jossa oli kilpailukykyiset hinnat Euroopan tai Suomen vastaaviin. Komponenttien hinnat ilman postikuluja olivat noin puolet halvemmat, eikä komponenteissa ollut minimimäärärajoituksia, joten hankintapaikan valinnassa ei ollut päätösongelmia. Komponenttien hinnaksi tuli noin 80 euroa, jonka lisäksi tilattiin vielä samasta paikasta paineanturi, jonka hinta oli noin 70 euroa.

Tehovevyille suunnitellut tehoelektronikan komponentit, kuten esimerkiksi isot kondensaattorit ja IGBT transistori olivat läpiladottavia komponentteja. Läpiladottavien komponenttien juotosprosessissa ei ollut juuri ongelmia. Tehovevyn muuntajien ja muiden isojen komponenttien johdosta tehovevyn paino nousi yllättävän suureksi. Suuren painon vuoksi tehovevyille pitäisi suunnitella vankka asetelma, jotta se pysyisi paikoillaan vaadittavissa olosuhteissa.

3.2.5. Ohjelmointi ja sen prosessikaaviot

Piirillä olevan mikroprosessorin ohjelmointi suoritettiin C-kielellä. Käyttämällä ohjelmitavaa piiriä saatiin huomattavasti karsittua komponenttien määrää. Ohjelmitavan mikropiirin olisi voinut korvata erilaisilla operaatiologiikkakomponenteilla. Pelkillä logiikkakomponenteilla olisi saanut tehtyä yksinkertaisen sovelluksen, mutta mikropiirin avulla saatiin toteutettua paljon erilaisia ominaisuuksia. Työkaluina ohjelmoinnissa käytettiin AtmelStudio 6 ohjelmistoa sekä Atmel AVR Dragon debuggeria. Ennen varsinaista ohjelmointia tehtiin testiohjelmiä piirin toimivuuden testaamiseksi sekä piirillä olevien nappien ja näytön toimintaa testattiin. Kuvissa 35 ja 36 on esitetty ohjelmointityökalut.



Kuva 35. *AtmelStudio 6 ohjelmistoympäristö.*

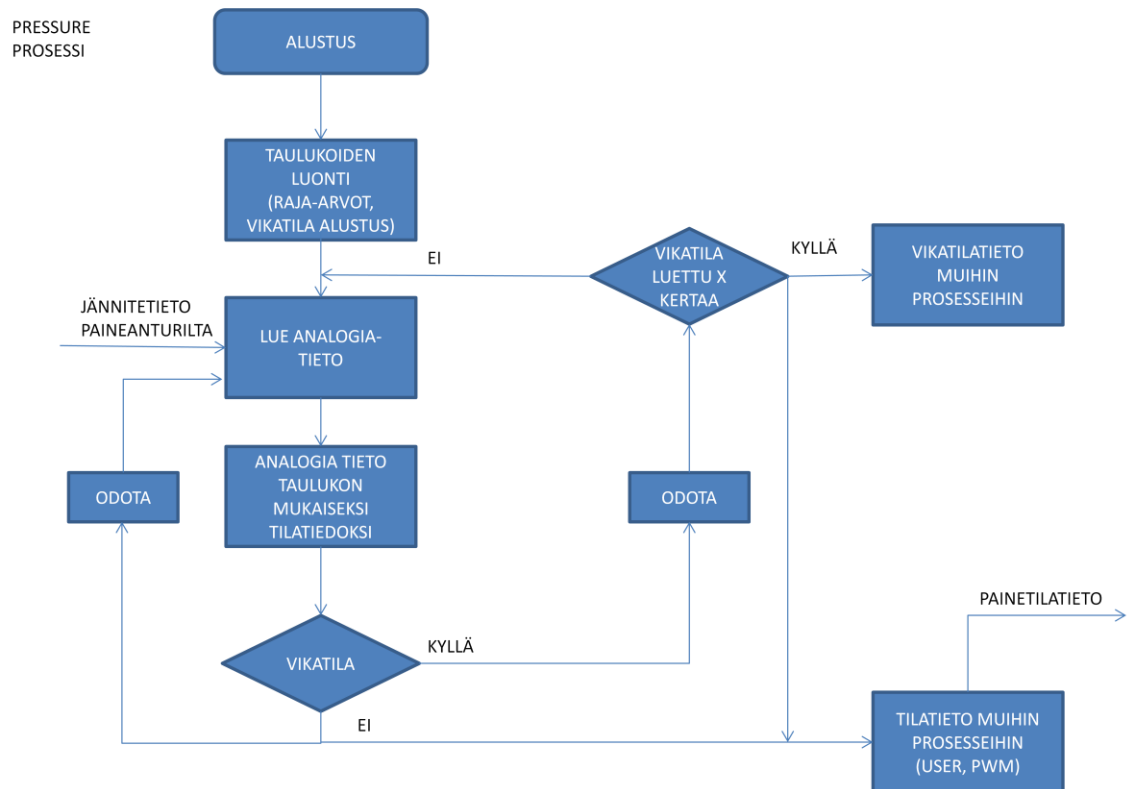


Kuva 36. *AVR Dragon Debugger ohjelmointityökalu.*

Varsinaisen ohjelman suunnittelu tapahtui ensin luomalla vuokaavio ohjelman toiminnasta. Pääohjelma suunniteltiin siten, että se sisältää erilaisia prosesseja eli

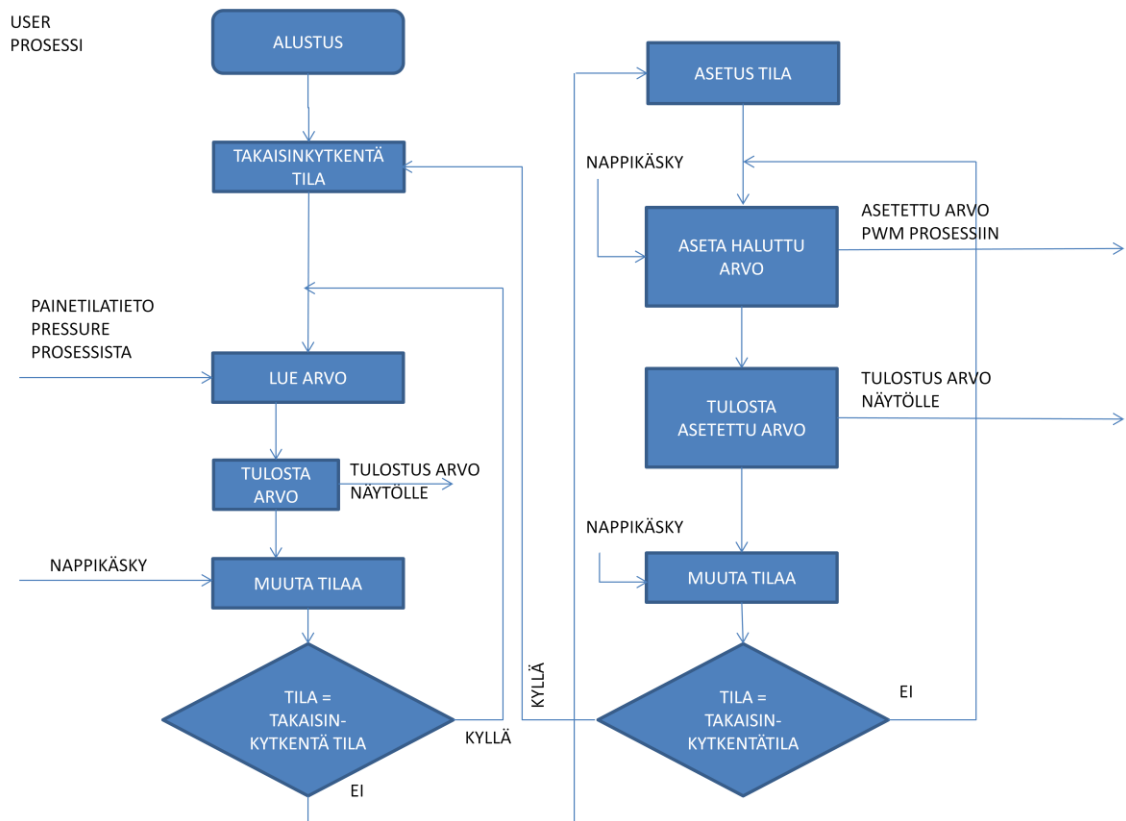
aliohjelmaa. Pääohjelman jakaminen prosesseihin helpottaa ohjelmiston päivittämistä, laajentamista ja vianetsintää. Pääohjelman kriittisiä prosesseja ovat moottoria ohjaava *PWM*- prosessi, paine-anturin tiedon takaisinkytkentätiedon antava *PRESSURE*- prosessi sekä *USER*- prosessi, joka oli käyttöliittymä laitteelle. Käyttöliittymän tärkeimmät tehtävät oli halutun painearvon asetus sekä takaisinkytkentätiedon luku paineanturilta sekä sen indikointi. *PWM* prosessi oli nimensä mukaisesti pulssinleveysmodulaation määrittäjä pääohjelmalle. *PWM* prosessissa määritellään pulssinleveysmodulaation taajuus sekä leveys. Pulssinleveysmodulaatiolle tehtiin erillinen prosessi sen tärkeyden vuoksi. Perinteisesti pulssinleveysmodulaatio voitaisiin toteuttaa erillisellä piirillä, mutta työssä haluttiin hyödyntää mikroprosessorin pulssinleveysmodulaatioajastusominaisuusrekisteriä. *PRESSURE* prosessissa käsiteltiin takaisinkytkentänä tulevaa painetietoa. Painetieto oli jännitetieto, joka on välillä 0,5V-4,5V. *PRESSURE* prosessin tärkein tehtävä oli muuttaa analogiatieto digitaaliseksi, jota käytettiin ohjelman muissa prosesseissa ja pääohjelmassa. *PRESSURE* prosessi sisälsi myös taulukkoja *USER* prosessin näyttöä käsittelevään osaan. Edellä mainittujen prosessien lisäksi on hyvä mainita myös *ALARMS*- prosessi, joka toimi käyttäjälle vianetsintä tilanteessa apuvälineenä. *ALARMS* prosessissa koottiin piirissä ja itse toiminnassa tapahtuvat varoitukset ja vikailmoitukset. *I/O* prosessissa käsiteltiin piirille tulevia fyysisiä tuloja ja lähtöjä. Tulot ohjattiin prosessista muihin prosesseihin ja lähdöt ohjattiin prosesseista ulos joko loogisena tai reaalisenä signaalina.

Ensimmäisenä vuokaaviona on esitetty kuvassa 37 esiintyvä *PRESSURE* prosessi. *PRESSURE* prosessi kuvaa paineen fyysistä takaisinkytkentätietoa paineanturilta. Ensimmäinen tapahtuma ohjelmassa on erinäisten alustusten tekeminen. Alustuksiin kuuluivat esimerkiksi mikropiirin porttien alustus lähdöiksi ja tuloiksi. Rakennealustusten jälkeen alustetaan prosessin raja-arvot sekä vikatila-alustus. Alustusten jälkeen luetaan jännitetieto *I/O* prosessista, josta fyysinen analoginen jännitetieto välitetään eteenpäin muihin prosesseihin. Jännitetiedon luvun jälkeen se skaalataan ennalta määritetyn taulukon mukaiseksi vastaavaksi tiedoksi. Taulukoinnin jälkeen arvo joko on raja-arvojen sisällä tai ei ole. Mikäli arvo ei ole raja-arvojen sisällä paineanturin tilatieto luetaan uudelleen X kertaa. Parametri X:llä määritetään se kuinka monta kertaa jännitetiedon vikatila saa tulla ennen kuin se voidaan osoittaa oikeaksi vikatilaksi ja lähettää muihin prosesseihin tieto. Mikäli vikatilaa ei ole niin jännitetiedon taulukkoa vastaava tilatieto välitetään muihin prosesseihin painetilatietona.



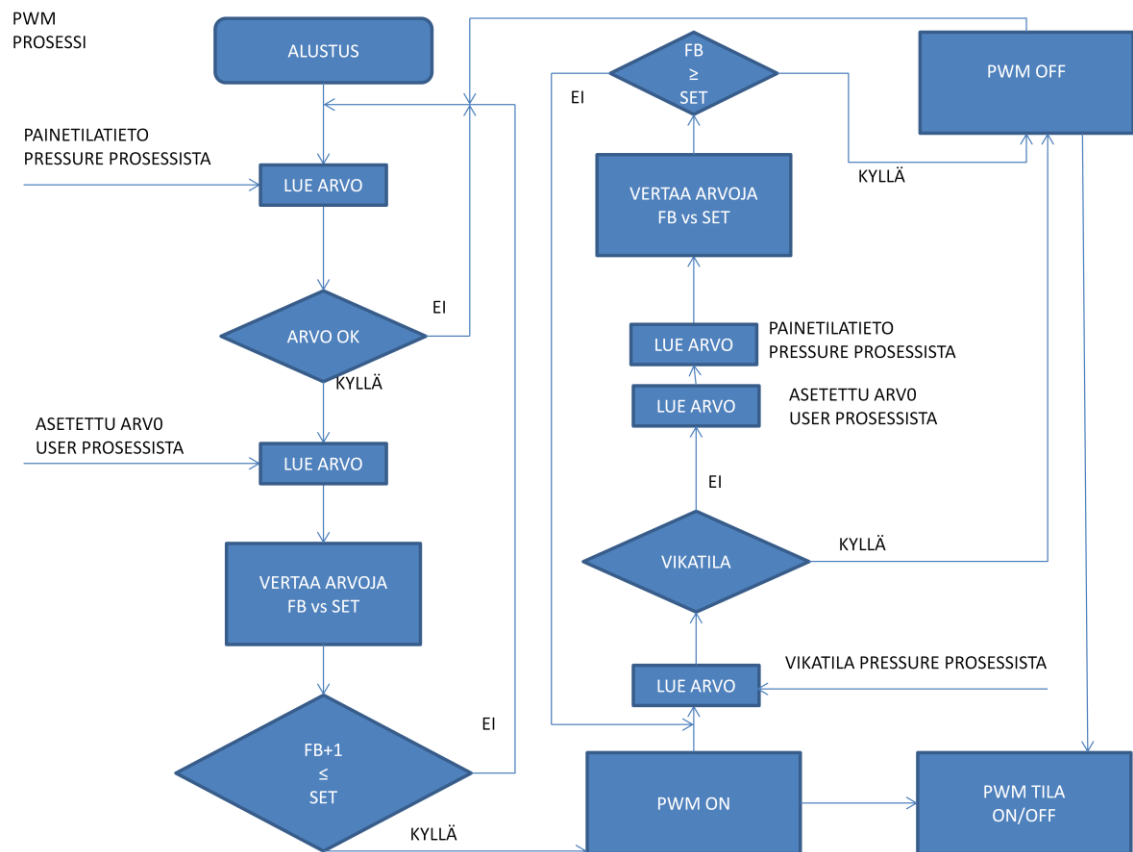
Kuva 37. Pressure prosessin vuokaavio.

Kuvassa 38 on esitetty vuokaavio *USER* prosessista. Prosessin teemana on se, että kokoajan ollaan jossakin tilassa. Alustuksen jälkeen prosessi kulkee kohtaan, jossa ollaan takaisinkytkentätilassa. Takaisinkytkentätilalla tarkoitetaan tilaa, missä käyttäjä näkee näytöllä paineen takaisinkytkentätiedon, eli oikean painetilätiedon. Painetilatieto tulee *PRESSURE* prosessista. Kaaviossa nähdään kohdat *lue arvo* sekä *tulosta arvo*, jossa tieto tulostetaan arvo näytölle. Tilaa voidaan muuttaa asetustilaksi nappia painamalla. Mikäli tilanvaihtonappikäsky tulee, niin siirrytään toiseen tilaan; asetustilaan. Kaaviosta myös nähdään, mikäli nappikäskyä ei tule, niin prosessi lukee kokoajan takaisinkytkentätietoa ja tulostaa sen hetken painetiedon näytölle. Asetustilassa ollessa nappikäskyillä muutetaan asetusarvoa, eli käyttäjän haluamaa painearvoa. Asetettu arvo kirjoitetaan *PWM* prosessiin, jossa tietoa käytetään moottorin ohjaukseen. Sama asetettu arvo tulostetaan myös näytölle, jolloin käyttäjä voi asettaessaan lukea arvon näytöltä. Asetuksen jälkeen voidaan vaihtaa jälleen tilaa takaisinkytkentätilaan, jolloin näytöllä nähdään todellinen painetilatieto.



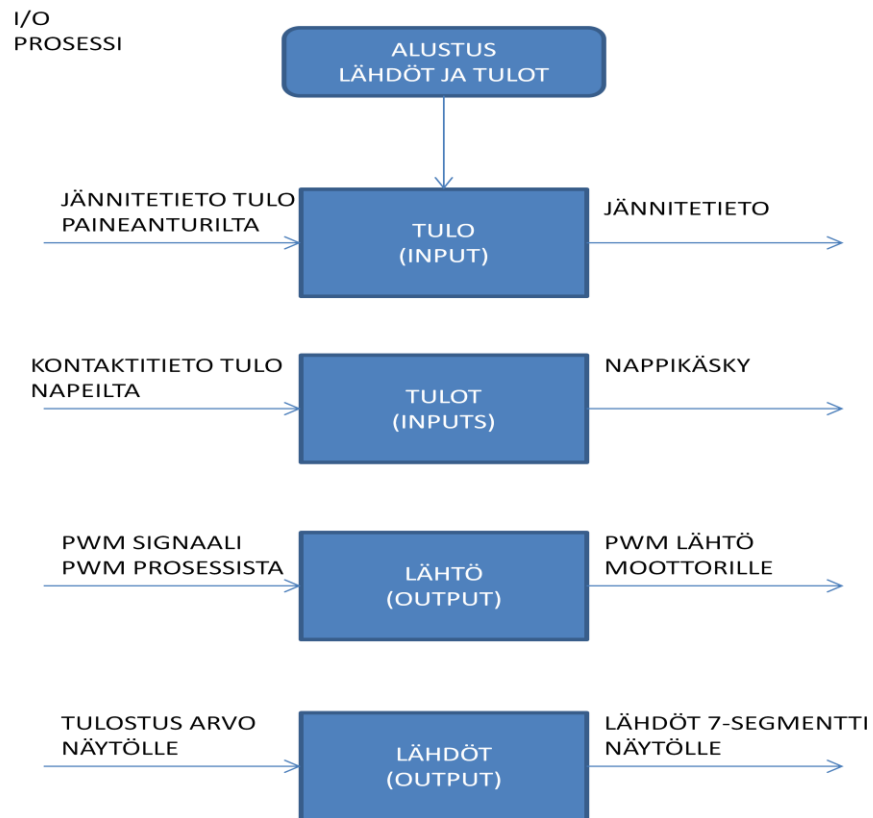
Kuva 38. User prosessin vuokaavio.

PWM prosessin vuokaavio on esitetty kuvassa 39. Prosessin kulku alkaa kuten edelläkin, eli alustuksilla. Alustuksiin kuuluu mm. *PWM*- signaalin luominen. Alustusten jälkeen luetaan painetilatieto *PRESSURE* prosessista. Painetilatielolle tehdään tarkistus, eli tarkistetaan onko arvo kelvollinen eli täyttää tietyt ehdot, jotka arvolle on määritelty. Vaikka vuokaaviosta ei suoraan näy mitä tarkistuksella tarkoitetaan, niin käytännössä se lukee onko vikatilaa pois päältä. Varsinainen vikatilatarkistus tehdään *PRESSURE* prosessissa. Arvon ollessa kelvollinen luetaan asetettu arvo, joka tulee *USER* prosessista. Painetilatieloa sekä asetettua arvoa verrataan toisiinsa. Kuvassa on käytetty painetilatielolle termiä *FB*, joka tulee englannin kielen sanasta *feedback*. Asetetulle arvolle on niin ikään käytetty englanninkielistä termiä eli *SET*. Arvojen vertausten jälkeen ehdon $FB + 1 \leq SET$ ollessa totta *PWM*- signaalitila on päällä eli ON- tilassa. Mikäli edellä oleva ehto ei toteudu, niin vertailusilmukka tarkkailee asetettua sekä takaisinkytkentätietoa. Ehdon toteutuessa *PWM*- signaalitila on päällä ja antaa ON/OFF tiedon *I/O* prosessille moottorin käyttöä varten. Koska *PWM*- signaalilla ohjataan moottoria, on tärkeää tarkkailla mahdollisten vikatilojen syntymistä. Vikatilatieloa tullessa *PRESSURE* prosessista *PWM*- signaalitila menee OFF tilaan, eli moottorille menee sammutustieto. Normaalitilanteessa, jossa ei ole vikatilaa, tehdään jälleen vertaus asetetun arvon sekä takaisinkytkentä arvon välillä. Ehdon $FB \geq SET$ toteutuessa, *PWM*- signaalitila menee OFF- tilaan ja prosessi alkaa niin sanotusti alusta. Mikäli ehto ei toteudu silmukka palaa aiemmin mainittuun kohtaan, jossa tarkistetaan onko vikatilaa aktiivinen.



Kuva 39. PWM prosessin vuokaavio.

Kuvassa 40 on esitetty I/O prosessin vuokaavio, jossa on kuvattu fyysiset lähdöt ja tulot.



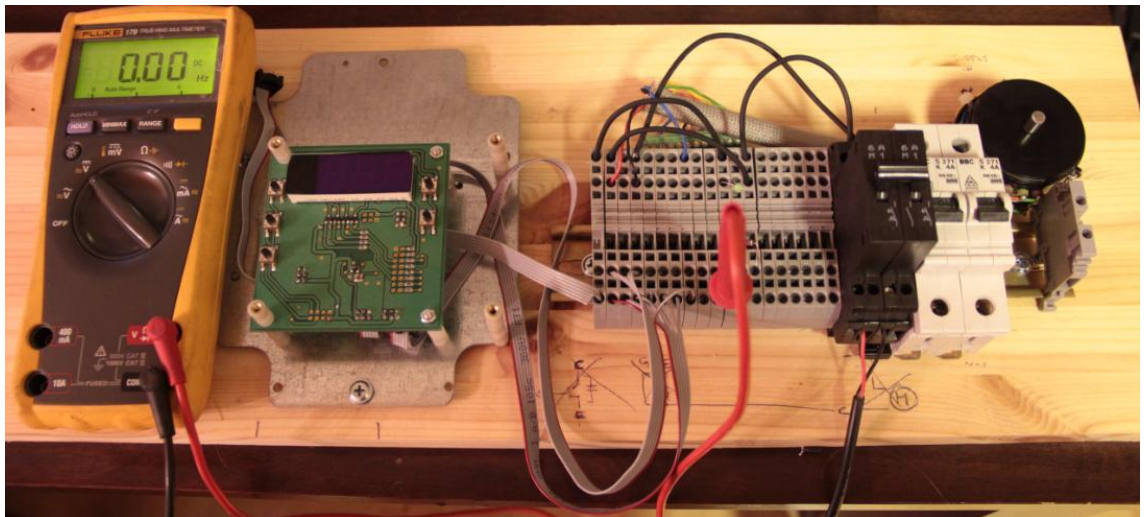
Kuva 40. IO-prosessin vuokaavio.

4. TESTAUS JA TULOKSET

4.1. Testauksen suunnittelu

Laitteen testauksessa keskityttiin kontrolliosan toimintaan eri tilanteissa ja tutkittiin ohjelmiston mahdollisia vikoja ja puutteita. Ohjelmiston toiminnan testaus toteutettiin vaiheittain prosessi kerrallaan. Prosessien testaamisessa käytettiin hyväksi kontrolliosan painonappeja ja näyttöä ja luotiin tuloille ja lähdöille omat funktionsa oikean toiminnan varmistamiseksi prosessin sisällä.

Testauksessa käytettävät laitteistot olivat Atmelin ohjelmointityökalu AVR Dragon, itse suunniteltu ja valmistettu kontrolliosa sekä anturointia simuloimaan oli valittu 5kOhmin potentiometri. Järjestelmän syöttönä toimi 5 voltin tasajännitelähde. Mittalaitteistona toimi Fluken yleismittari, jolla voitiin mitata anturina toimivan potentiometrin jännitettä sekä kontrolliosan PWM- lähdön taajuutta. PWM- signaalin lähtöön oli kytketty vihreä led kuvaamaan oikea-aikaista tilatietoa. Kuvassa 41 nähdään testauslaitteisto.



Kuva 41. Testauslaitteisto.

4.2. Toiminnan testaus

Laitteen ohjelmoinnissa käytetty C-koodi pyrittiin kirjoittamaan ja toteuttamaan, siten että toiminta vastaisi mahdollisimman tarkasti aiemmin esitettyjä prosessien vuokaavioita. Funktioiden suoritus C-koodissa oli kuitenkin haastavaa toteuttaa halutulla tavalla.

4.2.1. Analogiatulon toiminta

Ensimmäinen vaihe toiminnan testaamisessa oli takaisinkytkentäanturia simuloivan potentiometrin analogia sisääntulon kalibrointi. Koska analogiasignaalin tyyppi oli 0-5,00V ja todellinen toiminta-alue oli 0,50-4,50V tuli sisääntulolle kalibroida ala- ja ylärajat. Ala- ja ylärajojen lisäksi järjestelmälle on kalibroitu mittapisteitä tasaisin välein viisi kappaletta.

Kontrolliosassa käytettävä Atmelin AVR644 mikropiiri oli digitaalipiiri, joten analogia sisääntulon tulkitsemisessa on käytetty AD- muunnin (*Analog to Digital*) ominaisuutta. Analogia sisääntulo muutettiin 8 bittiseksi digitaalitiedoksi, jolloin AD- muunnoksen resoluutio oli 256. Koodissa AD- muunnos toteutettiin piirin rekisterejä hyödyntämällä. AVR644 mikropiirin kapasiteetti riittää 10 bitin AD- muunnokseen, mutta tässä sovelluksessa todettiin, että 8 bittinen AD- muunnos oli riittävä. Teoriassa analogia sisääntuloarvoa vastaa lineaarisesti digitaaliarvo. Koodissa AD- muunnos toteutettiin käyttäen AVR644 mikropiirin ADC rekisterejä sekä keskeytysfunktioita. Kuvassa 42 C-koodia AD- muunnoksen toteuttamisesta.

```
int main(void)
{
    DDRA    = 0b01111000; // A to output
    DDRB    = 0b11110000; //buttons to input
    DDRC    = 0xFF; // set C port to output
    PINB    = 0xFF; //buttons "up"

    //PRESSURE PROCESS STARTS

    //Configure the ADC
    ADCSRA |= 1<<ADEN; //turn on the adc feature
    ADMUX  |= 1<<ADLAR; //8 or 10bit results??
    ADMUX  |= 1<<REFS0; //REFERENCE VOLTAGE? datasheet admux refs1 refs0 ->avcc with aref pin
    ADMUX  |= 1<<MUX0; //ADC1 to input
    ADCSRA |= 1<<ADIE; //Enable interrupts functions in ADC
    ADCSRA |= 1<<ADPS2; //Enable prescaler - determined by the internal or external clock ->16

    sei(); //enable the global interrupts

    ADCSRA |= 1<<ADSC; //start the first conversion
```

Kuva 42. AD-muunnoksen C-koodia.

Koska analogiasignaalisissa saattaa olla kohinaa, analogia arvoille kalibroitiin testaamalla niitä vastaava digitaaliarvo. Testaus toteutettiin käyttämällä yleismittaria tulkitsemaan analogia sisääntulon jännitettä. Jännite säädettiin potentiometrillä haluttuun analogia-arvoon. Näytölle asetettiin indikointi, jonka perusteella voitiin päätellä oikean digitaaliarvon löytyminen. Kalibrointi toteutettiin kaikille arvoille, jotka näkyvät taulukossa 5.

Taulukko 5. AD korvaavuustaulukko.

| Analogia sisääntulo [V] | Digitaaliarvo |
|-------------------------|---------------|
| 0,49V | 29 |
| 1,00V | 55 |
| 2,00V | 109 |
| 3,00V | 160 |
| 4,00V | 213 |
| 4,50V | 239 |

Anturilta tuleva signaali tulkittiin taulukon mukaisesti ja arvoa käytettiin sen mukaan järjestelmän toiminnoissa. Alarajaa 0,49V vastasi digitaaliarvo 29 eli arvot alle 29 tulkittiin järjestelmässä vikatilaksi. Samoin yläraja 4,50V, jonka vastaava digitaaliarvo oli 239 eli arvot 240-255 tulkittiin vikatilaksi. Arvot välillä 0,50V-4,50V tulkittiin normaalitiloiksi.

4.2.2. Näytön tulostuksen toiminta

Testauksen toisessa vaiheessa määritettiin näytön tulostus. Seitsemän segmenttinäytön numeronäyttöille määritettiin kirjain ja numerokombinaatiot. Elektroniikka suunniteltiin siten, että yhtä näyttöä ohjattiin kerrallaan ja jokaiselle näytön ledille oli oma digitaalilähtö. Käytössä oli neljä näyttöä ja näytöt olivat päällä vuorotellen. Kun näytöt olivat vuorotellen päällä, piti päälläolotajuus olla niin korkea, ettei ihmissilmä huomaisi vaihtelua.

Näytön tulostukseen kokeiltiin useampaakin vaihtoehtomenetelmää, mutta lopulta valittiin niin sanottu *case*-menetelmän, jossa käytetään kahta *casea* eli tapausta. Tapauksessa jokaista numeronäyttöä vastaa oma muuttuja tai vakio. Toisin sanoen näytölle saatiin näkymään maksimissaan neljä eri muuttujaa. Kuvassa 43 näkyy tapausmenetelmä, jossa ensimmäisessä tapauksessa (case 0) on kolme muuttujaa ja yksi vakio sekä toisessa tapauksessa (case 1) on neljä vakiota.


```

switch(pressure)
{
    case 0:
        tulosta(info,set_value,15,raw_out);
        break;

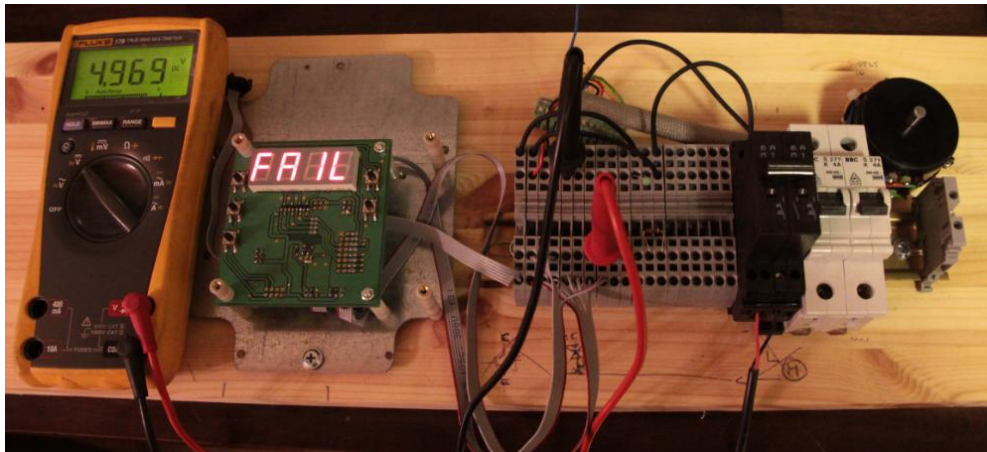
    case 1:
        tulosta(10,14,1,13);
        break;
}

```

Kuva 43. Näytön tulostus tapaukset eli case.

Otetaan tarkasteluun ensin toinen tapaus eli case 1, jossa *tulosta* funktion arvot ovat 10, 14, 1 ja 13. Funktion arvot vastaavat näytölle tulostettavaa tekstiä. Tässä tapauksessa on määritetty, että numeroja vastaa tietty kirjain tai numero. Numeroa 10 vastaa kirjain *F*, numeroa 14 vastaa *A* ja numeroa 13 vastaa *L*. Numeroa vastaa aina sama numero. *Case 1*:n tulostus näytölle on siis *FAIL*.

Seuraavassa vaiheessa määriteltiin digitaaliarvoa vastaavan tulostus näytölle. Ylä- ja alaraja ovat vikatiloja, joten näytölle tulostetaan *case 1* eli *FAIL* teksti. Kuvassa 44 on esitetty anturilta tuleva analogiatulojännite, joka on 4,969V sekä näytöllä indikoiva teksti vikatilanteesta.



Kuva 44. Näytössä teksti *FAIL*: Yläraja 4,50V on ylitetty.

Anturin ollessa normaalien rajojen sisäpuolella eli 0,50-4,50V näytölle tulostetaan ensimmäisen tapauksen eli *case 0*:n vakio *15* sekä muuttuja *raw_out*. Vakio *15* on u-kirjain ja muuttuja *raw-out* on välillä 1-5. *u1-u5* kuvaavat takaisinkytkennän eri jännitetasoja eli käytännössä eri painetiloija. Painetilat riippuvat käytettävästä

paineanturista, jolla on jännitettä vastaava painetieto. Taulukossa 6 on esitetty jännitettä vastaava näytön tulostus sekä kuvassa 45 on esitetty esimerkki näytön toiminnasta.

Taulukko 6. AD-muunnosta vastaava näytön tulostus.

| Analogia sisääntulo [V] | Näyttö |
|-------------------------|--------|
| <0,49V | FAIL |
| 0,49V | XXu1 |
| 1,00V | Xxu2 |
| 2,00V | XXu3 |
| 3,00V | XXu4 |
| 4,00V | XXu5 |
| >4,50V | FAIL |



Kuva 45. Näytön toiminta: u2:sta vastaa sisääntulon jännitealue 1,00-2,00V.

4.2.3. Painonappien toiminta

Neljännessä vaiheessa määriteltiin asetusarvot eli asetettavat toiminta-alueet. Toiminta-alue on ensimmäisen tapauksen eli *case 0:n* muuttuja *set_value*. Asetusarvo valitaan painonapeilta ja niitä on yhteensä viisi. Näytölle asetusarvot tulostetaan kolmannelle numeronäytölle oikealta katsottuna. Asetusarvon valintanappeina toimivat painonapit 1 ja 2 kontrolliosan vasemmalla puolella. Napista 1 voidaan kasvattaa asetusarvoa ja napista kaksi vähentää asetusarvoa. Kuvassa 46 on esitetty painonapit sekä asetusarvo



Kuva 46. Asetusarvonapit sekä asetusarvo 3.

Painonappien toiminta perustui järjestelmässä digitaalitulojen tilojen muutokseen. Nappia painettaessa digitaalitulo aktivoituu nolllaksi ja järjestelmä tulkitsee napin painalluksen. C-koodissa nappien painalluksella kasvatetaan tai vähennetään muuttujan arvoa. Funktio toteutettiin IF- ehtolauseella, mikä näkyy kuvassa 47.

```

if (PINB==button1)
{
    state=1;          //SET view to display
    set_value++;
    _delay_ms(1000);
    if(set_value>6)
    set_value=6;     // Maximum SET value
}
if (PINB==button2)
{
    state=1;          //SET view to display
    set_value--;
    _delay_ms(1000);
    if(set_value<0)
    set_value=0;     // Minimum SET value
}

```

Kuva 47. Painonappien toiminnan C-koodia.

Kuvan koodista voidaan nähdä, että *set_value* asetusarvot ovat välillä 0-6 ja näin ollen näytölle tulostettavat numerot ovat 0-6.

4.2.4. PWM lähdön toiminta

PWM lähdön toiminnassa käytettiin AD- muunnoksen tapaan hyväksi AVR644 mikroprosessorin rekisterejä. Mikroprosessorilla oli valmiina ominaisuutena erilaisia PWM lähtöjä. Valitsin mikroprosessorin olemassa olevista vaihtoehdoista vaihe- ja taajuuskorjatun PWM signaalin. Signaalin lähtö- porttiin on kytketty simuloimistarkoituksessa vihreä led etuvastuksella.

PWM uloslähdölle luotiin C-koodiin omat alifunktiot, jolla lähtö oli joko päällä tai pois päältä. Alifunktiot on nimetty *motor_pwm* ja *motor_pwm_off*. Nimeäminen perustuu

PWM:n tarkoituksena ohjata tehokortilla olevaa IGBT transistoria, mikä puolestaan ohjaa moottoria. Kuvassa 48 nähdään PWM alifunktiot, jossa käytetään mikroprosessorin TCCR (Timer Counter Control Register) rekisterejä sekä OCR (Output Compare Register) rekisteriä.

```

while(1)
{
    void motor_pwm()
    {
        DDRD=0b00100000;           //D port to output
        TCCR1A=0b01000001;        //phase and fr correct pwm
        TCCR1B=0b00010010;        //last three set prescaler to 8
                                   //and fourth digit means ph and fr correct pwm (WGM13=1)
        OCR1A=20;                  //TOP arvo (20), jolla saadaan 12,5kHz kaavaan f_osc/(2 x N x TOP),
                                   //missä N=8 (prescaler) TOP=20 f_osc=4MHz
    }
    void motor_pwm_off()
    {
        DDRD=0x00;
        //PIND=0x00;
    }
}

```

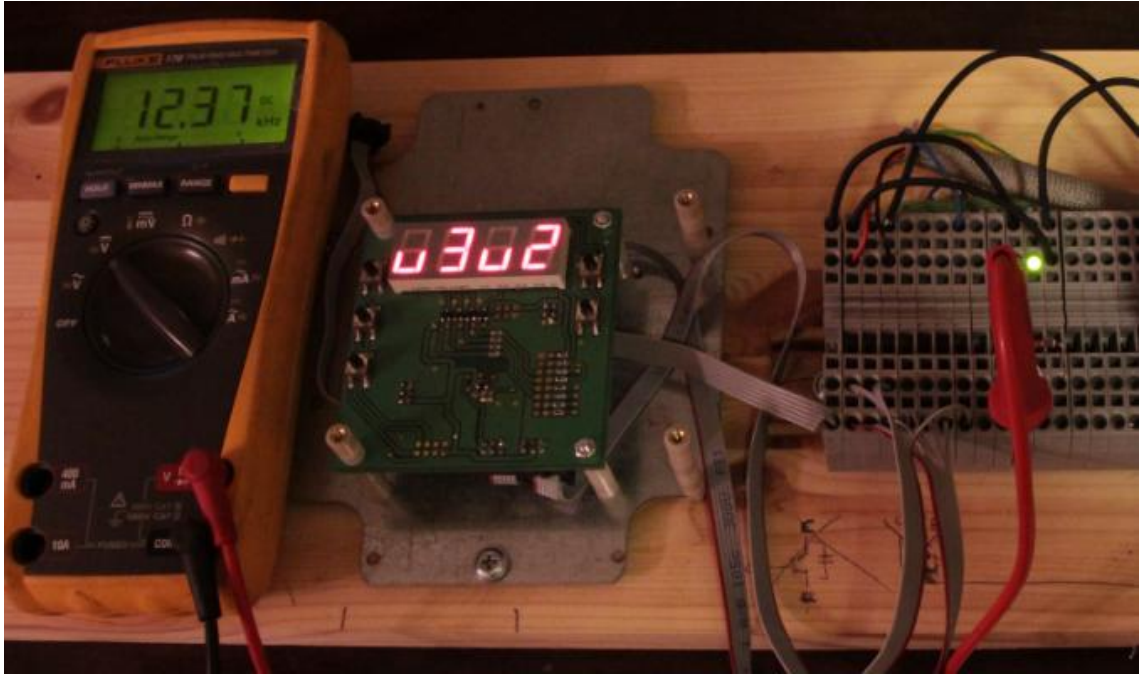
Kuva 48. PWM alifunktiot.

Rekisterien arvoilla voidaan määrittellä PWM lähdön taajuus seuraavan kaavan mukaisesti:

$$F = \frac{F_{clk_{I/O}}}{2 \times N \times TOP} \quad (11)$$

missä $F_{clk_{I/O}}$ on mikroprosessorin kellotaajuus, N on esijakaja sekä TOP arvo on OCR rekisterin arvo. Mikroprosessorin kellotaajuus on 4MHz ja kuvan 48 koodista nähdään, että N arvoksi on valittu 8, koska TCCR1B rekisterin kolme viimeistä bittiä (010) määräävät esijakajan arvon. TOP arvo on OCR1A rekisterin arvo eli 20. Kaavasta laskemalla saadaan teoreettinen taajuusarvo PWM lähdölle. (Atmel Corporation 2012. 118-119)

Kuvan 49 testissä havainnollistettiin PWM lähdön toimintaa ja todetaan, että taajuus oli lähellä laskennallista arvoa 12,5kHz.



Kuva 49. PWM lähdön taajuus 12,37kHz sekä kuvan oikeassa reunassa vihreä led kuvaamassa lähtöä.

4.2.5. Yhdistetty automatisoitu toiminta

Yhdistetyssä automatisoidussa toiminnassa sovitettiin edellä mainitut toiminnot yhteen ja testattiin kontrolliosan toimivuus normaalitilassa ja vikatilanteissa. Normaalitilan toiminta alkoi siitä, kun laitteeseen kytkettiin virta. Laite tekee alustukset ja lukee takaisinkytkennän eli analogiatulon tilan sekä asettaa asetusarvot nolliksi.

Järjestelmä vertailee asetusarvoa ja takaisinkytkentäarvoa sekä ohjaa PWM lähtöä mikäli asetusarvon ja takaisinkytkentäarvon ero on noin 4% maksimiarvosta eli 255. Takaisinkytkentäarvon saavuttaessa asetusarvon PWM lähtö sammuu. Kuvasta 50 nähdään vertailun toteutus IF-ehtolauseella. Koodissa esiintyvät raakamuuttujat: *set_value_raw* ja *raw_in* ovat raaka-arvoja 0-255:n välillä. Raaka-arvoja vastaa näytöllä käyttäjäystävällisemmät asetus ja takaisinkytkentäarvot, jotka on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Asetus- sekä takaisinkytkentäarvot.

| | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------------|---|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Käyttäjän asetusarvo | set_value | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Asetusarvoa vastaava digitaaliarvo | set_value_raw | 0 | 28 | 54 | 108 | 159 | 212 | 238 |

| | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|-----|-----|------|------|------|------|------|
| Analogiatulon takaisinkytkentäarvo | raw_in | <29 | <55 | <109 | <160 | <213 | <239 | <255 |
| Takaisinkytkentää vastaava arvo | raw_out | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

Skaalauksen ansiosta voidaan suoraan verrata asetuservoa ja takaisinkytkentäarvoa *raw_in*, joka on jo aikaisemmin mainittu 8- bittinen analogia digitaalimuunnos eli arvo on välillä 0-255.

```

if(set_value_raw<=raw_in) // User Set value <= Feedback value -> PWM output OFF
run=0;

if(set_value_raw>raw_in+10) // User Set value > Feedback value + 4% -> PWM output ON
run=1;
PIND=1<<7; // PWM output port is UP.

if(run==0)
motor_pwm_off();

if(run==1&&failure==0)
motor_pwm(); // PWM output ON
else
motor_pwm_off(); // PWM output OFF

if(failure==0) // No failure: case 0 in display
paine(0);
else
{
paine(1); // Failure ON: FAIL in display
run=0; // Failure ON: PWM output OFF
set_value=0; // Failure ON: User set value to zero.
}

```

Kuva 50. Asetuservon ja takaisinkytkennän vertailu sekä PWM lähdön ohjaus.

Kuvasta 49 nähdään, että kontrolliosan näytön ensimmäinen numeronäyttö oli moodissa *u*. *u*-moodi kuvaa käyttäjälle, että PWM lähtö oli päällä. Kuvasta 46 nähdään, että ensimmäinen numeronäyttö on *A*- moodissa. *A*-moodi tarkoitti vastaavasti, että PWM-lähtö ei ole päällä. Tällä funktiolla käyttäjä helposti näkee, onko PWM- lähtö päällä vai ei.

Verrataan kuvien 46 ja 49 tilannetta: Kuvassa 46 PWM lähtö ei ole päällä, mutta kuvassa 49 PWM lähtö on päällä. Asetuservo sekä takaisinkytkentäarvo ovat molemmissa samat eli asetuservo on 3 sekä takaisinkytkentäarvo on 2. Kuvan 43 asetuservon ja takaisinkytkentäarvon ero on alle 4% eli digitaaliarvojen ero on alle 10. Asetuservo on molemmissa 3, jota vastaa digitaaliarvo 108 ja takaisinkytkentäarvoa 2 vastaa arvo 55-108 välillä. Kuvan 43 tapauksessa arvo on yli 98, mutta kuvan 46 tapauksessa arvo on alle 98.

Vikatilanteista simuloitiin takaisinkytkennän rajojen ylitys sekä sen kokonaan puuttuminen. Mikäli takaisinkytkennän arvo on alle 0,5 voltia eli digitaaliarvo *raw_in*

on alle 29, syntyy vikatilanne. Samoin takaisinkytkentäarvon ylitys eli *raw_in* on 239 tai yli eli yli 4,5 voltia syntyy vikatilanne. Takaisinkytkennän kokonaan puuttuminen on käytännössä sama asia, kuin takaisinkytkennän arvo olisi 0V eli digitaaliarvo on alle 29.

Vikatilanteen sattuessa muuttuja *failure* aktivoituu ja asettaa PWM lähdön pois päältä sekä asettaa asetusarvon nolllaksi. Kuvan 50 C-koodista nähdään toiminta vikatilanteen sattuessa.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn lopputuloksena saatiin toteutettua toimiva ohjausjärjestelmä maalausjärjestelmälle. Teoriassa ja simuloimalla saatujen testihavaintojen perusteella voitiin todeta, että asianmukaisella paineanturoinnilla ja moottoria ohjaavalla tehoelektronikalla yhdistettynä suunniteltuun ohjausjärjestelmään, saadaan toimiva kokonaisuus. Uusi ohjausjärjestelmä mahdollistaa myös muun anturoinnin ja datan keräämisen: esimerkiksi lämpötila- tai virtausmittauksen yhdistäminen järjestelmään saadaan suhteellisen helposti muuttamalla ohjelmaa sekä analogiatuloja lisäämällä.

Vaikka tuloksena saatiin toimiva elektroniikka, niin laitteistoin prototyypissä on parantamisen varaa. Prototyypin lattakaapeliliitännät syötölle sekä ulkoisille lähdöille ja tuloille eivät ole toimiva ratkaisu varsinaisessa toteutuksessa, vaan liitännät tulisi olla toteutettu ruuviliitosriviliittimillä tai muulla vastaavalla vankemmalla liitántätavalla. Lattakaapeliliitännän heikko kiinnipysyvyys ei toimisi käytännössä.

Prototyypissä näyttö oli integroituna samaan piirilevyyn logiikan sisältävän mikroprosessorin kanssa. Näin saatiin säästettyä tilaa, mutta yksi vaihtoehto olisi, että näyttö olisi oma moduuli järjestelmässä.

Tehoelektronikan suunnittelun sekä valmiin järjestelmän testauksen toteuttaminen tässä työssä ei ollut aiheellista kahdesta syystä: tehoelektronikan komponenttien hinta olisi noussut kohtuuttoman korkeaksi sekä sähkötyöturvallisuuden takaaminen testiolosuhteissa ei olisi ollut taattu.

LÄHTEET

Atmel Corporation. 2012. 8-bit Microcontroller with 64K Bytes In-System programmable memory Flash ATmega644/V Datasheet.

Aumala, O. 2001. Mittaustekniikan perusteet. Suomi. Otatieto

Bai Y. 2005. The Windows Serial Port Programming Handbook. USA. Press LLC

Bakshi, U.A. & Godse A.P. 2009. Analog and Digital Electronics. Technical Publications Pune.

Croft T, Summers W, Hartwell F. 2008. American electricians handbook 15th edition.

Fraden J. 2010. Handbook of Modern Sensors. USA. Springer

Ganssle J&Barr M. 2003. Embedded Systems Dictionary

Granlund K. 2007. Tietoliikenne.Suomi. WSOY

Hakala M&Vainio M. 2005. Tietoverkon rakentaminen.Suomi. WSOY

Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. Suomi. AMK kustannus Oy

Hietalahti, L.2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. Suomi. Tammertekniikka

Hughes, A & Drury, B. 2013. Electric Motor and Drives 4th edition Fundamentals, Types and applications. USA. Elsevier Ltd

IRF. 2005. IR2110 Datasheet [WWW] Saatavissa: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2110.pdf>

IXYS. 2004. Datasheet: IXDR 30N120D1 High Voltage IGBT with optional Diode [WWW] Saatavissa: <http://ixdev.ixys.com/DataSheet/L404.pdf>

Khanna V. 2003. The Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Theory and Design. IEEE Press

Koskinen, J. 2004. Mikrotietokonetekniikka: Sulautetut järjestelmät. Suomi. Otava

Kuivalainen P. 1993. Mikroanturit. Suomi. Otatieto

Liu C. 2012. Foundations of MEMS. Pearson.

MSP 2012, Datasheet [WWW] Saatavissa: <http://www.meas-spec.com/assets/0/78/128/444/04490b2f-adab-4636-b085-a8d4ec14d9e2.pdf>

Nicolai J & Castagnet T. 1994. Controlling a Brush DC Motor with an ST6265 Microcontroller. USA. SGS-Thomson Microelectronics [WWW] Saatavissa: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXxuvv.pdf>

Niiranen, J. 2000. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Suomi. Otatieto

Niiranen, J. 2007. Tehoelektroniikan komponentit. Suomi. Otatieto

Oh, K.S. 2001. IGBT Basics 1. Fairchild Semiconductor Application Note 9016

Texas Instruments , 2011. Linear and Switching Voltage Regulator Fundamental Part 1 [WWW] saatavissa: <http://www.ti.com/lit/an/snva558/snva558.pdf>

Um, K.J. 2002. IGBT Basics 2. Fairchild Semiconductor Application Note 9020

Young & Freedman. 2004. University Physics 11th edition with modern physics. Benjamin-Cummings Pub Co.

LIITTEET

- 1 Atmel Atmega644 pinnijärjestys
- 2 Piirikaavio
- 3 Layout kaavio