

VIRTARAJOJEN MITTAUS- LAITTEISTO

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietokone-elektroniikka
Opinnäytetyö
Syksy 2017
Topi Lampiranta

Lahden ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma

LAMPIRANTA, TOPI:

Virtarajojen mittauslaitteisto

Tietokone-elektroniikan opinnäytetyö, 33 sivua

Syksy 2017

TIIVISTELMÄ

Työn tarkoituksena oli suunnitella, valmistaa ja ohjelmoida Fimet Oy:lle laitteisto, joka mittaa F1-hammashoitoyksikössä X2L-pääkortin ohjaamia moottorien virtarajoja. Valmiin mittauslaitteiston alkuperäisenä toimintamallina oli tarkastella neljää AD-kanavaa, jotka kattoivat kaksi moottoria ja molemmissa kaksi suuntaa. Laite tunnistaisi automaattisesti käytetyn kanavan ja ottaisi kyseisestä kanavasta tarvittavat tiedot talteen.

Läpi kulkeva virta laskettaisiin mittaamalla shuntin yli oleva vahvistettu jännite. Mittauksia tulisi voida seurata OLED-näytöltä numeroarvoina sekä kuvaajasta, joka näyttää arvot ennen ja jälkeen virtarajaan osumisen. Eensisijaisen tärkeänä mittauksista haluttiin tietää maksimivirran vaihtelu, eikä tarkkaa ampeeriarvoa.

Mittauksia tulitaisiin tekemään vähintään 50 piirikortille. Tehtävänannon taustalla oli tuotannosta tullut palaute, jonka mukaan pääkortit liikuttavat hammashoitoyksikön nosto- ja kallistusmoottoreita vaihtelevilla nopeuksilla ja voimilla.

Lopputuloksena on laite, joka lukee koko pääkortin käyttämää virtaa yhdestä AD-kanavasta. Laite ohjeistaa käyttäjää valitsemaan oikean moottorin ja suunnan tiettyyn mittaukseen. Käyttäjä voi halutessaan tehdä mittauksia useita kertoja ennen tulosten tallentamista.

Asiasanat: operaatiovahvistin, AD-muunnos, elektroniikkasuunnittelu, ohjelmistosuunnittelu

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Information Technology

LAMPIRANTA TOPI: Measurement system for current
limits

Bachelor's Thesis in Computer Electronics, 33 pages

Autumn 2017

ABSTRACT

The assignment for this thesis was to design, make and program a system for Fimet Oy that measures the current limits of a motor, which are controlled by the X2L-mainboard of the F1 dental chair. The original idea for the measurement system was to measure four different channels of ADC. The measurement would automatically identify the motor and the direction that was driven and save the wanted information in the memory.

The current would be measured with the use of a shunt resistor. The voltage over the shunt would be amplified and then measured. The measurement result could be read from an OLED display as a numeric value. The user could also see a graph of the current before and after the max current.

Measurements would be made to at least 50 mainboards, because of the feedback that was received from the production. According to the feedback, mainboards used a different speed and power to drive a lift motor and a backrest motor. The most important information from the measurement was difference of the max current between mainboards, not the absolute current value.

As a result of the thesis, a system that reads the current of the whole mainboard from one channel of ADC was created. The system guides the user to drive a correct motor in a correct direction. The user can make multiple measurements before saving the results.

Key words: operational amplifier, AD conversion, electronic design, software design

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	VAATIMUSMÄÄRITTELY	3
3	MITTAUSLAITTEISTON TOIMINTAPERIAATE	5
4	ELEKTRONIIKKASUUNNITTELU	7
4.1	Jännitelähde	8
4.2	Mikrokontrolleri	9
4.3	Shuntti	10
4.4	Operaatiovahvistin	11
4.4.1	Operaatiovahvistimen ominaisuudet	13
4.4.2	Operaatiovahvistinkytkeä	13
4.5	PWM-signaalin suodatus	16
4.6	OLED-näyttö	17
5	OHJELMISTOSUUNNITTELU	18
5.1	Käyttöliittymä	18
5.2	Keskeytykset	19
5.3	Tilakoneet	20
5.4	AD-muunnin	20
5.5	OLED-näyttöön kirjoittaminen	25
5.6	Tulosten tallentaminen EEPROM:iin	26
5.7	Tulosten lähetys	28
6	YHTEENVETO	30
	LÄHTEET	32

LYHENNELUETTELO

ADC	Analog to Digital Conversion
BOD	Brown-Out Detection
CPU	Central Processing Unit
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
ISR	Interrupt Service Routine
I/O	Input/Output
JTAG	Joint Test Action Group
LCD	Liquid Crystal Display
OLED	Organic Light-Emitting Diode
PWM	Pulse Width Modulation
RISC	Reduced Instruction Set Computer
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random-Access Memory
TC	Timer Counter
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USART	Universal Synchronous and Asynchronous Receiver-Transmitter

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa mittauslaitteisto, joka mittaa F1-hammashoitoyksikön nosto- ja selkänojamoottorien virtarajoja. Työn toimeksiantaja, Fimet Oy, on vuodesta 1981 lähtien toiminut suomalainen yritys, joka suunnittelee ja valmistaa korkealaatuisia hammashoitoyksiköitä asiakkaiden tarpeiden ja toiveiden mukaisesti. Konsernilla on liiketoimintayksiköt Suomessa ja Kiinassa sekä jälleenmyyjiä yli 50 maassa. Konsernin liikevaihto on noin 12 M€ ja henkilökuntaa Suomessa noin 40. Suomen liiketoimintayksikkö toimii Askolassa. (Fimet Oy 2017.)

Fimet Oy valmistaa kahta erilaista hammashoitoyksikköä, jotka ovat nimeltään F1 ja NEO. Ensimmäinen F1-hammashoitoyksikkö tuli markkinoille 1991 ja NEO-hammashoitoyksikkö 2011. F1-hammashoitoyksikkö on kuvassa 1. Saksa on Fimetille tärkein markkina-alue ja puolet laitemyynnistä menee maahan. (Kauppalehti 2011.) Yksiköitä voidaan käyttää esimerkiksi hammaslääkärinvastaanotolla ja hammaskirurgiassa. Opinnäytetyön tavoitteena on lisätä Fimet Oy:n kilpailukykyä lisäämällä tietoa tuotteen luotettavuudesta, jotta voidaan arvioida tarpeet tuoteparannuksiin.

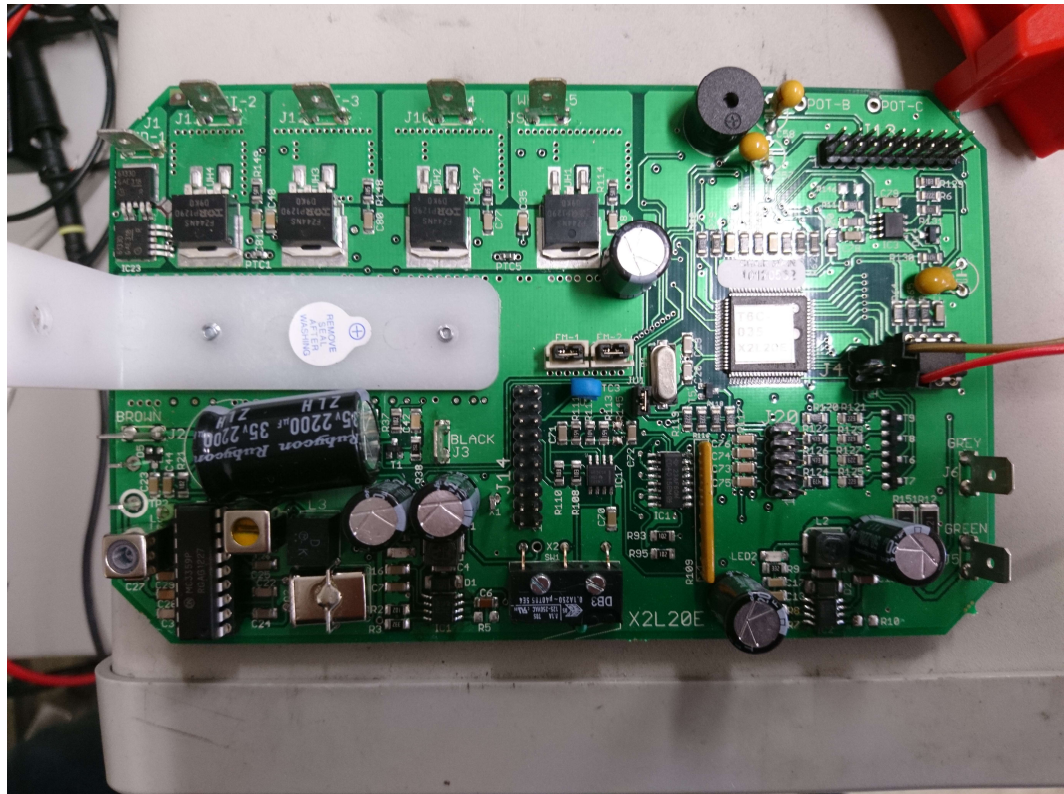


KUVA 1. F1-hammashoitoyksikkö (Fimet Oy 2017).

Fimetin hammashoitoyksiköt täyttävät viimeisimmät RoHS-direktiivit vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa (Empire Dental Devices 2016). Yksiköt myös täyttävät seuraavat direktiivit ja standardit: IEC 60601-1:2005, ISO 14971:2007, ISO 6875:1995, ISO 7494-1:2004, ISO 7494-2:2003, EN 980:2008 ja ISO 11144:1995. Lisäksi VTT on sertifioinut yrityksen laadunhallintajärjestelmän seuraavien standardien mukaan: ISO 9001:2008 ja ISO 13485:2003

2 VAATIMUSMÄÄRITTELY

Virtarajojen mittauslaitteisto suunniteltiin Fimet Oy:n F1-hammashoitoyksikön pääkortille, joka on kuvassa 2. Ensisijaisesti laitteiston haluttiin mittaavan hammashoitoyksikön pääkortin virtarajojen vaihtelua eri sarjoissa. Toissijaisena tietona olisi virran absoluuttinen arvo.



KUVA 2. F1-hammashoitoyksikön pääkortti

Mittauslaitteistoa tullaan käyttämään Fimet Oy:n elektroniikkaosaston testauspisteellä. Mittaus suoritetaan yhdessä muun F1-hammashoitoyksikön pääkortin testauksen kanssa. Testauksen aikana pääkorttiin on kytketty mittauslaitteiston lisäksi käyttöjännitte, moottorien testiohjaukseen tehty ohjain ja kaksi moottoria. Jännitelähteenä voidaan käyttää samaa testattavan pääkortin jännitelähdettä tai toista erillään olevaan jännitelähdettä.

Ensisijainen vaatimus käytettäville komponenteille oli saatavuus Fimet Oy:n elektroniikkaosaston hyllyistä. Mikäli tarve vaatisi, uusia komponentteja voitaisiin myös tilata. Työssä käytettiin ensisijaisesti

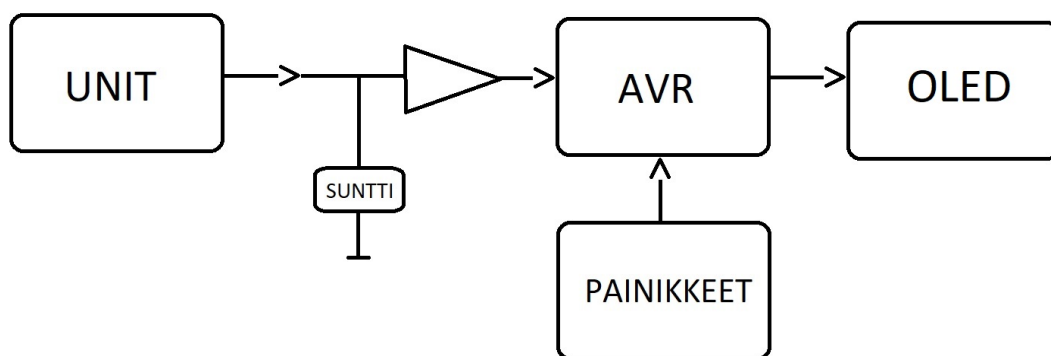
läpiladottavia komponentteja, mutta pintaliitoskomponenttien käyttämisenkään ei oletettu aiheuttavan ongemia. Olemassa olevan rajallisen varaston hyödyntäminen oli viisasta ajankäytön, taloudellisuuden ja oppimisprosessin kannalta. Uusien tilausten toimittamisessa voisi mennä mahdollisesti viikkoja. Tämän ajan puitteissa työ voisi olla jo valmis, mikäli kaikki tarvittavat osat olisivat heti saatavilla.

Elektroniikan komponenttien hinta määräytyy usein ostettavaan määrään pykälittäin. Mitä suurempi määrä samaa komponenttia ostetaan, sitä pienempi yksittäisen komponentin hinta. Tälle hintapolitiikalle voi olla syynä laskeva rajahyöty, kilpailevan yrityksen tarjouksiin vastaaminen, asiakkaiden sitouttaminen yhteen myyjään tai ostajan rohkaiseminen tekemään suurempi tilaus useiden pienempien tilausten tilalta. (Mohammed 2013.) Mittauslaitteistoja on tarkoitus valmistaa vain yksi kappale, joten komponenttien hinta tulisi tilattaessa olemaan kallis suhteessa varastosta löytyvillä komponenteilla valmistettuun.

Oppimisen kannalta ennalta määritetyn rajallisen varaston käyttäminen suunnittelussa saattaa johdattaa suunnittelijaa soveltamaan aiemmin oppimaansa. Elektroniikkasuunnittelussa on harvoin vain yksi mahdollinen ratkaisu.

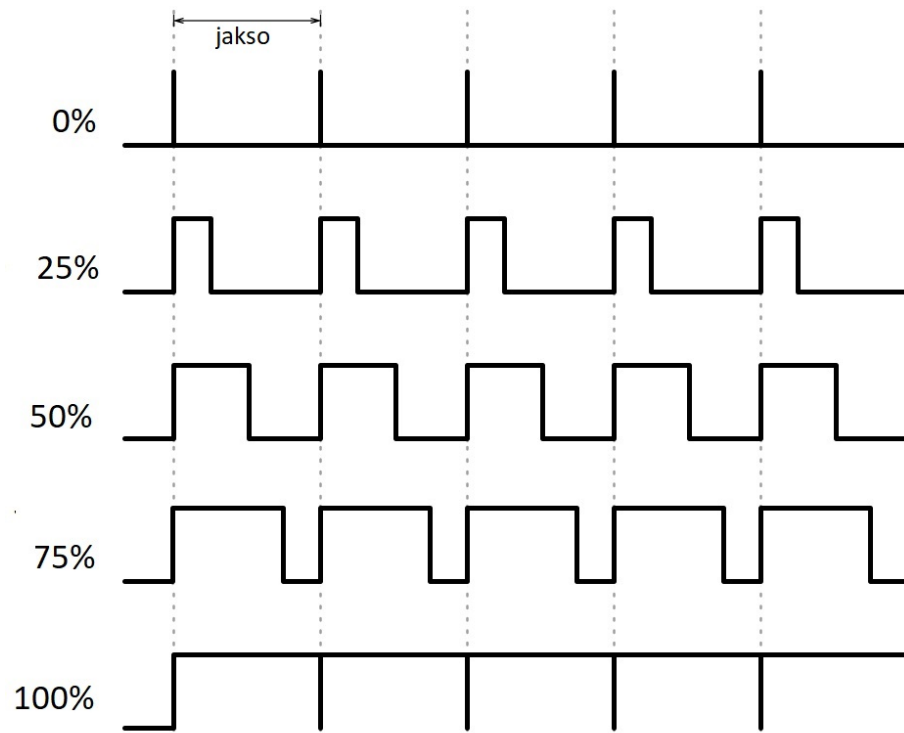
3 MITTAUSLAITTEISTON TOIMINTAPERIAATE

Mittauslaitteiston toteuttamiseen oli kaksi vaihtoehtoa, joista lopulta päädyttiin tapaan, joka esitetään kuviossa 1. Mitattavan piirikortin ja maan väliin asennetaan shuntti. Piirikortin ja shuntin välissä olevasta potentiaalista vahvistetaan signaalia sopivaksi AD-muuntimelle. Painikkeilla vaikutetaan AVR-mikrokontrolleriin, joka tietyssä tilassa mittaa vahvistettua signaalia. Mikrokontrolleri ohjaa OLED-näyttöä, josta käyttäjä näkee mittaustuloksia ja saa ohjeita esimerkiksi siitä, mitä painikkeista tapahtuu.



KUVIO 1. Laitteiston lohkokaavio

Työssä mitattava virta on peräisin lähinnä PWM-ohjatuista moottoreista. Pulssinleveysmodulaatio, eli PWM, on tapa tuottaa analogista jännitesignaalia käyttäen digitaalista signaalia. Sitä voidaan käyttää DA-muuntimen sijasta. Yleensä pulssinleveysmodulaatiossa taajuus pysyy vakiona ja jännitettä säädetään pulssisuhteella, joka on paremmin tunnettu englannin kielisellä nimellä duty cycle. (Koskinen 2006, 107.) Pulssisuhte esitetään normaalisti prosenteissa. Esimerkkejä pulssisuhteiden toiminnasta on kuviossa 2. Ylimmässä esimerkissä pulssisuhte on 0 %, joten signaali on koko ajan alatilassa. Seuraavassa vaihtoehdossa pulssisuhte on 25 %, tämä tarkoittaa signaalin olevan ylätilassa $\frac{1}{4}$:n ajasta. Kun pulssisuhteen on 100 %, on signaali koko ajan ylätilassa.

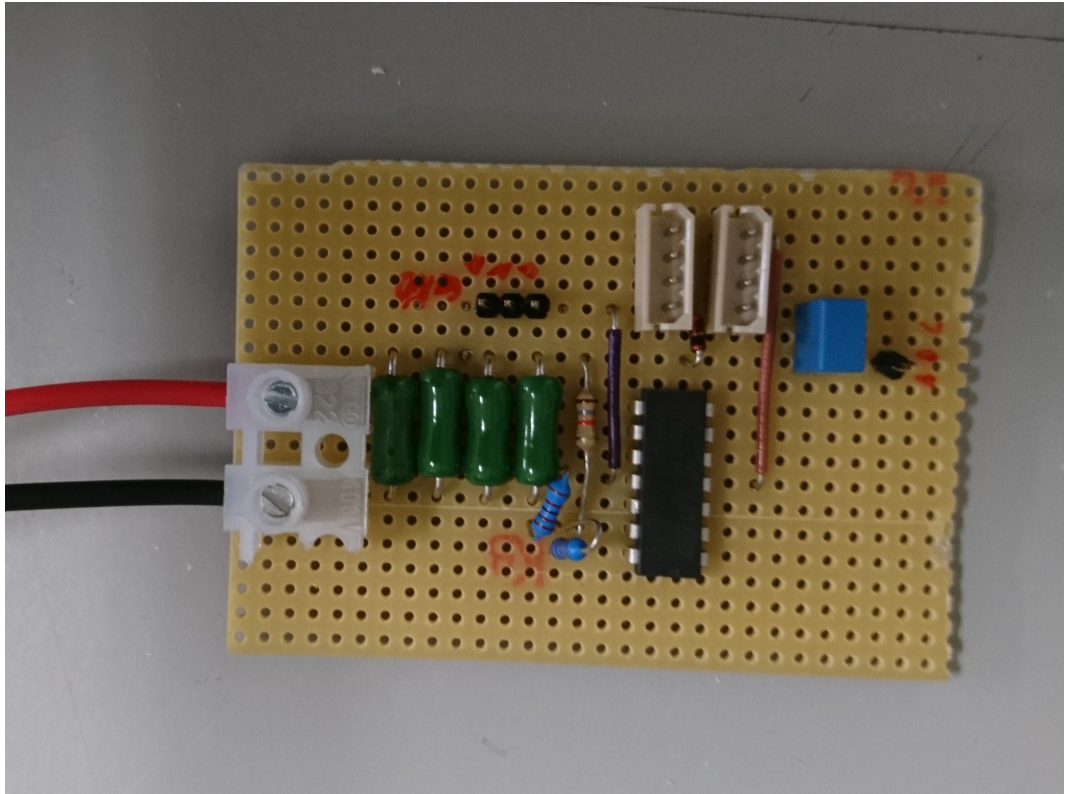


KUVIO 2. Pulssisuhteita

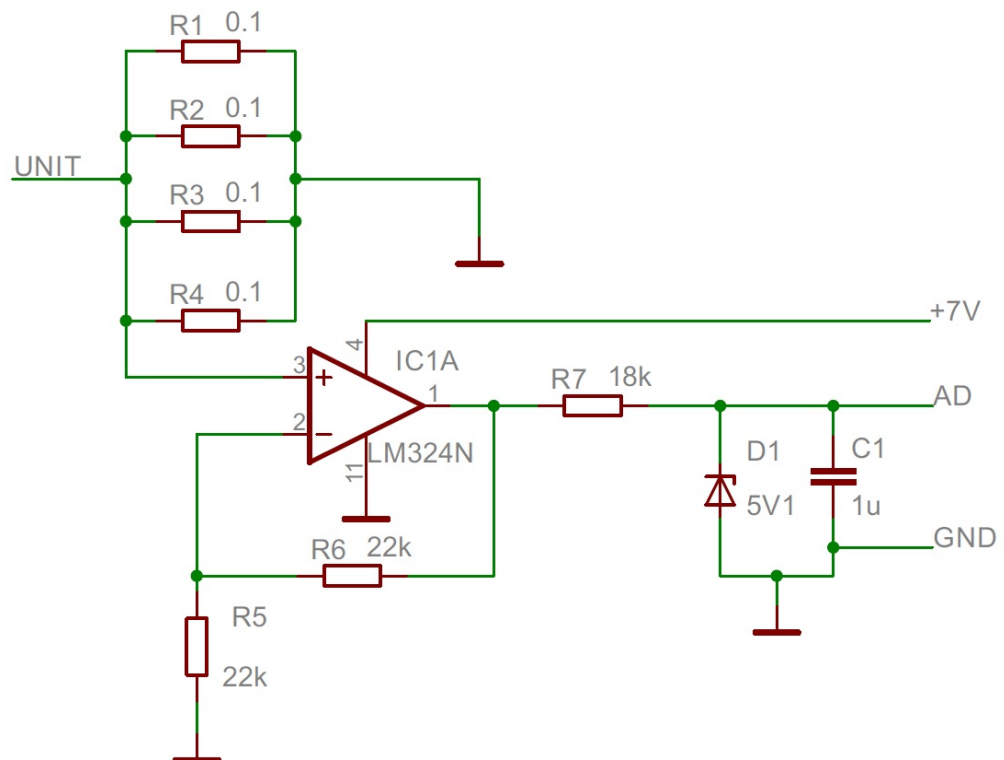
4 ELEKTRONIIKKASUUNNITTELU

Tarvittavan rakennettavan elektronikan osalta päädyttiin siihen, että komponenttien määrän ja koon johdosta kytkentä tehtäisiin reikäpiirilevyille. Piirilevyn koon vaatimukset olivat, että se ei vie huomattavaa määrää tilaa testipisteeltä. Piirikaavio suunniteltiin Eagle 6.4.0 Professional Edition -ohjelmistolla. Valmis piirikortti on kuvassa 3 ja piirikaavio kuviossa 3.

Muun elektronikan osalta päädyttiin käyttämään NEO-hammashoitoyksikössä olevaa tuolin käyttöliittymäkorttia, johon kirjoitettiin uusi ohjelmakoodi. Kortissa oli valmiina saatavilla halutut jännitteet ja mikrokontrolleri Atmega324PA. Lisäksi kortissa oli OLED-näytölle liitin.



KUVA 3. Vahvistinpiirikortti



KUVIO 3. Vahvistinkytkenän piirikaavio

4.1 Jännitelähde

Jännitelähteenä käytettiin samaa kuin testattavassa pääkortissa. Jännitelähteen ja testilaitteiston väliin asennettiin NEO-hammashoitoyksikössä käytetty CNA-piirikortti, joka reguloi sisääntulevan 24 V:n jännitteen 7 V:n jännitteeksi. Piirikortissa on useita ulostuloja niin 7 V:n, kuin 24 V:n jännitteelle. Työn alkuvaiheessa oli jo selvää, että kyseistä piirikorttia aiotaan käyttää jännitteen syöttöön missä tahansa harkitussa lopputuloksessa.

Mikrokontrollerin sallittu käyttöjännite on välillä 1,8 V...5,5 V, mutta mahdollisten kellotaajuuksien ollessa verrannollisia käyttöjännitteeseen, haluttiin käyttöjännitteeksi 5 V. Saman suuruisen käyttöjännitteen käytöstä oli myös kokemuksia aiemmista töistä. Käyttöjännitteen ollessa yli 4,5 V, kellotaajuus voi olla jopa 20 MHz. (Atmel 2016, 2.)

OLED-näytön määritelty käyttöjännite logiikan osalta on 2,4V...2,6 V (Densitron 2017, 8). Toisen regulaattorin täytyi siis tuottaa kyseistä jännitettä. Valmiina löytyvien komponenttien johdosta jännitetasoksi valittiin 2,5 V.

OLED-näytön käyttöjännitteeksi on määritelty 12,5 V...13,5 V (Densitron 2017, 8). Jotta käytetty 7 V:n jännite saataisiin oikean suuruiseksi, käytetään step-up-muuntajaa. Työssä käytetty muuntaja on LM2703, joka on ideaalinen matkapuhelinten taustavalaisuun ja pienivirtaisten LCD-näyttöjen käyttöön.

4.2 Mikrokontrolleri

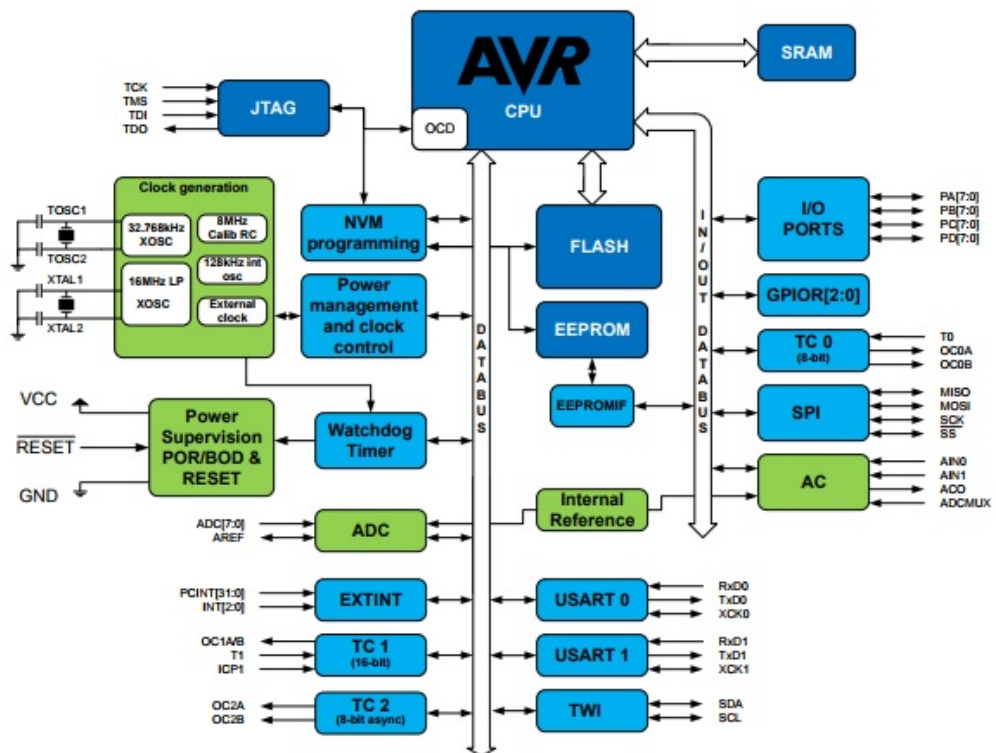
Fimet Oy käyttää NEO-hammashoitoyksiköiden piirikorteissa Atmelin AVR-mikrokontrollereita. Kyseiset mikrokontrollerit perustuvat RISC-arkkitehtuuriin. Ne ovat suunniteltu suorittamaan C-kielestä konekielelle käännettyä ohjelmaa mahdollisimman tehokkaasti. Ohjelmakoodi on tästä syystä lyhyt ja mikrokontrollerin sisältämä CPU suorittaa ohjelman nopeasti. (Koskinen 2006, 137.)

Epäilemättä laitteen tärkein yksittäinen komponentti on mikrokontrolleri Atmega324PA. Kyseinen 8-bittinen mikrokontrolleri sisältää seuraavat työn kannalta oleelliset ominaisuudet:

- 32 kilotavua flash-muistia
- 1 kilotavu EEPROM-muistia
- 2 kilotavua SRAM-muistia
- 32 I/O-liitäntää
- kaksi 8-bittistä laskuria
- 8-kanavaisen AD-muuntimen, jonka resoluutio on 10 bittiä
- kaksi sarjaliikenneväylää.

Kuviossa 4 on Atmega324PA:n lohkokaavio. Tärkeimpänä, ja siten suurimpana lohkona kuviossa on mikrokontrollerin prosessori, eli CPU. Kuviossa ei ole näkyvillä CPU:n sisäisiä rekisterejä tai yksiköitä. CPU:n

rekisterit sijaitsevat SRAM-käyttömuistin kanssa samassa muistiavaruudessa. Työssä käytetään EEPROM-muistia tulosten tallentamiseen ja BOD-jännitteenseurantaa turvaamaan muistiin kirjoitukset sekä yleinen mikrokontrollerin toiminta. JTAG-lohkoa käytetään ohjelmakoodin siirtämiseen PC:ltä mikrokontrollerille. OLED-näyttöä ohjataan SPI-lohkon avulla. Tieto mitattavasta virrasta tulee yhteen kahdeksasta ADC-lohkossa olevasta kanavasta. USART 0 -lohko on käytössä tulosten siirtämiseen eteenpäin ulkoiselle laitteelle, kuten PC:lle. TC 2 -lohko on 8-bittinen laskuri, jota käytetään päivittämään näppäinpainalluksia. Lisäksi lukuisia I/O-portteja käytetään erilaisiin toimenpiteisiin.



KUVIO 4. Atmega324PA-lohkokaaavio (Atmel 2016).

4.3 Shuntti

Useissa mikrokontrollereissa oleva AD-muuntaja mittaa signaalin jännitettä, mutta suora tapaa virran mittaamiseen mikrokontrollereissa ei ole. Helppo tapa virran mittaamiseen on käyttää shunttia. Shuntti on

pieniresistanssinen vastus, jota käytetään niin vaihto- kuin tasavirran mittaamiseen. Shuntin yli tapahtuva jännitteen muutos U mitataan ja ohmin lain avulla lasketaan virta I . (RC Electronics, 2017.) Laskua varten shuntin resistanssi R täytyy olla tiedossa. Työssä käytetty shuntti koostui neljästä rinnan kytketystä $0,1 \Omega$ vastuksesta, joiden tehonkesto oli 4 W . Rinnan kytkettyjen vastusten kokonaisvastus R_{tot} lasketaan kaavalla 1:

$$R_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{1}{\frac{1}{0,1} + \frac{1}{0,1} + \frac{1}{0,1} + \frac{1}{0,1}} = 0,025$$

Näin ollen shuntin resistanssi on $0,025 \Omega$. Mitattavan virran tiedettiin olevan aina vähemmän kuin 20 A , joten shunttiin vaikuttava maksimiteho olisi täytyisi myös tietää. Kokonaismaksimiteho lasketaan Ohmin lailla, jota käytetään kaavassa 2:

$$P = U * I = R * I^2 = 0,025 \Omega * 20 \text{ A}^2 = 10 \text{ W}$$

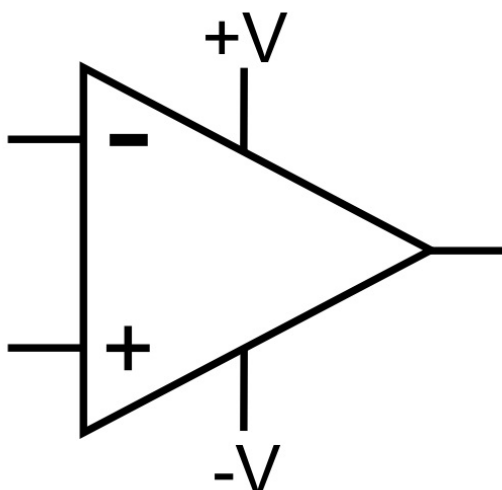
Yhden vastuksen tehonkesto oli 4 W . Koska virta jakaantuu tasaisesti jokaiseen samankokoiseen rinnan kytkettyyn vastukseen, on yksittäiseen vastukseen kohdistuva maksimiteho $2,5 \text{ W}$. Shuntin koostavien vastusten pitäisi siis kestää määrittelyn mukainen mitattava virta.

4.4 Operaatiovahvistin

Mikropiireihin voidaan lukea kaksi pääryhmää, analogiset ja digitaaliset piirit. Näistä kahdesta analogiset piirit voidaan jakaa edelleen yleiskäyttöisiin ja erikoiskäyttöisiin sovellutuksiin. Operaatiovahvistin on analogiaelektronikassa keskeinen yleiskäyttöinen komponentti. Se vahvistaa kahden sisääntulon välistä jännite-eroa. Pienissä tuotantomäärissä operaatiovahvistimet on erityisen suosittuja. Kyseinen mikropiiri sisältää kymmeniä transistoreja. (Salo 1998, 73 – 74.)

Operaatiovahvistimen nimi tulee siitä, että sillä pystyy tekemään monia erilaisia elektronisia toimintoja, eli operaatioita. Puhekielessä operaatiovahvistin tunnetaan nimillä opari ja englanninkielisestä

lyhenteestä tuleva opamp. Operaatiovahvistimien edullisuus, helppokäyttöisyys ja luotettavuus on tehnyt niistä yhden elektroniikkasuunnittelun peruspilareista. Kuviossa 5 operaatiovahvistimen piirrosmerkki. Positiivinen käyttöjännite merkitään operaatiovahvistimessa yläpuolelta tulevaksi ja negatiivinen alapuolelta. Komponentilla on kaksi tuloa. Invertoivaa eli kääntävää tuloa merkitään miinusmerkillä. Operaatiovahvistin kääntää tähän napaan syötetyn signaalin vastakkaisvaiheiseksi ulostuloon. Ei-invertoivaa tuloa merkitään plusmerkillä. Tähän napaan syötetty signaali pysyy samanvaiheisena ulostulossa. Joissakin operaatiovahvistimissa on myös enemmän liityntöjä kuin kuviossa 5 olevat viisi. (Salo 1998, 73 – 74.)



KUVIO 5. Operaatiovahvistin

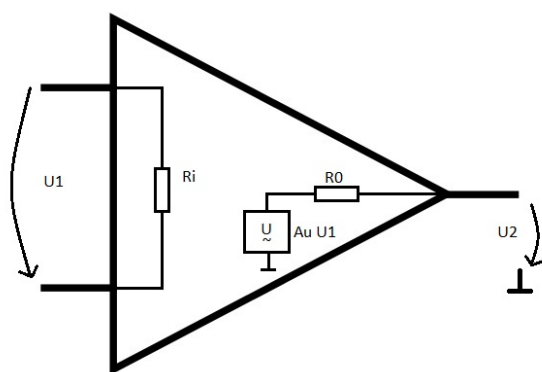
Työhön käytettäväksi operaatiovahvistimeksi valittiin LM324N. Se oli ainoa vaatimukset täyttävä operaatiovahvistin, jota löytyi valmiina Fimet Oy:n elektroniikkaosaston komponenttivarastosta. Komponentti pitää sisällään neljä itsenäistä operaatiovahvistinta, jotka käyttävät samaa käyttöjännitettä.

4.4.1 Operaatiovahvistimen ominaisuudet

Operaatiovahvistimen keskeiset ominaisuudet löytyvät kuviosta 6. Ne ovat tuloresistanssi R_i , lähtöresistanssi R_0 ja jännitevahvistus A_u .

Ihanteellisessa komponentissa ominaisuudet ovat seuraavat:

- Tuloresistanssi R_i on äärettömän suuri.
- Jännitevahvistus A_u on äärettömän suuri.
- Lähtöresistanssi R_0 on nolla.



KUVIO 6. Operaatiovahvistimen ominaisuuksia

Ihanteellisia ominaisuuksia operaatiovahvistimeen on kuitenkin käytännössä mahdoton saada. Todellisuudessa piirin ominaisuudet ovat seuraavanlaiset:

- Tuloresistanssi R_i on $0,5 \text{ M}\Omega \dots 10 \text{ M}\Omega$
- Jännitevahvistus A_u on $10000 \dots 800000$ eli $80 \text{ dB} \dots 118 \text{ dB}$
- Lähtöresistanssi R_0 on $100 \text{ }\Omega \dots 500 \text{ }\Omega$

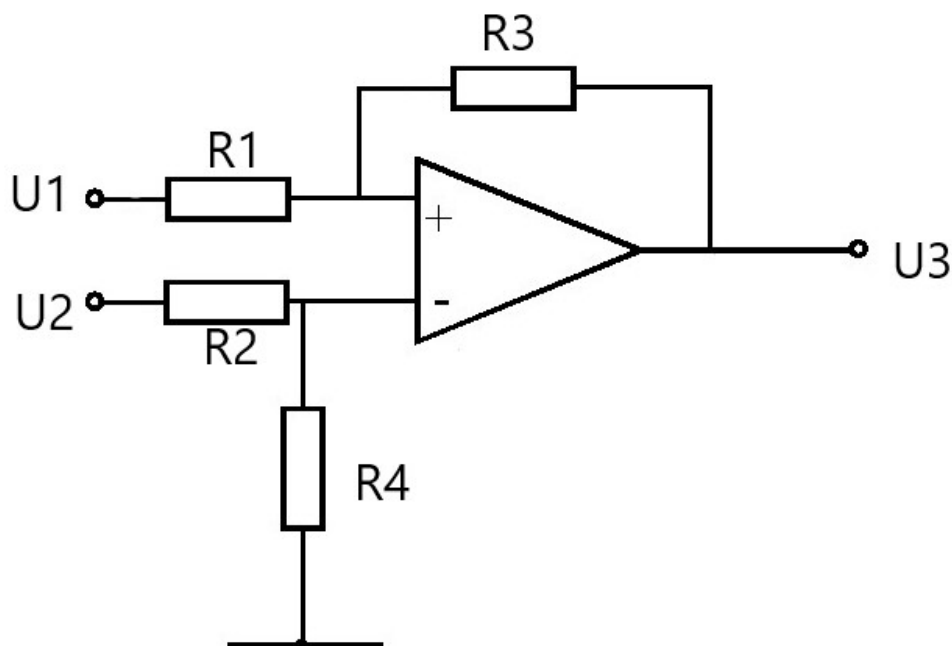
4.4.2 Operaatiovahvistinkytkentöjä

Harkittuja kytkentävaihtoehtoja oli kaksi erilaista. Mikäli virtamittaus tapahtuisi johtimista, jotka on liitetty moottoriin, käytettäisiin mittauksessa differentiaalivahvistinta. Yksinkertaisempi, mutta absoluuttiseen

virtamittaukseen vähemmän tarkempi tapa olisi käyttää ei-invertoivaa vahvistinta, jolloin mittaus tehtäisiin koko piirilevyn käyttämästä virrasta. Testaustoimenpiteessä muun kuin moottorin ajon käyttämä virta olisi kuitenkin niin vähäistä, että mittaustulokset eivät tulisi vääristymään liikaa.

Kuviossa 7 on tyypillinen differentiaalivahvistimen piirikaavio.

Differentiaalivahvistimessa on kytketty operaatiovahvistimen molempiin tulojännitenapoihin signaali. Operaatiovahvistimen sisällä on itsessäänkin differentiaalivahvistin, mutta kytkemällä toinen tulojännitenapa yhteen signaaliin ja toinen tulojännitenapa toiseen signaaliin, tulee lähtöjännite olemaan verrannollinen tulojännitteiden eroon. (Electronics Tutorials 2017.)

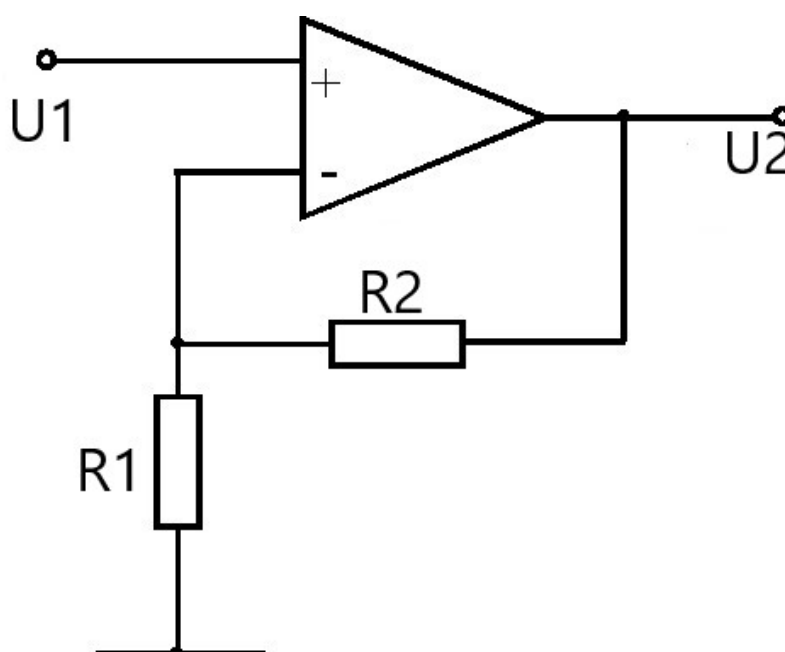


KUVIO 7. Differentiaalivahvistimen piirikaavio

Differentiaalivahvistimen lähtöjännite lasketaan kaavalla 3:

$$U_3 = -U_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right) + U_2 \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) * \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1} \right)$$

Kuviossa 8 on tyypillinen ei-invertoivan vahvistimen piirikaavio. Ei-invertoivassa vahvistimessa vahvistuksen määrää takaisinkytkentäpiirin komponentit R1 ja R2. Kun tulojännitteeseen U1 kytketään jännite, lähtöjännite U2 alkaa lähestyä käyttöjännitettä. Vastuksien kautta osa lähtöjännitteestä kulkeutuu invertoivaan tuloonapaan. Lähtöjännite nousee niin kauan kunnes invertoivan tulonavan jännite on sama kuin tulojännite, sillä operaatiovahvistimen vahvistus on ääretön. Molemmissa tulojännitenavoissa on siis sama jännite. (Salo 1998, 75.) Lopulta työssä päädyttiin käyttämään ei-invertoivaa vahvistinta.



KUVIO 8. Ei-invertoivan vahvistimen piirikaavio

Ei-invertoivan vahvistimen vahvistus lasketaan kaavalla 4:

$$Au = \frac{R1 + R2}{R1}$$

Mikäli R1 on yhtä suuri kuin R2, on vahvistus 2. Tätä vahvistusta käytettiin myös työssä. Shuntin ollessa 0,025 Ω ja määritellyn maksivirran 20 A, on tulojännite Ohmin lain mukaan enintään 0,5 V. Vahvistuksen jälkeen AD-muuntajalle menevä lähtöjännite näin ollen on enimmillään 1 V.

4.5 PWM-signaalin suodatus

Suotimien avulla estetään ja päästetään signaaleja kulkemaan. Niiden avulla rakennetaan esimerkiksi viritettyjä vahvistimia ja oskillattoreita. Suodin voi olla alipäästö-, ylipäästö-, kaistanpäästö- tai kaistanestosuodin. Suotimien kytkennöissä on vastus ja kondensaattori, vastus ja kela, kondensaattori ja kela, tai kaikki kolme edellä mainittua komponenttityyppiä. Kytkentään haluttiin suodin, jotta PWM-ohjatusta moottoriajosta saataisiin tasaista analogista jännitettä. Mikäli jännitettä yritettäisiin mitata sellaisenaan, mittaustulokset vaihtelisivat, vaikka virta pysyisi samana.

Moottorin virtarajoja testatessa voidaan olettaa, että moottoria ajetaan vähintään sekunti ennen ajon pysäyttämistä. Signaalin tasaamisen ei siis täytyisi olla merkittävän nopea, sillä nopeuden kasvattaminen kasvattaisi myös jännitevaihteluita. Tavoitteena suotimelle oli saada mahdollisimman tasaista jännitettä.

Alipäästösuotimessa vastus ja kondensaattori muodostavat jännitteenjakopiirin. Matalilla taajuuksilla kondensaattorin impedanssi on suuri ja näin tulojännite vaikuttaa lähes kokonaan kondensaattorin navoissa. Tämä on samalla suotimen lähtöjännite. Taajuuden kasvaessa impedanssi pienenee. Suurissa taajuuksissa kondensaattori on käytännössä oikosulku runkoon nähden. (Salo 1998, 14.)

Suotimen ylärajataajuus on se taajuus, jossa signaalin taso on pienentynyt 3 desibeliä. Kuviossa 3 olevien arvojen mukaan käytetyn suotimen ylärajataajuus selviää kaavasta 4:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi * 18 \text{ k}\Omega * 1 \text{ }\mu\text{F}} \approx 8,8 \text{ Hz}$$

Mitattavan PWM-signaalin taajuuden ollessa huomattavasti suurempi, noin 20 kHz, pysyy lähtöjännite riittävän tasaisena, mikäli suurella 1 μF kokoisella kondensaattorilla on tarpeeksi aikaa varautua. Kondensaattorin varautumisaika lasketaan käyttäen aikavakiota τ . (Electronics Tutorials,

2017.) Aika, joka kuluu kondensaattorin täyteen varautumiseen, lasketaan kaavalla 5:

$$T = 5\tau = 5RC = 5 * 18 \text{ k}\Omega * 1 \text{ }\mu\text{F} = 90 \text{ ms}$$

Moottoriajon aloituksen jälkeen AD-mittaukset tasaantuvat riittävän nopeasti.

4.6 OLED-näyttö

Testausympäristö ei pidä sisällään tietokonetta, joten virtarajojen mittausratkaisu täytyy olla oma käyttöliittymä. Käyttöliittymässä haluttiin kuvata virran ja ajan suhdetta ennen ja jälkeen virtarajan ylittymisen. Lisäksi käyttöliittymässä tulisi olla vähintään yhden kokoista tekstiä.

Fimet Oy:n NEO-hammashoitoyksiköissä on käytössä OLED-näyttöjä. Näytöt tukevat 262000:tta eri väriä. Näyttöjä ohjataan SSD1351 ajurin avulla. Näytöt ovat tarkkuudeltaan 128x128 pikseliä. Tarkkuuden todettiin olevan riittävä laitteistoon. (Densitron 2017, 4.)

5 OHJELMISTOSUUNNITTELU

Työssä käytetty ohjelmointiympäristö oli Atmel Studio 7.0.1417.

Ohjelmointilaitteena käytettiin AVR Dragon-ohjelmointilaitetta, joka sisältää myös debuggerin.

5.1 Käyttöliittymä

Laitteiston käyttöliittymä koostuu kolmesta painikkeesta ja OLED-näytöstä. Näppäinten tiloja päivitetään TIMER2-keskeytyksessä kuvion 9 mukaisesti. Keskeytys tapahtuu yhden millisekuntin välein. Kaikkien kolmen näppäimen tila päivitetään value-muuttujaan. Näppäin täytyy olla painettuna vähintään 20 keskeytyksen ajan, jotta näppäinpainallus huomioidaan. ButtonChange-muuttujalla indikoidaan näppäinpainalluksien muutosta.

```

u08 value=0;

// acquire some fresh data..
value= (SWA_PIN&(1<<SWA_BIT))?0:(1<<0);
value+=(SWB_PIN&(1<<SWB_BIT))?0:(1<<1);
value+=(SWC_PIN&(1<<SWC_BIT))?0:(1<<2);

// check for content mismatch..
if (ButtonFast==value) ButtonFilter++;
else ButtonFilter=0;

// release valid data and reset.
if (ButtonFilter>20) {
    Button=value;
    if(ButtonOld!=Button)ButtonChange=1;
    ButtonOld=Button;
    ButtonFilter=0;
}

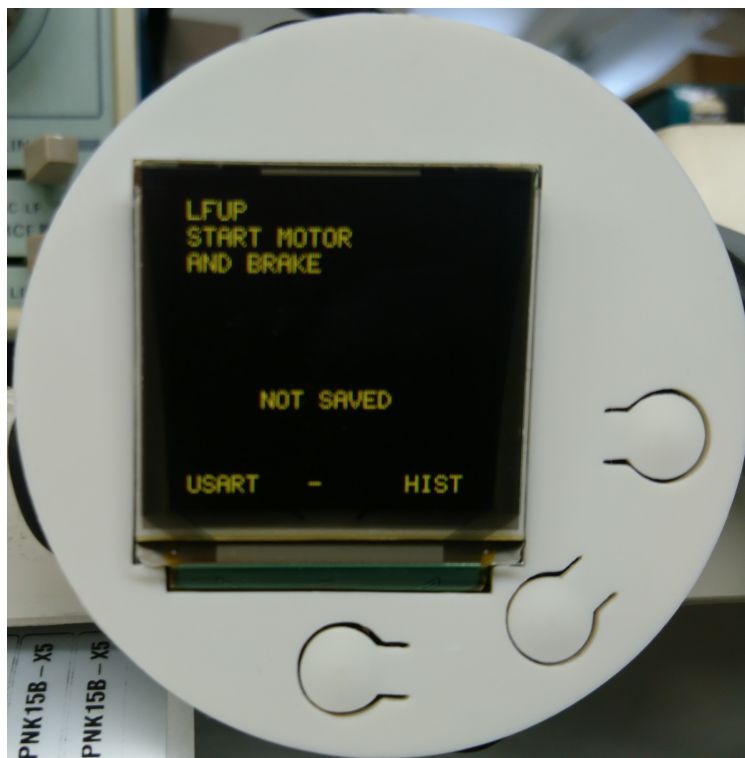
ButtonFast=value;

```

KUVIO 9. Näppäintenlukufunktio

OLED-näytön osalta tärkeintä oli informaation näkyminen tekstinä oikeaan aikaan. Ainoastaan virran suhde aikaan moottorin pysähdyksen aikana haluttiin nähdä tarkemmin graafisena kuvaajana. Esimerkki käyttöliittymästä on kuvassa 4. Kuvassa on tilanne, jossa yksi mittaus on

saatu valmiiksi, mutta sitä ei ole tallennettu EEPROM-muistiin. Ohjelma suorittaa AD-muuntoja ja odottaa virran nousevan yli tietyn rajan.



KUVA 4. Uuden mittauksen aloitusnäky

5.2 Keskeytykset

Kun mikrokontrollerin keskeytystulo asetetaan aktiiviseksi, keskeytetään normaalin ohjelman suoritus ja hypätään keskeytyspalveluohjelmaan, joka tunnetaan paremmin nimellä ISR. Keskeytyspalveluohjelmassa suoritetaan välittömästi toimenpiteet, jotka ohjelmaan on määritetty ja tämän jälkeen palaa takaisin siihen kohtaan ohjelmaa, johon suoritus jäi kun keskeytys tapahtui. (Koskinen 2006, 18.)

Atmega324PA:ssa mahdollisia keskeytyksen aiheuttajia on 31 kappaletta. Työssä käytetyt keskeytykset liittyvät 8-bittiseen laskuriin ja UART-lähetykseen. AD-muunnon valmistumisesta johtuva keskeytys tehtiin myös ohjelmaan, mutta sitä ei lopulta käytetty.

5.3 Tilakoneet

Tilakone on järjestelmä, joka koostuu tiloista tilasiirtymisistä niiden välillä. Ohjelmassa on käytössä kaksi tilakonetta; mainState ja measureState. mainState-tilakoneen toiminnot on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. mainState-tilakoneen toiminnot

mainState	Toiminto
0	Mittaukset käynnissä
1	Mittaukset valmiina
2	Mittaushistorian tarkastelu

measureState-tilakone sisältyy mainState-tilakoneen tilaan 0. measureState-tilakoneen toiminnot ovat taulukossa 2.

TAULUKKO 2. measureState-tilakoneen toiminnot

measureState	Toiminto
0	Tulostetaan näytölle ohjeita
1	Mitataan ja tarkastellaan virtaa, tarkastetaan näppäinpainallukset
2	Mittaus tehty, siirytäänkö seuraavaan?

5.4 AD-muunnin

Mikäli mikrokontrollerilla halutaan tulkita analogisia signaaleja, ne täytyy muuttaa ensin digitaalisiksi. Useimmilta mikrokontrollerivalmistajilta löytyy malli, johon on samalle piirille integroitu AD-muunnin. AD-muunninta käytetään muuttamaan analoginen signaali mikrokontrollerin ymmärtämäksi digitaalseksi signaaliksi. AD-muuntimen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat seuraavat:

- resoluutio
- muunnosnopeus
- kanavien määrä.

Resoluutiolla tarkoitetaan sitä bittimäärää, jolla muunnin ilmoittaa tuloksen. (Koskinen 2006, 106.) Työssä käytetyssä mikrokontrollerissa,

ATmega324PA:ssa oleva 10-bittinen muunnin jakaa mittauksen alla olevan analogisen signaalin $2^{10} = 1024$ osaan.

Muunnosnopeus tarkoittaa aikaa, joka kuluu AD-muuntimelta muunnoksen tekemiseen. Ajat ovat yleensä mikrosekuntien luokkaa. (Koskinen 2006, 106.) ATmega324PA-mikrokontrollerin muunnosnopeus on 13 μ s...260 μ s.

Kanavien määrä ilmaisee, kuinka montaa eri signaalia AD-muuntimella voidaan mitata sellaisenaan. Mikrokontrolleri pitää sisällään multiplekserin, jonka avulla mikrokontrolleri voi mitata useita analogisia signaaleja vuorotellen. (Koskinen 2006, 106.) Työssä oli tarkoitus käyttää enintään neljää kanavaa. Lopulta käytettiin vain yhtä kanavaa, vaikka käytetyssä mikrokontrollerissa oli käytettävissä kahdeksan.

AD-muuntimen referenssijännite V_{REF} määrittää muunnosalueen. Referenssijännitteen valintaan voidaan käyttää mikrokontrollerin käyttöjännitettä, sisäistä 1,1 V:n tai 2,56 V:n jännitettä, tai AREF-tuloon kytkettyä ulkoista jännitettä. Työssä käytetty referenssijännite on mikrokontrollerista itsestään saatu 1,1 V. Mittauksesta saatu arvo välillä 0x0000...0x03FF tarkoittaa siis jännitteenä 0 V...1,1 V. Yhden osan merkitys on täten n.1 mV

Kun AD-muunto on suoritettu, mittaustulos on luettavissa ADCL ja ADCH rekistereistä. Riippuen ADMUX-rekisterissä olevan ADLAR-bitin alustuksesta, on toisessa rekisterissä tuloksen 8 bittiä, ja toisessa 2 bittiä. Kuviossa 10 on rekisterien sisältö kummallakin eri alustuksella. Kuviossa 11 on nähtävissä AD-muuntimen alustus. ADLAR-bitin jätetään 0-tilaan.

ADLAR = 0

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	
(0x79)	–	–	–	–	–	–	ADC9	ADC8	ADCH
(0x78)	ADC7	ADC6	ADC5	ADC4	ADC3	ADC2	ADC1	ADC0	ADCL
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R	R	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	

ADLAR = 1

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	
(0x79)	ADC9	ADC8	ADC7	ADC6	ADC5	ADC4	ADC3	ADC2	ADCH
(0x78)	ADC1	ADC0	–	–	–	–	–	–	ADCL
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R	R	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	

KUVIO 10. ADLAR-bitin vaikutus rekistereiden lukemiseen

Muita käytettyjä alustuksia AD-muuntimelle oli

- ADEN-bitti, joka täytyy olla 1-tilassa, jotta AD-muunnin on käytössä
- ADIE-bitti, joka asettaa käyttöön AD-muuntimesta peräisin olevat keskeytykset
- ADPS-bitit, jotka määrittävät AD-muuntimen kellotaajuuden jakamalla koko järjestelmän kellotaajuudesta tietyn osan.

```

// Initialize Analog to digital converter
void InitAD(void){
    ADMUX=0x80; // ref=1.1V , LAR
    // set ADC prescaler to , 8MHz / 16 = 500kHz = 26us (1<<ADIE)
    ADCSRA = (1<<ADEN) | (1<<ADIE) | (1<<ADPS2);
}

```

KUVIO 11. AD-muuntimen alustus

Kuviossa 12 on AD-muuntimen käyttöön vaadittu funktio. Muunnos aloitetaan kirjoittamalla ADSC-bitti 1-tilaan. Kun sama ADSC-bitti on mennyt 0-tilaan, muunnos on valmis luettavaksi. Tulos luetaan ADCL- ja ADCH-rekistereistä yhteen int-tyyppiseen muuttujaan ja palautetaan se.

```

// Analog to digital converter
unsigned int ReadAD16(unsigned char channel){
    unsigned int value;
    ADMUX&=0xc0;
    ADMUX|=channel; // choose channel to measure
    ADCSRA |= (1<<ADIF); // Clear ADC conversion flag
    ADCSRA |= (1<<ADSC); // do single conversion
    while((ADCSRA & 0x40)); // wait for conversion done, ADIF flag active
    value = ADCL; // read out ADCL register
    value |= (ADCH << 8); // read out ADCH register
    return value;
}

```

KUVIO 12. AD-muuntimen funktio

Kuviossa 13 on mittausfunktio. Mittausten tarkkuuden varmistamiseksi jokaisessa mittausprosessissa otettiin 10 mittausta samasta signaalista. Signaalien joukosta poistettiin pienin ja suurin mitattu arvo. Jäljelle jääneiden kahdeksan mittaustuloksen summasta laskettiin keskiarvo. Laskettu keskiarvo jaettiin kahdeksalla ja kopioitiin taulukkoon. Kyseisen taulukon tehtävä on muistaa 120 viimeisintä mittausta. Näitä muistissa olevia arvoja käytettäisiin kuvaajaa varten. Keskiarvo jaettiin kahdeksalla, sillä AD-muuntimen resoluutio on kahdeksan kertaa niin suuri kuin OLED-näytön. Esimerkki mittaustuloksesta on kuvassa 5.


```

int MeasureAnalog(void){
    u16 adc_result = 0;
    u16 adc_total = 0;
    u16 adc_max = 0;
    u16 adc_min = 0;
    u16 adc_reading = 0;

    adc_min=0xffff;
    adc_max=0x0000;
    adc_total=0;
    for(u08 i=0;i<10;i++){

        adc_reading=ReadAD16(0);

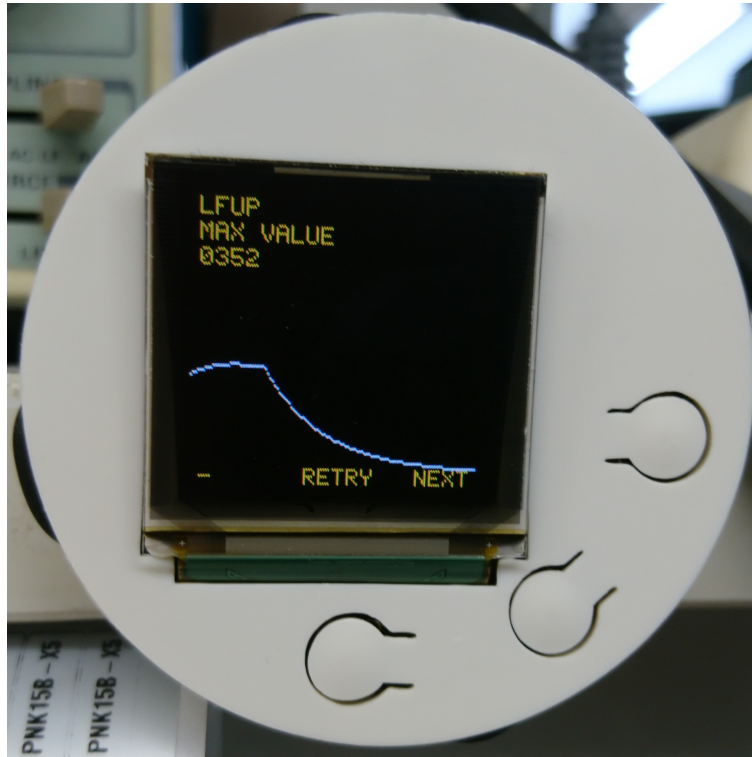
        if(adc_reading<adc_min)adc_min=adc_reading;
        if(adc_reading>adc_max)adc_max=adc_reading;
        adc_total+=adc_reading;
        if(i==9){
            adc_total-=adc_min;           //take average of adc results
            adc_total-=adc_max;           //don't count highest and lowest value
            adc_result=adc_total/8;
        }
    }

    // Following is used only for graph
    temp1=adc_result;
    temp1/=8;                               //ADC resolution 0-1023, screen resolution 0-127
    temp1=115-temp1;                         //lower value to lower in screen
    for(unsigned char i=120;i>0;i--)
    {
        temp2=adcMemOld[i];                 //put latest value last,
        adcMemOld[i]=temp1;                 //push other values one step
        temp1=temp2;                         //forget oldest value
    }

    return adc_result;
}

```

KUVIO 13. Virranmittausfunktio



KUVA 5. Viimeisimmän mittauksen graafinen esitys

5.5 OLED-näyttöön kirjoittaminen

OLED-näyttöön kirjoittamiseen löytyi Fimet Oy:n omista kirjastoista valmiit funktiot. Vain kolmea funktiota käytettiin. Kuviossa 14 on kuvattu käytetyt funktiot. Yksittäisiä pikseleitä kirjoitettiin vain virtakuvaajan tulostamiseen. Toisin kuin kuvassa, pikseleiden kirjoittamiseen ei käytetty vakioita, vaan for-silmukassa olevaa muuttujaa yhdessä mittaustulokset sisältävän taulukon kanssa. Kaikkien kirjoitettujen tekstien koordinaatit kuitenkin olivat vakioita.

```
//Fill screen with black
GLCD_Clear();
//x-coordinate,y-coordinate,text color, bg color, string
GLCD_DrawTextXY(5,115,cYELLOW,cBLACK,"USART\0");
//x-coordinate,y-coordinate,color
GLCD_PutPixelXY(37,76,cWHITE);
```

KUVIO 14. OLED-näyttöön liittyvät funktiot

5.6 Tulosten tallentaminen EEPROM:iin

Atmega324PA tarjoaa kilotavun EEPROM-muistia. EEPROM on muistia, joka säilyy sähkökatkoksista huolimatta. Se kestää vähintään 100 000 kirjoituskertaa. (Atmel 2016, 34.) EEPROM-muistiin voidaan kirjoittaa tavu kerrallaan, eikä sitä tarvitse erikseen tyhjentää. Muistiin kirjoitus kestää joitakin millisekunteja. (Koskinen 2006, 54.) Yleisesti EEPROM-muistia käytetään konfiguraatioiden säilyttämiseen. Työssä päätettiin kuitenkin käyttää EEPROM-muistia kaiken tallettavan tiedon hallintaan, sillä käytössä oleva kilotavu riittäisi juuri ja juuri.

Atmel Studio tarjoaa mukana tulleen EEPROM-kirjaston. Täten käyttäjän ei tarvitse sisäistää muistiin kirjoittamiseen ja sieltä lukemiseen käytettäviä osoite-, data- ja kontrollirekisterejä. EEPROM-muistin käytössä on kuitenkin muita huomioitavia asioita.

EEPROM-muistin korruptoituminen on mahdollista, mikäli tarvittavia suojaavia ennakkotoimenpiteitä ei ole tehty. Tarpeeksi korkea käyttöjännite on oleellinen asia muistiin kirjoittaessa. Matala käyttöjännite voi korruptoida muistin kahdella tapaa. Ensiksi, tavanomainen kirjoitus EEPROM-muistiin vaatii tarpeeksi suuren käyttöjännitteen toimiakseen oikein. Toiseksi, mikrokontrolleri itsessään voi suorittaa toimenpiteitä väärin. (Atmel 2016, 35.)

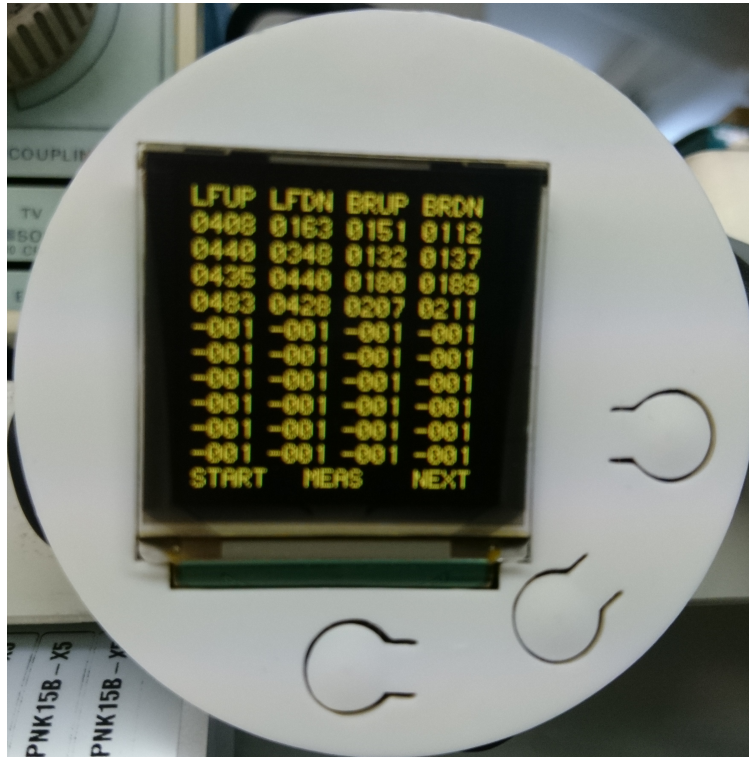
Suojaavana toimenpiteenä käytetään BOD-sulakebitin asettamista aktiiviseksi. Bitin ollessa aktiivinen, RESET-tila aktivoituu jännitteen ollessa riittämätön. Mikäli tämän aikana muistiin ollaan juuri kirjoittamassa, kirjoitus suoritetaan ensin loppuun mikäli jännitetaso on riittävä.

Mittausten jälkeen käyttöliittymä kysyy käyttäjältä, halutaanko tulokset tallentaa EEPROM-muistiin. Esimerkki näkymästä on kuvassa 6.



KUVA 6. Näkymä kaikkien neljän mittauksen jälkeen

Käyttäjä voi myös tarkastella EEPROM-muistissa olevia tuloksia. Laite pystyy muistamaan 125 mittausta. Esimerkki näkymästä on kuvassa 7. Kaikki tulokset pystytään myös poistamaan muistista. Tällöin muistipaikat käytännössä kirjoitetaan täyteen arvoa -1.



KUVA 7. Näkymä aiempien mittausten tarkasteluun

5.7 Tulosten lähetys

Tulosten tutkintaa ja analysointia varten ohjelmakoodiin haluttiin mahdollisuus siirtää mitatut tulokset PC:lle. Käytävissä olevista tiedonsiirtoprotokollista päädyttiin käyttämään UART:ia, eli asynkronista sarjaliikennettä. Kun mittaustulokset ovat tilanteessa, jossa toimenpiteitä ei vaadita, voidaan painikkeella käynnistää tulosten lähetys. Kuviossa 15 on esitetty toimenpiteet, joilla tulosten lähetys on toteutettu.

Jokaista tallennettua mittausta kohden laite lähettää 11 tavua dataa. Paketin alkua merkkamaan valittiin ;-merkki sillä perusteella, että muun datan seassa se on helppo erottaa ja sitä ei käytetä muualla lähetyksessä. Seuraavat kahdeksan tavua merkkavat molempien moottorien virtarajoja kumpaankin suuntaan mitattuna. Jokainen arvo on jaettu kahteen tavuun, sillä AD-muuntimesta saatu 10-bittinen tulos on liian suuri yhteen tavuun. Kahtena viimeisenä tavuna paketissa on CR- ja LF-merkit. CR siirtää kirjoituskohdan vasempaan ääriasentoon ja LF siirtää kirjoituskohdan

yhden rivin verran alaspäin. Nämä lisättiin helpottamaan tulosten luettavuutta.

Saman kokoinen 11 tavun paketti lähetään niin monta kertaa kuin mittauksia on tallennettu EEPROM-muistiin. Kun kaikki paketit on lähetetty, OLED-näytölle tulostetaan kuvaava teksti ilmaisemaan tapahtumaa. Lähetys voidaan toistaa alusta asti tässä vaiheessa.

```

else if(Button==0x04&&ButtonChange){ //SWC pressed, send all measures to uart
    ButtonChange=0;

    //packet: ;,LFUPH,LFUPL,LFDNH,LFDNL,BRUPH,BRUPL,BRDNH,BRDNL,CR,LF //size 11 bytes
    Mem2UARTSize=eeprom_read_word(&eeEPM_MEASURECOUNTER);
    Mem2UARTPtr=0;
    while(Mem2UARTPtr<Mem2UARTSize){ //Repeat for every saved measurement
        Mem2UART[0]=0x3B; //Character ;
        for(unsigned char i=0;i<4;i++){ //Divide words to bytes
            temp=eeprom_read_word(&eeEPM_RESULTARRAY[Mem2UARTPtr++]);

            Mem2UART[1+i*2] = temp>>8; //High bytes
            Mem2UART[2+i*2] = temp; //Low bytes
        }
        Mem2UART[9]=0x0D; // CR
        Mem2UART[10]=0x0A; // LF

        while(TXBusy); //Wait for previous transmission to end
        sendUART(Mem2UART,11); //Start new transmission
    }
    GLCD_DrawTextXY(35,80,cYELLOW,cBLACK,"MEM PRINTED");
}

```

KUVIO 15. Funktio tulosten lähettämiseen sarjaväylällä

6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa mittauslaitteisto virtarajojen vaihteluihin. Laitteisto suunniteltiin Fimet Oy:n elektroniikkaosaston testauspisteelle. Laitteisto saatiin tehtyä valmiiksi ja se asennettiin valmiina käytettäväksi. Laitteistoa ei vielä käytetty tarpeeksi kattavasti, jotta voitaisiin todentaa mittausten luotettavuus.

Laitteiston alustavissa suunnitelmissa sen suunniteltiin autonomisesti tunnistavan käytetyn moottorin ja suunnan. Toteutusvaiheessa päädyttiin mittaamaan ainoastaan koko testattavana olevan piirikortin virtaa ja jätettiin käyttäjälle vastuu oikean moottorin valitsemisesta. Mikäli laitteistoa halutaan parantaa tulevaisuudessa, olisi hyvä idea ottaa moottorin ja sen suunnan autonominen tunnistaminen huomioon. Tämä vaatisi parannuksia niin elektroniikan kuin ohjelmiston suunnittelussa.

Laitteiston käyttöliittymästä tuli tyydyttävä. Oleelliset tekstit ja näppäinten toiminnot on luettavissa näytöltä oikeaan, mutta informaatio voisi olla tarkempaa ja kuvaavampaa. Mikäli laitteiston ohjelmakoodia muutetaan tulevaisuudessa, tekstien sisältöön tullaan todennäköisesti tekemään muutoksia.

Piirikortin virtarajoja testatessa käyttäjä pysäyttää moottorin ottamalla moottorin ankkurista kiinni kädellään. Alustavissa mittauslaitteiston testeissä ilmeni, että tämä saattaa tuottaa ongelmia. Inhimillisistä syistä johtuen moottorin pysäytys ei voi pysyä samanlaisena jokaisella toistokerralla. Alustavissa tuloksissa näkyi vaihteluja sellaisissa tapauksissa, jossa käyttäjä pysäyttää moottorin mahdollisimman nopeasti, ja jossa käyttäjä tiukentaa otettaan ankkurista hiljalleen. Parannuksia tähän ongelmaan tehdään ohjeistamalla käyttäjiä mahdollisimman tasaiseen moottorien pysäytyksiin. Mahdollinen parannus tulevaisuudessa on myös mahdollisesti mittausten välisen ajan minimointi.

Mittauslaitteistoa tehdessä ainoa asia, josta ei ollut minkäänlaisia kokemuksia oli OLED-näytön ohjaus. Valmiiden kirjastojen avulla oli

kuitenkin helppoa päästä perille näytön ohjauksesta, vaikka graafisten käyttöliittymien suunnittelemiseen jäi vielä parannettavaa.

Elektroniikkaosuuden suunnittelu jäi lopulta vähäisemmäksi kuin ohjelmiston. Tämä johtuen NEO-hammashoitoyksikön piirikorttien käytön joustavuudesta ja henkilökohtaisista intresseistä.

Työ syvensi tietoa Fimet Oy:n hammashoitoyksiköiden toiminnoista.

Tietoja tullaan käyttämään tulevaisuudessa muissa Fimet Oy:ssä tehtävissä töissä. Työ vaati kehittymistä monilla eri tietokone-elektroniikan insinöörin vaadituilla osaamisalueilla. Parannusta taitoihin tuli elektroniikan ja ohjelmiston suunnittelussa ja toteutuksessa, kuten myös ongelmien paikantamisessa ja hallinnassa.

LÄHTEET

Atmel. 2016. Atmega324PA [viitattu 4.10.2017] Atmel. Saatavissa:
http://www.atmel.com/Images/Atmel-42715-ATmega324PA_Datasheet.pdf

Densitron. 2010. OLED DISPLAY MODULE [viitattu 4.10.2017]. Densitron.
Saatavissa:
http://www.farnell.com/datasheets/609756.pdf?_ga=2.224841434.1582224401.1506412971-989703938.1504524865

Electronics Tutorials. 2017. RC Charging Circuit [viitattu 5.10.2017].
Electronics Tutorials. Saatavissa: http://www.electronicstutorials.ws/rc/rc_1.html

Electronics Tutorials. 2017. The Differential Amplifier [viitattu 4.10.2017].
Electronics Tutorials. Saatavissa: http://www.electronicstutorials.ws/opamp/opamp_5.html

Empire Dental Devices . 2016. Fimet product overview [viitattu 3.7.2017].
Empire Dental Devices. Saatavissa:
<http://www.empiredental.com.au/fimet-product-overview/>

Fimet Oy. 2017. About us [viitattu 3.7.2017]. Fimet Oy. Saatavissa:
<http://www.fimet.fi/fimet-oy-2/about-us/>

Kauppalehti . 2011. Fimetin hoitoyksiköt menevät lähes kokonaan vientiin [viitattu 3.7.2017]. Kauppalehti. Saatavissa:
<https://www.kauppalehti.fi/uutiset/fimetin-hoitoyksikot-menevat-laheskokonaan-vientiin/cpUxDMPd>

Koskinen, J. 2006. Mikrotietokonetekniikka – Sulautetut järjestelmät.
Keuruu: Otava

Mohammed, R. 2013. When it's Wise to Offer Volume Discounts [viitattu 4.9.2017]. Harvard Business Review. Saatavissa: <https://hbr.org/2013/10/when-it-is-wise-to-offer-volume-discounts>

RC Electronics. 2017. Current Shunt Resistors [viitattu 4.10.2017]. RC Electronics. Saatavissa: <http://www.rc-electronics-usa.com/current-shunt.html>

Salo, P. 1998. ANALOGISTA ELEKTRONIIKKAA, Periaatteita ja sovellutuksia. Keuruu: Otava