



Älykkään akkukäyttöisen maanäytesekoittajan suunnittelu

Jonne Tommila

OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2024

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

TOMMILA, JONNE:

Älykkään akkukäyttöisen maanäytesekoittajan suunnittelu

Opinnäytetyö 35 sivua
Kesäkuu 2024

Työssä suunniteltiin älykäs akkukäyttöinen maanäytesekoittaja laboratoriokäyttöön. Suunnittelun lähtökohtina olivat käyttömukavuus, kestävyys, langattomuus, helppo puhdistettavuus ja kustannustehokkuus. Laitteen vaatimukset ja tarvittavat ominaisuudet määriteltiin asiakasyrityksessä tehdyn haastattelun perusteella.

Sekoittajassa käytetään hiiliharjatonta tasavirtamoottoria, joka tarjoaa paremman hyötysuhteen ja vähäisemmän huoltotarpeen kuin perinteiset harjalliset moottorit. Moottorin ohjaus perustuu kenttäsuuntautuneeseen ohjaukseen, mikä mahdollistaa tarkan ja energiatehokkaan hallinnan. Moottorin asentotieto ohjausta varten saadaan moottorin tuottamasta vastasähkömotorisesta voimasta. Laitteen virtalähteenä toimii ladattava litiumioniakusto, jonka kapasiteettia voidaan lisätä tarpeen mukaan. Akun älykäs lataus ja purku tapahtuvat turvallisesti. Käyttäjä näkee akun varauksen käyttöpainikkeeseen integroitujen LED-valojen avulla.

Sekoittajan mekaniikkasuunnittelussa keskityttiin ergonomiaan ja kestävyyteen. Kotelon materiaalina käytettiin lieriön muotoista polypropeenaa. Elektroniikkasuunnittelussa hyödynnettiin tunnettujen valmistajien komponentteja kuten Espressif Systemsin ESP32-mikrokontrolleria, Texas Instrumentsin moottorinohjainta ja Analog Devicesin latauspiiriä. Piirilevysuunnittelussa pyrittiin tilan säästämiseen ja kustannustehokkuuteen valmistusvaiheessa. Ohjelmointi voidaan tehdä Arduino IDE -ympäristössä, mutta moottorin parametrien säätöön on syytä hankkia valmistajan evaluaatiopiirilevy ja ohjelmisto. Ennen tuotantoa on suoritettava prototyypin valmistus, toiminnalliset testit ja pilotointi.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin laboratoriossa maanäytteiden sekoittamiseen käytettävän laitteen kattava suunnitelma. Laite vastaa sekä toiminnoiltaan että käytettävyydeltään asiakasyrityksen tarpeisiin.

Asiasanat: laitesuunnittelu, hiiliharjaton tasavirtamoottori, kenttäsuuntautunut ohjaus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

TOMMILA, JONNE:
The Design of a Smart Battery-Powered Soil Sample Mixer

Bachelor's thesis 35 pages
June 2024

The work involved designing a smart battery-powered soil sample mixer for laboratory use. The design priorities included user-friendliness, durability, cordless operation, ease of cleaning and cost-effectiveness. The device's requirements and necessary features were defined based on an interview with the client.

The mixer utilizes a brushless DC motor providing better efficiency and requiring less maintenance compared to traditional brushed motors. The motor control is based on field-oriented control, enabling precise and energy-efficient management. The motor's position information for control is obtained from the back electromotive force generated by the motor. The device is powered by a rechargeable lithium-ion battery pack with its capacity being adjustable as needed. Smart charging and discharging of the battery occur safely, with the user being able to monitor the battery charge via integrated LED lights on the control button.

The mechanical design of the mixer focused on ergonomics and durability using cylindrical polypropylene as the casing material. In the electronics design, components from well-known manufacturers were used, such as Espressif Systems' ESP32 microcontroller, Texas Instruments' motor controller, and Analog Devices' charging circuit. The PCB design aimed to save space and be cost-effective during manufacturing. The programming can be done in the Arduino IDE environment, but it is advisable to acquire the manufacturer's evaluation PCB and software for adjusting the motor parameters. Before production, prototype manufacturing, functional tests, and piloting are necessary.

The thesis resulted in a comprehensive design of the equipment used in the laboratory for mixing soil samples. The device meets the needs of the client company in terms of both functionality and usability.

Key words: device design, brushless DC motor, field-oriented control

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	ALKUSELVITYS	8
2.1	Haastattelu	8
3	TEORIAA	9
3.1	Sopivia moottorityyppejä	9
3.1.1	Harjallinen tasavirtamoottori	9
3.1.2	Harjaton tasavirtamoottori	10
3.2	FOC- eli kenttäsuuntautunut ohjaus tai vektoriohjaus	12
3.3	Käytön vaatimukset	13
3.3.1	Moottori	13
3.3.2	Akunkesto	14
4	SUUNNITTELU	15
4.1	Toimintaselostus ja lohkokaavio	15
4.2	Mekaniikkasuunnittelu ja kotelointi	16
4.3	Elektroniikkasuunnittelu	17
4.3.1	Osavalinta	17
4.3.2	Piirisuunnittelu	24
4.3.3	Piirilevysuunnittelu	27
4.4	Ohjelmisto ja parametointi	28
5	SEURAAVAT VAIHEET	31
5.1	Prototyyppi	31
5.2	Toiminnallinen testaus ja pilotointi	32
6	POHDINTA	33
	LÄHTEET	34

LYHENTEET JA TERMIT

PWM	pulse width modulation, pulssinleveysmodulaatio
HIGH	I/O signaali "1", jännite ylhäällä
LOW	I/O signaali "0", jännite alhaalla
Open loop	moottorin ohjaus ilman takaisinkytkentää
Closed loop	moottorin ohjaus takaisinkytkennän kanssa
EMI	electromagnetic interference, sähkömagneettinen häiriö
ESC	electronic speed control, elektroninen nopeuden säätölaite
FOC	field-oriented control, kenttäsuuntautunut ohjaus, vektoriohjaus
MPET	motor parameter extraction tool, moottorin parametrien mittaustyökalu Texas Instrumentsin ohjelmistossa
1S2P	1 series 2 parallel, akuston kennot kytkettynä 1 sarjassa, 2 rinnankytkettynä
LED	light-emitting diode, valoa tuottava diodi
BLDC-moottori	brushless direct current, harjaton tasavirtamoottori
SDA	serial data
SCL	serial clock

1 JOHDANTO

Älykkäät, akkukäyttöiset laitteet ovat yleistyneet merkittävästi viime vuosina, ja niiden sovellukset vaihtelevat kuluttajaelektronikasta aina teollisiin tarkoituksiin. Tässä opinnäytetyössä keskitytään älykkään akkukäyttöisen maanäytesekoittajan suunnitteluun, jonka tavoitteena on kehittää laite, joka on käytännöllinen, ergonominen ja energiatehokas. Laite tulee olemaan muokattavissa erilaisiin ympäristöihin, joissa sen käyttö ja huolto ovat mahdollisimman helppoja käyttäjän tehdä.

Maanäytteiden sekoittaminen on kriittinen prosessi erilaisissa tieteellisissä ja teollisissa sovelluksissa, joissa tarvitaan tarkkoja ja luotettavia tuloksia. Perinteiset maanäytesekoittajat ovat usein verkkovirralla toimivia, mikä rajoittaa niiden liikkuvuutta ja käyttömukavuutta. Älykäs akkukäyttöinen sekoittaja poistaa nämä rajoitukset, tarjoten samalla edistyksellisiä ominaisuuksia, kuten hiljaisen toiminnan, hyvän akunkeston ja käyttäjäystävällisen muotoilun.

Opinnäytetyö jakautuu useaan vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa suoritettiin haastattelu asiakasyrityksen edustajan kanssa, joka antoi arvokasta tietoa laitteelle asetetuista vaatimuksista ja käyttötarpeista. Näitä tarpeita ovat esimerkiksi laitteiden yhteensopivuus käytettyjen mittalasiensa kanssa, helppokäyttöisyys, johdottomuus ja helppo puhdistettavuus.

Teoriaosuudessa käsitellään moottorityyppien valintaa ja niiden soveltuvuutta akkukäyttöiseen laitteeseen. Erityisesti harjattomien tasavirtamoottoreiden käyttöä tarkastellaan, koska ne tarjoavat korkeamman hyötysuhteen ja vähäisemmän huoltotarpeen verrattuna harjallisiin moottoreihin. FOC eli kenttäsuuntautunut ohjaus on myös tärkeä osa suunnittelua, sillä se mahdollistaa tarkan, hiljaisen ja tehokkaan toiminnan.

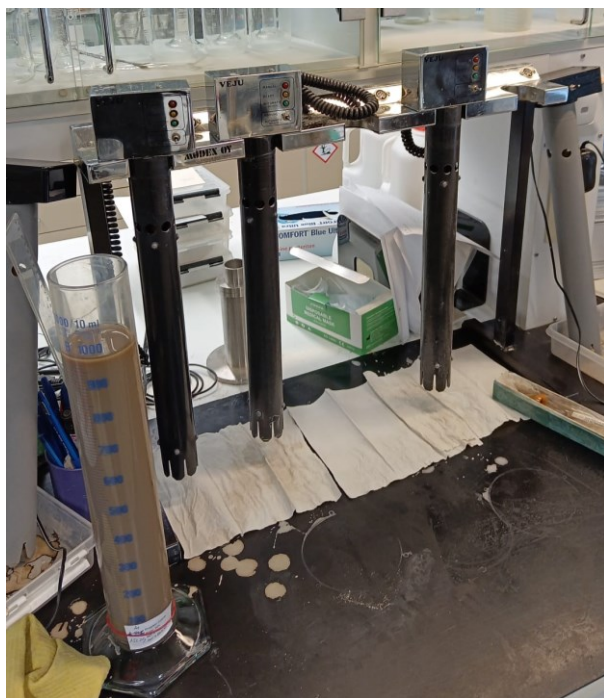
Suunnitteluosiossa esitellään laitteen toimintaselostus ja lohkokaavio, jotka kuvaavat laitteen eri osien yhteistoimintaa. Mekaniikkasuunnittelu keskittyy ergonomiseen muotoiluun ja käytännölliseen kotelointiin, kun taas elektroniikkasuunnittelu sisältää osavalinnan, piirisuunnittelun ja ohjelmallisen toiminnan yksityiskohtaisemmin. Elektroniikkasuunnittelussa käytetään tunnettuja ja luotettavia komponentteja, jotka takaavat laitteen pitkäikäisyyden ja luotettavuuden.

Lopuksi esitetään suunnittelun jälkeiset vaiheet, kuten prototyypin valmistus, toiminnallinen testaus ja pilotointi. Tämä vaihe varmistaa, että laite täyttää kaikki sille asetetut vaatimukset ja on valmis käytettäväksi erilaisissa laboratorioympäristöissä. Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää innovatiivinen ja tehokas ratkaisu maanäytteiden sekoittamiseen, joka hyödyttää sekä tiedeyhteisöä että teollisuutta.

2 ALKUSELVITYS

2.1 Haastattelu

Ennen suunnittelun aloittamista haastateltiin asiakasyrityksen edustajaa. Haastattelulla selvitettiin asiakasyrityksen tarpeet ja olosuhteet (kuva 1), joissa laitetta aiotaan käyttää.



Kuva 1. Laboratorio-olosuhteet. Vanhoja maanäytesekoittajia telineessä, sekä maanäyte 1000 ml mittalasissa (kuva: Jonne Tommila).

Haastattelun perusteella laitteelta halutaan seuraavia ominaisuuksia:

- Yhteensopiva yrityksen käyttämien mittalasien kanssa
- Normaalia käyttöä hyvin kestävä, laboratorio-olosuhteet
- Johdoton, ladattavalla akulla
- Ergonominen
- Helppokäyttöinen
- Hiljainen
- Helposti puhdistettavissa
- Helposti muokattavissa, myynti muille laboratorioille
- Edullinen valmistaa

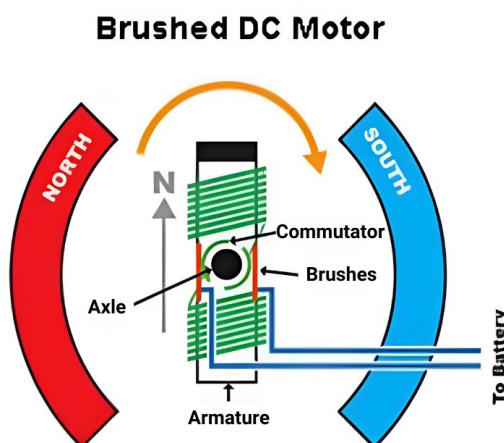
3 TEORIAA

3.1 Sopivia moottorityyppejä

Laitteen akkukäyttöisyyden vuoksi käytetään tasavirtamoottoria. Tasavirtamoottori toimii nimensä mukaisesti tasavirralla. Moottoreissa paikallaan pysyvää osaa kutsutaan staattoriksi ja pyörivää osaa roottoriksi. Roottorin muuttuva sähkökenttä synnytetään kommutaattorin avulla, mikä vaihtaa magneettien napaisuutta. Tasavirtamoottorit jaetaan kahteen päätyyppiin: harjallisiin ja harjattomiin.

3.1.1 Harjallinen tasavirtamoottori

Harjallisissa tasavirtamoottoreissa napaisuuden vaihto tapahtuu mekaanisesti kommutaattorin harjojen avulla. Yleisesti hiilestä tai metallista valmistetut harjat ovat kuluvia osia, lisäten moottorin huoltotarvetta. Kun harjat kuluvat, moottorin sisälle kertyy harjojen materiaalista pölyä, mikä voi tukkia moottorin. Kun moottorin harjat kuluvat loppuun, ne täytyvät vaihtaa (Motiva 2024). Kaikissa moottoreissa harjoja ei ole tehty vaihdettaviksi. Periaatteellinen rakenne on esitetty kuviossa 1.

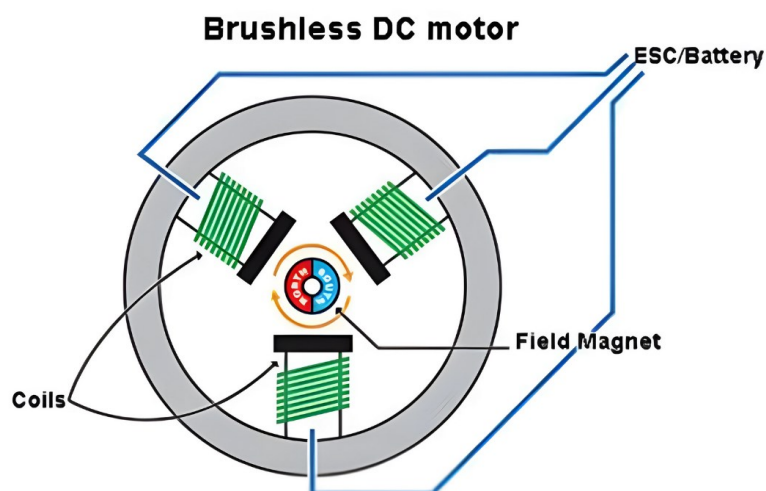


Kuvio 1. Harjallisen tasavirtamoottorin rakenne (Hein 2020).

Harjallisen tasavirtamoottorin hyötysuhde on yleensä huono, n. 50 – 80 % (Tyto Robotics Inc. 2023). Harjojen mekaaninen hankaus lisää moottorin pitämää ääntä ja lämpöhäviöitä.

3.1.2 Harjaton tasavirtamoottori

Harjattomissa tasavirtamoottoreissa roottori on kestopagnetoitu ja kommutaattori toimii sähköisesti, mikä vähentää mekaanista kulumista ja huoltotarvetta merkittävästi (The MathWorks, Inc. 2024, 2). Periaatteellinen rakenne on esitetty kuviossa 2.

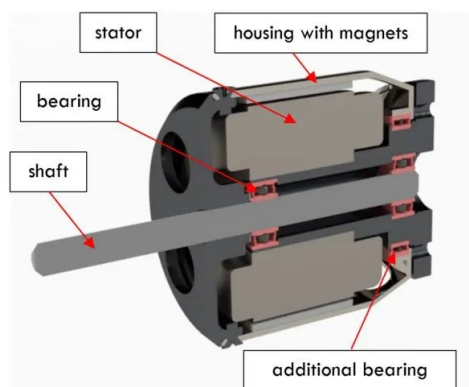


Kuvio 2. Harjattoman tasavirtamoottorin rakenne (Hein 2020).

Harjattoman moottorin käyttö lisää suunnittelun monimutkaisuutta, sillä harjaton DC-moottori tarvitsee ohjauselektroniikan, joka tunnistaa roottorin tarkan asennon ja kommutoi moottoria, eli säättää moottorikäämien saamaa jännitettä sekä virtaa. Elektroninen nopeuden säätölaite tuottaa kelojen avulla pyörivän magneettikentän, jota roottori seuraa.

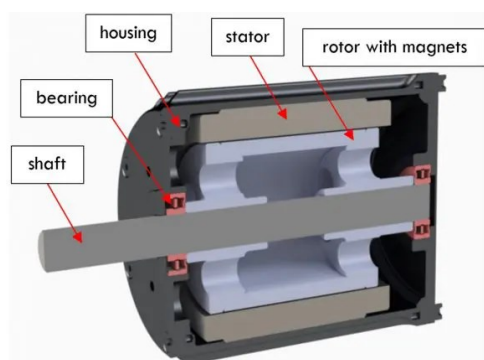
Moottoreita löytyy sekä inrunner-, että outrunner-vaihtoehtoina.

Outrunner- ja inrunner-moottoreiden ero on roottorin sijainnissa staattoriin nähden. Outrunner-moottoreissa roottori on ulkopuolella (kuvio 3) ja inrunner-moottoreissa sisäpuolella (kuvio 4). Outrunner-moottorit tarjoavat suuremman väännön alhaisilla nopeuksilla.



Kuvio 3. Outrunner-moottorin rakenne (Plettenberg motors 2024).

Inrunner-moottorit tarjoavat suuremman nopeuden mutta pienemmän väännön. Inrunner-moottoreilla on parempi teho-paino-suhde, kun taas outrunner-moottoreilla on parempi vääntö-paino-suhde (Plettenberg motors 2024).

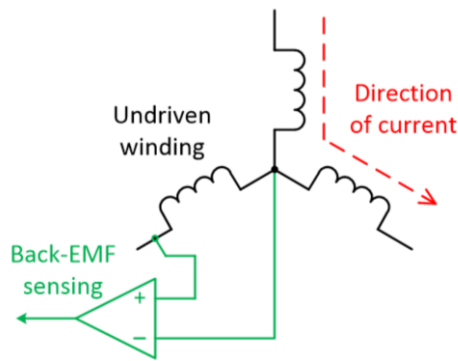


Kuvio 4. Inrunner-moottorin rakenne (Plettenberg motors 2024).

Molemmat moottorityypit sopivat laitteen käyttötarkoitukseen. Valinnassa keskitytään hankintahintaan, sekä siihen, miten moottori voidaan kiinnittää kotelointiin.

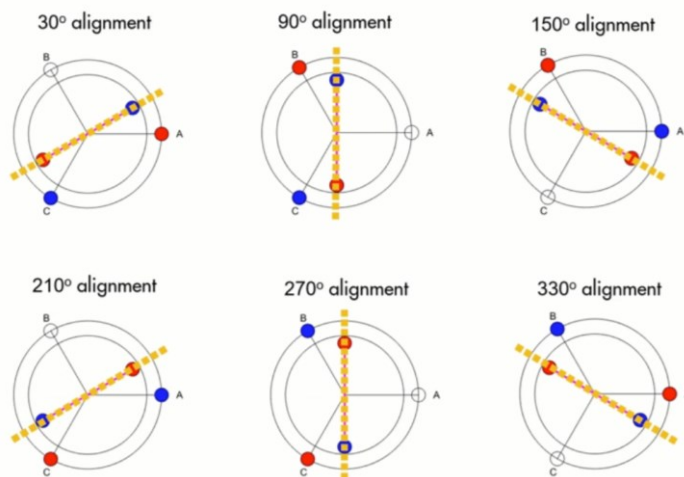
3.2 FOC- eli kenttäsuuntautunut ohjaus tai vektoriohjaus

Moottorin ohjausta varten moottorilta tarvitaan takaisinkytkentä, eli tilatieto roottorin asennosta. Takaisinkytkentä saadaan joko erillisiltä antureilta, tai kuten tässä tapauksessa, mittaamalla moottorin tuottama vastasähkömotorinen voima B_{emf} (kuvio 5).



Kuvio 5. Vastasähkömotorisen voiman mittaus (Hein 2020).

Vastasähkömotorinen voima syntyy, kun moottorin yhteen ohjaamattomaan ja virrattomaan vaiheeseen indusoituu muuttuvan magneettikentän synnyttämä jännite. Indusoituneen jännitteen ja virran avulla moottoriohjain tunnistaa roottorin asennon, ja tahdistaa kommutoinnin (kuvio 6).



Kuvio 6. Moottorin kommutointi, roottorin asento seuraa magneettikenttää (The MathWorks, Inc. 2024).

Moottorin asentotietoon eli takaisinkytkentään perustuvaa ohjausta kutsutaan closed-loop ohjaukseksi. Tämä mahdollistaa moottorin tarkan ohjauksen.

3.3 Käytön vaatimukset

3.3.1 Moottori

Moottorin ja muiden osien valintaa varten selvitettiin käytön vaatimukset. Tutkimalla alkuperäisiä sekoittajalaitteita, selvisi että niissä on käytetty Raboesch:n valmistamia hiiliharjallisia 12 V DC-moottoreita (kuva 2).



Kuva 2. Alkuperäisessä sekoittajalaitteessa käytetty hiiliharjallinen moottori (Raboesch n.d).

Nämä moottorit kykenevät tuottamaan optimaalisesti kierrosluvulla 8000 RPM ja 1,3 A virralla noin 0,01 Nm väännön ja 7,8 W tehon. Hyötysuhde on tällöin parhaimmillaan, vain 50,5 % (Taulukko 1).

Taulukko 1. Moottorivalmistajan datalehti, tärkeimmät tekniset tiedot esitettynä. $1 \text{ g.cm} = 9.80665 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}$ (Raboesch 2019).

Nominal volt / Nominale volt / Nennspannung / Tension nominale	12 V - DC
Operating voltage / Voltage / Betriebsspannung / Tension de fonctionnement	6-15 V - DC
Shaft diameter / As diameter / Shaft Durchmesser / Diamètre de l'arbre	Ø 2,3 mm
Free shaft length / As lengte / Schaftlänge / Longueur de l'arbre	13 mm
Weight / Gewicht / Gewicht / Poids	72 g
AT NO LOAD	
Speed / Snelheid / Umdrehung / Vitesse	16500 RPM MAX
Current / Stroom / Strom / Courant	0,56 A
AT MAXIMUM EFFICIENCY	
Efficiency / Rendement / Wirkungsgrad / Rendement	50,5 %
Speed / Snelheid / Umdrehung / Vitesse	8000 RPM
Torque / Koppel / Drehmoment / Torque	104,9 G.CM
Current / Stroom / Strom / Courant	1,3 A
Power / Vermogen / Leistung / Puissance	7,8 WATTS
AT STALL EXTRAPOLATION	
Torque / Koppel / Drehmoment / Torque	210 G.CM
Current / Stroom / Strom / Courant	3,5 A

Näin voidaan todeta, ettei käytölle ole kovin suuria vaatimuksia. Jos valitaan samassa kokoluokassa ja kierrosalueella toimiva vastaava hiiliharjaton moottori, saavutetaan varmasti käytön vaatimukset.

3.3.2 Akunkesto

Edellisessä osiossa todettiin, että aikaisempi sekoittajalaite on sekoittanut maanäytettä 7,8 W mekaanisella teholla riittävästi. Laskennassa käytettiin lähtökohtana laitteelle 10 W kokonaistehoa, sillä modernit moottorit ja elektroniset osat mahdollistavat hyvän, 80-95 % hyötysuhteen (Tyto Robotics Inc. 2023).

Sekoittajalaitetta käytetään n. 30 minuutin osissa. On kuitenkin mahdollista, että päivän aikana sekoitetaan useampi maanäyte. Mitoituksen perustana todettiin, että sekoittajalaitteen tulee pystyä sekoittamaan näytteitä vähintään kolmen tunnin ajan.

Energiantarve lasketaan kaavalla 1

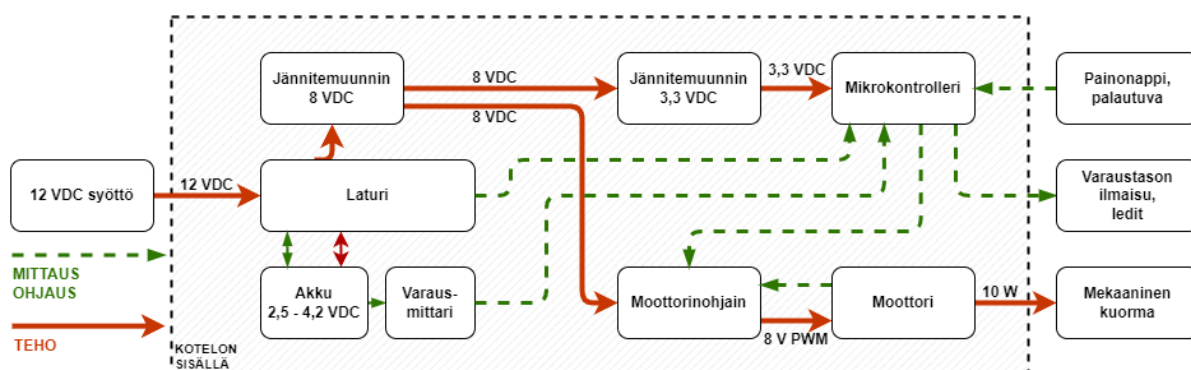
$$\begin{aligned} t_{sekoitusaika} \cdot P_{kokonais} &= E_{akku} \\ \rightarrow 3 \text{ h} \cdot 10 \text{ W} &= 30 \text{ Wh} \end{aligned} \tag{1}$$

Todettiin, että akustolta vaaditaan vähintään 30 Wh energiasisältöä.

4 SUUNNITTELU

4.1 Toimintaselostus ja lohkokaavio

Laitteen toiminnallisuuden esittämistä varten laadittiin lohkokaavio (kuvio 7) ja toimintaselostus.

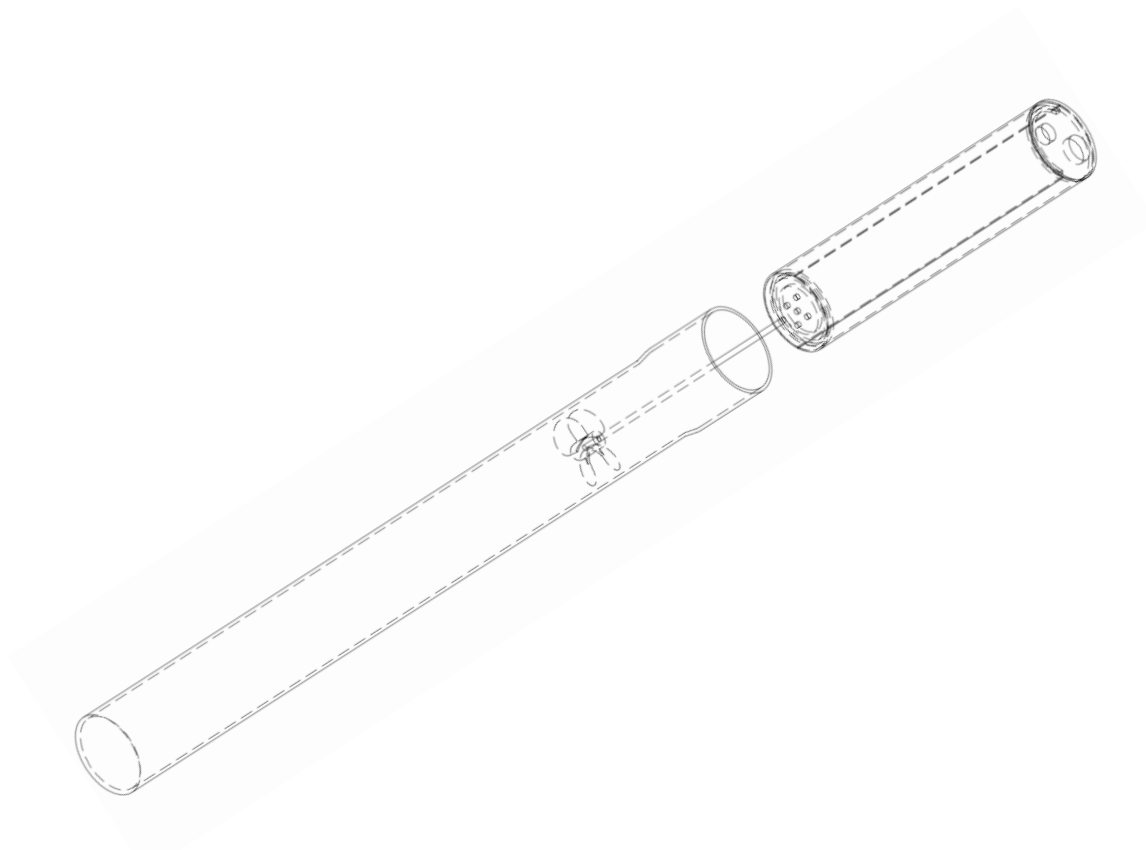


Kuvio 7. Lohkokaavioesitys sekoittajalaitteen toiminnasta.

Sekoittajalaitetta syötetään 12 VDC jännitelähteellä. Jännitelähde syöttää älykästä laturia. Laitetta voidaan käyttää suoraan 12 VDC jännitelähteeltä, akulta, tai molemmilta. Laturi osaa tasapainottaa tehon latauksen ja kuormituksen suhteen, näin käyttösähkö voidaan ottaa myös suoraan laturilta, esimerkiksi silloin kun akku on täynnä. Laturi lataa akkua ja monitoroi akun turvallista käyttöä, lähettämien latausindikaation mikrokontrollerille. Varausmittari mittaa akun tarkan varaustason ja välittää tiedon mikrokontrollerille, joka ilmaisee varaustason käyttäjälle LEDeillä. 8 VDC jännitemuunnin syöttää moottorinohjainta sekä 3,3 VDC jännitemuunninta, jota kautta mikrokontrolleri saa käyttösähkensä. Moottorinohjain saa ohjauksen mikrokontrollerilta PWM-signaalina, sekä HIGH- ja LOW-signaaleina. Moottoriin kytketään mekaaniseksi kuormaksi potkuri, jolla maanäytettä sekoitetaan. Käyttäjä lähettää ohjauskomennot mikrokontrollerille ja mikrokontrollerin kautta moottorinohjaimelle painonappia käyttämällä.

4.2 Mekaniikkasuunnittelu ja kotelointi

Suunnittelu aloitettiin haastattelusta saatujen tietojen perusteella. Vanhojen laitteiden koteloinnin kantikas muoto korvattiin käteen paremmin sopivalla lieriön muodolla. Kotelon ja potkurin suojaputken materiaaliksi valikoitui edullinen polypropeeni. Polypropeeniputkea on helposti saatavilla, sekä materiaalina se on olosuhteita ja käsittelyä kestävä. Sopivan kokoista, halkaisijaltaan 50 mm polypropeeniputkea myydään viemäriputkena. Viemäriputkissa on myös yleensä valmiiksi muhviosa, jolloin potkurin suojaputki saadaan helposti irrotettua pesua varten. Kotelon pyöreät kannet voidaan valmistaa esimerkiksi polypropeeni- tai alumiinilevystä. Käyttöpainike sijoitettiin kotelon yläkanteen, jolloin painiketta voidaan painaa helposti peukalolla. Hahmotelma sekoittajasta on esitetty kuviossa 8.



Kuvio 8. Fusion 360 ohjelmalla tehty 2D-piirros maanäytesekoittajasta.

4.3 Elektroniikkasuunnittelu

4.3.1 Osavalinta

Osavallinnassa haluttiin käyttää tunnettujen valmistajien yleisesti saatavilla olevia osia. Osasaatavuus ja osan elinkaari vaikuttavat laitteen tuotantoon sekä kustannuksiin. Tunnettuja valmistajia ovat mm. Analog Devices, Texas Instruments ja TSMC, joiden mikropiirejä päädyttiin laitteessa käyttämään. Passiivisia komponentteja ja liittimiä ei ole tarkemmin eritelty, tuotannossa ne voidaan valikoida arvojen ja tarpeen mukaan. Lisähuomiota tulee kiinnittää tiettyjen käämien ja kondensaattorien valintaan, sillä näillä on merkitystä moottorin toimintaan, akustiikkaan ja hyötysuhteeseen.

Valitut osat ovat seuraavat:

Mikrokontrolleri ESP32-WROOM-32E

Espressif Systemsin kehittämä ja TSMC:n valmistama mikrokontrolleri (kuvio 9). Edullinen ja laajasti käytetty, tosin enemmän kuluttajapuolen sovellutuksissa. Helposti ohjelmoitavissa, laajasti liitäntöjä ja yhteysmahdollisuuksia.



ESP32-WROOM-32E

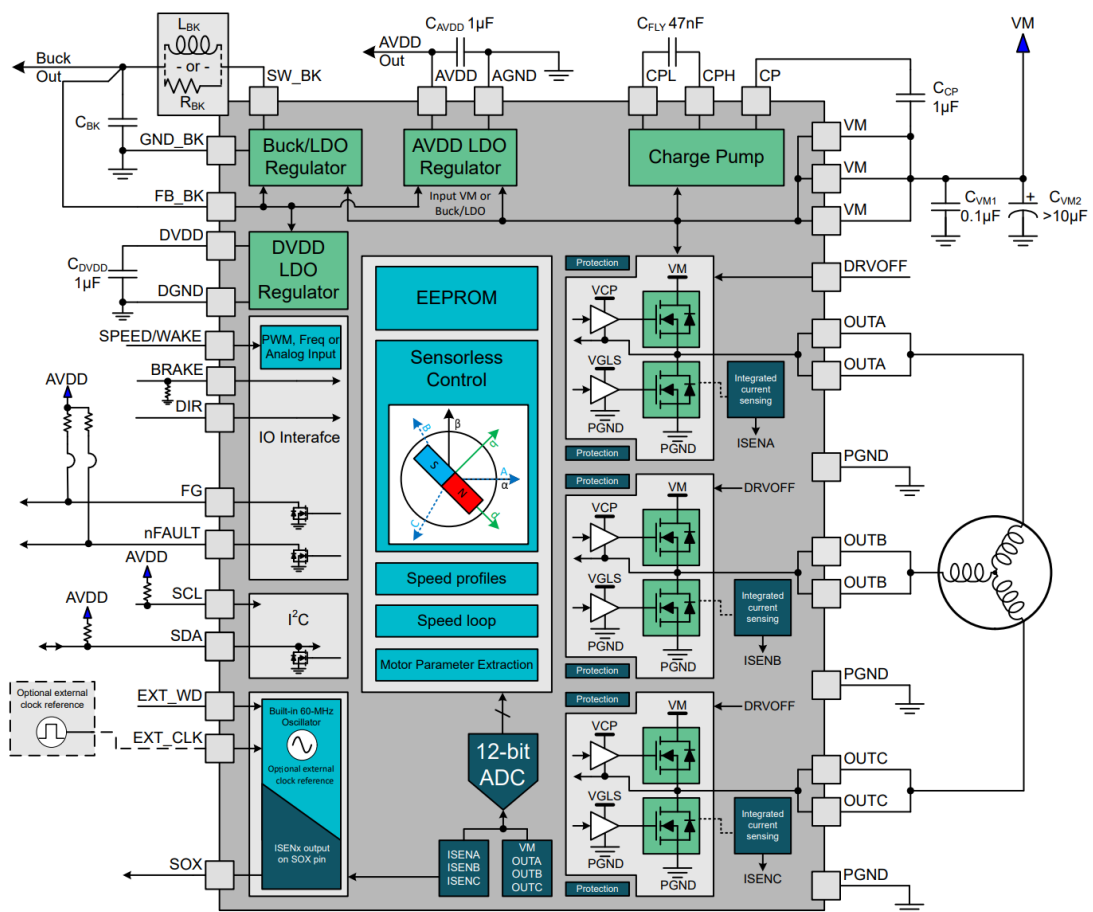


ESP32-WROOM-32UE

Kuvio 9. ESP32-mikrokontrolleripiirit (Espressif Systems 2023).

Moottorinohjain MCF8316A

Texas Instrumentsin valmistama älykäs ohjainpiiri kolmivaiheisen hiiliharjattoman tasavirtamoottorin ohjaukseen. Sisältää valmistajan FOC-algoritmin, lukuisia turvaominaisuuksia, useita ohjausvaihtoehtoja, automaattisen moottorin parametrien tunnistuksen, integroidut mosfet-sillat, hyvän hyötysuhteen sekä erittäin alhaisen lepokulutuksen. Moottoriohjaimen sisältämä toiminnallisuus ja tarvittavat ulkoiset komponentit on esitetty kuviossa 10.

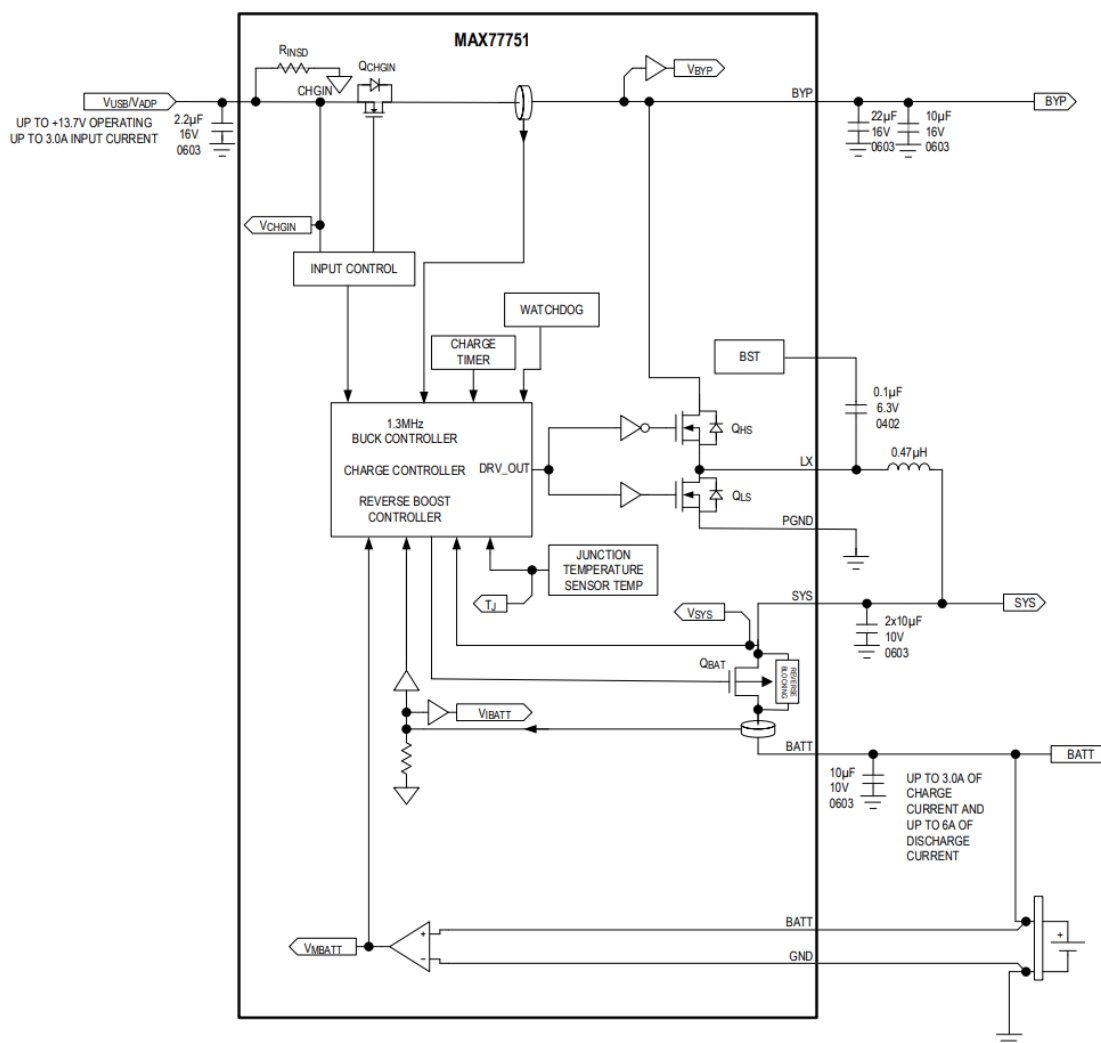


Kuvio 10. Lohkokaavio moottoriohjaimen toiminnallisuuksista ja kytkennöistä (Texas Instruments 2023).

Moottoriohjain toimii jännitealueella 4,5 – 35 V ja kykenee syöttämään moottorille 8 A huippuvirran.

Laturi MAX77751

Analog Devices:n valmistama itsenäisesti toimiva yhden kennon laturipiiri. Sisältää tärkeät turvaominaisuudet litiumakkujen lataukseen, osaa älykkäästi jakaa tehoa laitteelle ja akulle sekä irrottaa akun täysin piiristä tarvittaessa. Toiminnallisuus ja tarvittavat ulkoiset komponentit on esitetty kuviossa 11.

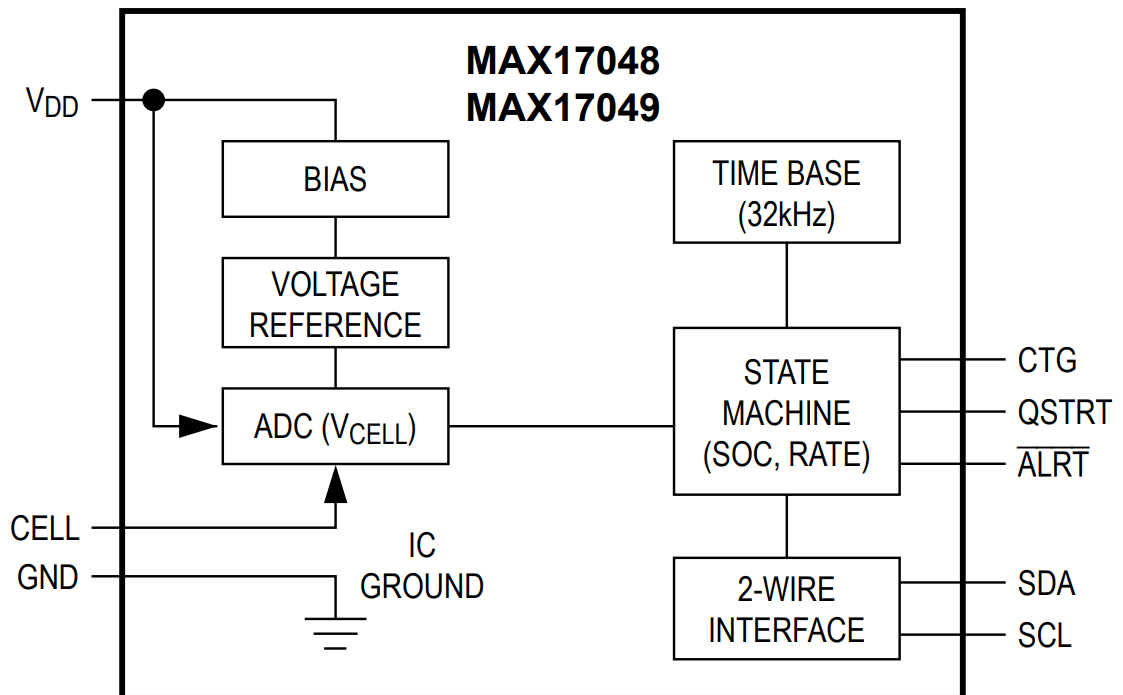


Kuvio 11. Lohkokaavio laturin toiminnallisuuksista ja kytkennöistä (Analog Devices 2020).

Laturi toimii jännitealueella 4,5 V – 13,7 V, ja sen maksimi ulostulovirta on 3,15 A. Yhdelle kennolle sopiva laturipiiri valittiin helpon akkukapasiteetin lisäyksen vuoksi. Keskenään samanlaisia litiumakkuja voidaan kytkeä rinnan tarvittava määrä.

Varausmittari MAX17048G

Älykkään algoritmin sisältävä varausmittari yhdelle litiumakulle, tai useammalle rinnankytketylle akulle. Varausmittari pystyy arvioimaan akun varauksen tarkasti erilaisissa kuormitustilanteissa mittaamalla samalla akun virtoja. Toiminnallisuutta on esitetty kuviossa 12.



Kuvio 12. Lohkokaavio varausmittarin toiminnallisuuksista ja kytkennöistä (Analog Devices 2016).

Varausmittari kommunikoi mikrokontrollerille käyttämällä I2C-väylää. Lohkokaaviokuvassa tätä kutsutaan 2-wire interfaceksi. Ulos näkyvät pinnit ovat SDA ja SCL.

Akku LG Chem INR 21700 M50LT 5000

LG:n valmistama 21 x 70 mm kokoinen lieriön mallinen litiumioniakku (kuva 3).



Kuva 3. Kuvia akkukennosta ilman suojamuoveja (LG Chem 2016).

Taulukosta 2 nähdään valmistajan esittämät oleelliset tekniset tiedot, kuten nimellisjännite 3,63 V, nimelliskapasiteetti 18,20 Wh ja maksimi virranantokyky 7275 mA.

Taulukko 2. Akkuvalmistajan tekniset tiedot akulle (LG Chem 2016).

Item	Condition / Note	Specification
2.1 Energy	Std. charge / discharge	Nominal 18.20Wh Minimum 17.60Wh
2.2 Nominal Voltage	Average	3.63V
2.3 Nominal Shipping SOC		30%
2.4 Standard Charge (Refer to 4.2.1)	Constant current Constant voltage End current(Cut off)	0.3C (1,455mA) 4.2V 50mA
2.5 Max. Charge Voltage		4.20 ± 0.05V
2.6 Max. Charge Current	0 ~ 25℃ 25 ~ 50℃	0.3C (1,455mA) 0.7C (3,395mA)
2.7 Standard Discharge (Refer to 4.2.2)	Constant current End voltage(Cut off)	0.2C (970mA) 2.50V
2.8 Max. Pulse Discharge Power	Pulse Power(10sec), 25℃ ± 2℃	≤ 80W (SOC 80%)
2.9 Max. Discharge Current	-30 ~ -20℃ -20 ~ 5℃ 5 ~ 45℃ 45 ~ 60℃	0.2C(970mA) 0.3C(1,455mA) 1.5C(7,275mA) 1.5C(7,275mA)
2.10 Weight	Without washer	68.0 ± 1.0 g
2.11 Storage Temperature (for shipping state)	1 day 1 month 3 months 1 year	-40℃ -20 ~ 60℃ -20 ~ 45℃ -20 ~ 20℃

Akkuja voidaan kytkeä rinnan akustoksi, jolloin saavutetaan suurempi nimelliskapasiteetti ja virranantokyky. Suunnitellut akkuoptiot laitteelle ovat 1S2P tai 1S3P, näin energiasisältö tuplataan tai triplataan.

Painonappi LB-16A, integroiduilla LEDeillä

Painonapiksi valikoitui Lanboon valmistama painonappi, jossa on sisäänrakennettuna LEDit (kuva 4). Kyseisiä painonappeja käytetään yleisesti Aasiassa, esimerkiksi hisseissä ja muissa sovellutuksissa, joissa vaaditaan käytölle kestävyyttä.



Kuva 4. Laitteessa käytettävä painonappi sisäänrakennetuilla LEDeillä (Lanboon.d).

Valmistaja lupaa painonapille kytkentäkyvyksi 3 A / 250 VAC reaktiivista ja mekaaniseksi kestävyudeksi 500 000 painallusta, sekä IP67-luokituksen. Kytkenäkyvystä ei tässä sovellutuksessa tarvitse välittää, sillä napilla lähetetään vain pienen virran ohjauskomentoja mikrokontrollerille.

Moottori

Moottorivaihtoehtoina käytetään edullisia, hiiliharjattomia moottoreita, joita käytetään yleisesti esimerkiksi drooneissa ja muissa radio-ohjattavissa laitteissa. Yksi moottorivaihtoehto on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Hiiliharjaton tasavirtamoottori, yleinen droonikäytössä (Banggood.com 2024).

Sähköisiä ominaisuuksia ei halvoista moottoreista ole yleensä saatavilla. Myyjä esittää vain suppeasti käyttöjännitealueen, kierrosluvun ja jännitteen suhteesta kertovan KV-arvon, eli nopeusvakion, työntövoiman tietyn kokoisella potkurilla, sekä tässä käyttöpisteessä kuormitusvirran (taulukko 3).

Taulukko 3. Moottorivalmistajan datalehti, tekniset ominaisuudet (Banggood.com 2024).

Model	Voltage	Prop	Load Current (A)	Pull (g)	Power (W)	Efficiency (g/w)
BR2826 1290KV	11.1	9045	13.8	800	153	5.2
		1047	16.6	1065	184	5.8

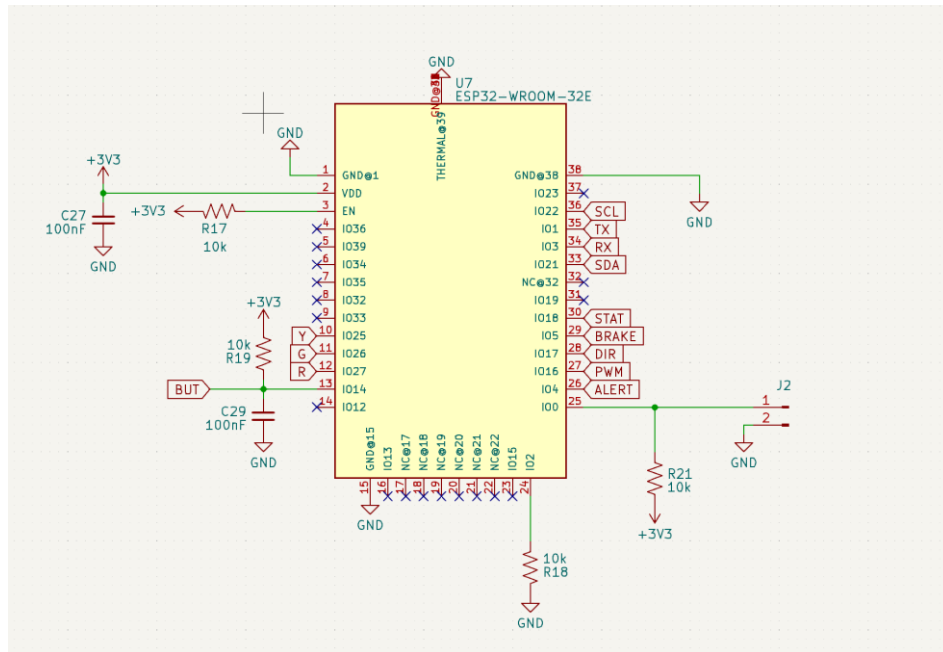
Mekaanisesti on tärkeää huomioida moottorin kiinnitystapa, sekä puoli, josta moottorin akseli tulee moottorista ulos. Moottori kiinnitetään kotelon sisäpuolelle siten, että moottorin akseli työntyy kotelon laipasta ulos.

4.3.2 Piirisuunnittelu

Piirisuunnittelun kaaviokuvat on piirretty ilmaisella, avoimen lähdekoodin KiCad-ohjelmistolla. Esimerkilliset kytkennät esitetään seuraavilla kuvilla.

Mikrokontrolleri

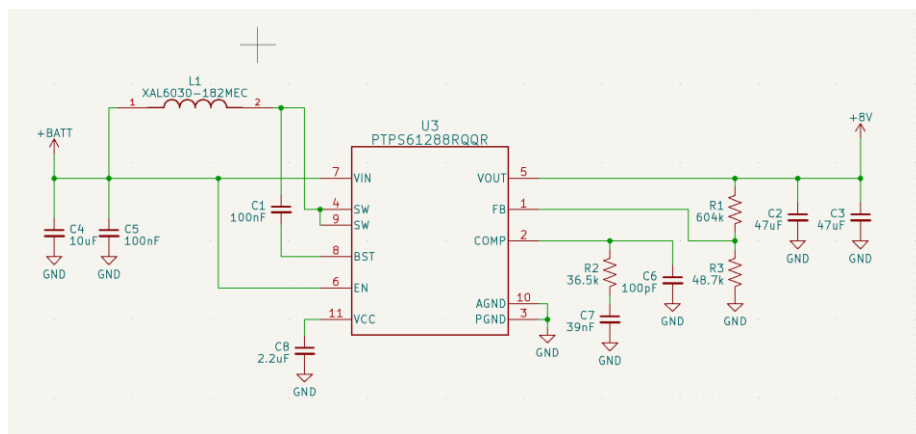
Mikrokontrollerin syöttö, painonapin kytkentä ja käytetyt ohjauspinnit on esitetty kuvioissa 13.



Kuvio 13. Esimerkillinen kytkentäkaavio mikrokontrollerille.

8 VDC jännitemuunnin

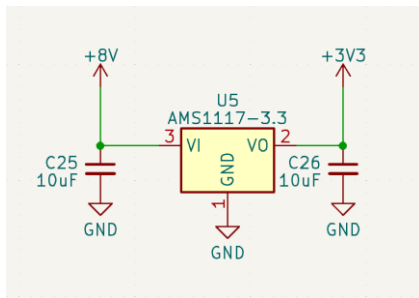
8 VDC jännitemuunnin saa syötön akuston vaihtelevalla jännitteeltä ja vakioi sen 8 volttiin, joka jaetaan muulle järjestelmälle. Kytkentä esitetty kuviossa 14.



Kuvio 14. Esimerkillinen kytkentäkaavio 8 VDC jännitemuuntimelle.

Jännitemuunnin mikrokontrollerille

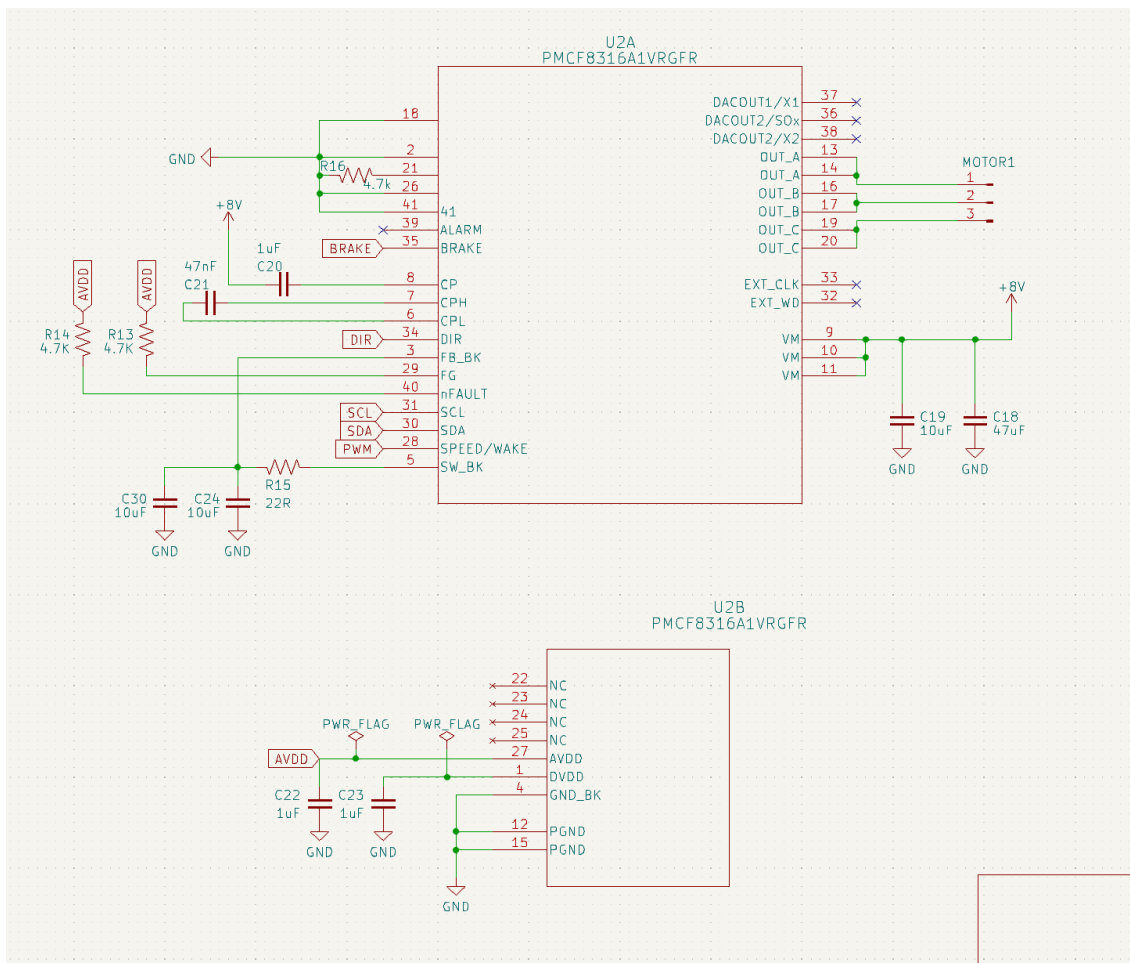
Mikrokontrolleria varten 8 VDC jännite on alennettava 3,3 volttiin. KytKentä esitetty kuviossa 15.



Kuvio 15. Esimerkillinen kytkentäkaavio 3,3 VDC jännitemuuntimelle.

Moottoriohjain

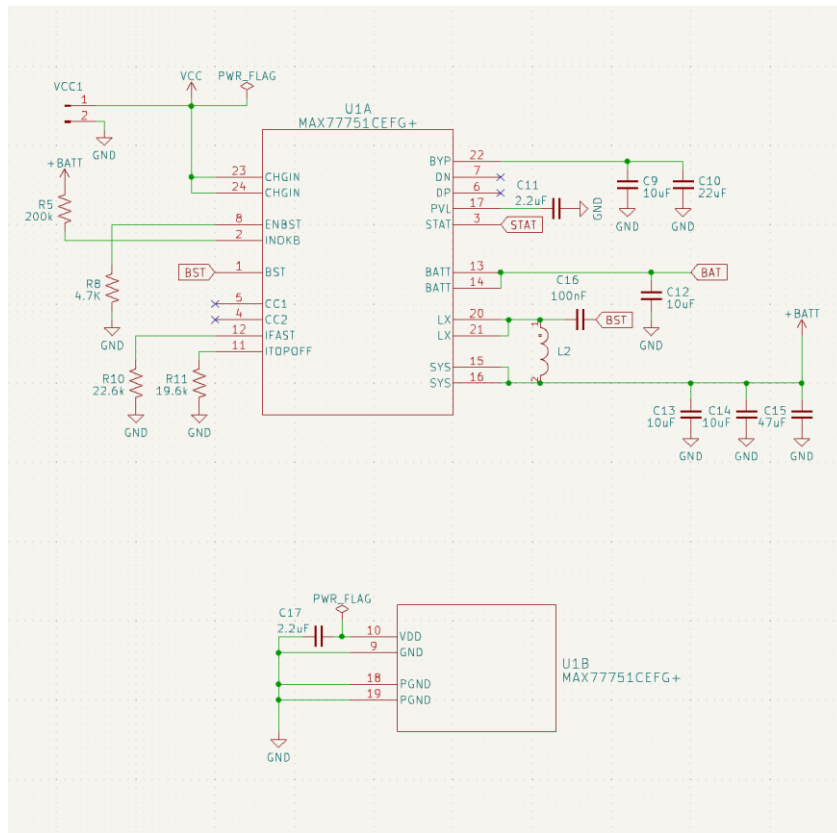
Moottoriohjain saa syötön 8 VDC jännitemuuntimelta. Moottoriohjainpiirin ohjauskytkennät, ohjelmointipinnit sekä moottorin kytkentä on esitetty kuviossa 16.



Kuvio 16. Esimerkillinen kytkentäkaavio moottoriohjaimelle.

Laturi

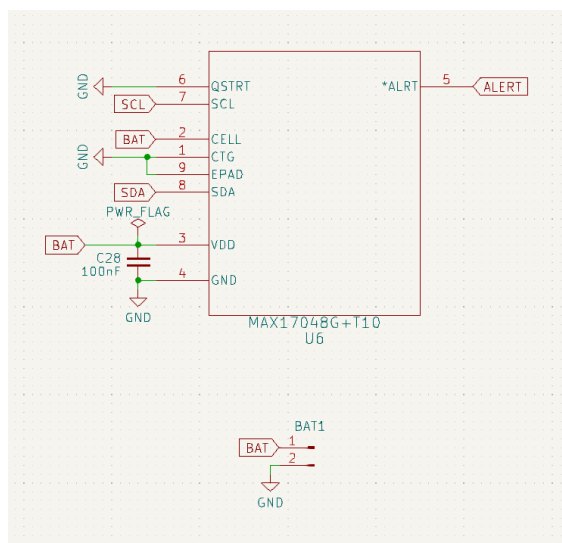
Laturi saa syötön laitteeseen kytkettävältä jännitelähteeltä. Laturiin kytketään akusto, sekä lähtö 8 VDC jännitemuuntimelle. Kytkentä esitetty kuviossa 17.



Kuvio 17. Esimerkillinen kytkentäkaavio laturin kytkennälle.

Varausmittari

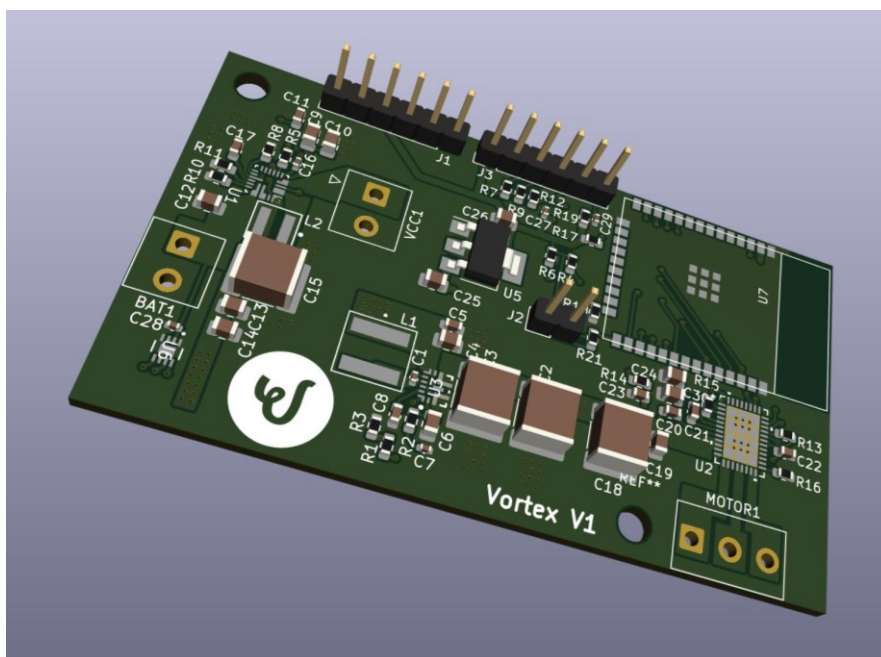
Varausmittari kytketään akustoon, sekä tiedonvälitystä varten pinnit mikrokontrollerille. Kytkentä esitetty kuviossa 18.



Kuvio 18. Esimerkillinen kytkentäkaavio varausmittarille.

4.3.3 Piirilevysuunnittelu

Piirilevysuunnittelussa noudatettiin valmistajien datalehtien ohjenuoria komponenttien sijoituksien ja reititysten suhteen. Piirilevystä pyrittiin tekemään mahdollisimman kompakti. Kuvassa 19 on esitetty 3D-mallinnus valmiista piirilevystä.



Kuvio 19. 3D-mallinnus suunnitellusta piirilevystä.

Myös kustannustehokkuuteen panostettiin, piirilevystä suunniteltiin kaksikerroksinen ja yksipuoleinen. Näin piirilevyn valmistusprosessi yksinkertaistuu. Piirilevylle suunniteltiin liitinpinnit helpottamaan ulkoisten osien liitántää ja ohjelmointia. Akku, jännitesyötön liitin ja moottori tulee juottaa kiinni.

4.4 Ohjelmisto ja parametointi

Ohjelmointi

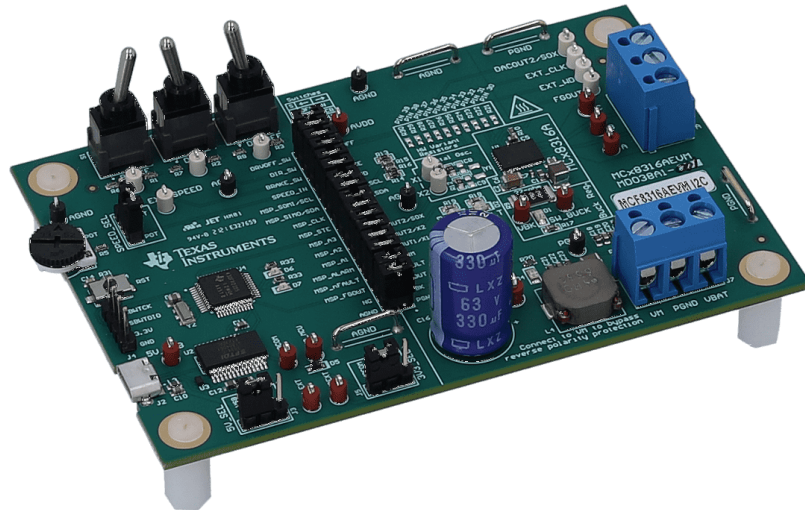
Mikrokontrollerin ohjelmointi voidaan toteuttaa esimerkiksi avoimen lähdekoodin Arduino IDE -ohjelmointiympäristössä, jolla ohjelma voidaan myös ladata suoraan mikrokontrollerille.

Mikrokontrolleriin ohjelmoidaan seuraavat ominaisuudet:

- Painonapin toiminnallisuus
 - Lyhyt painallus → näytä akun varaustila
 - Pitkä painallus → käynnistä tai pysäytä moottori
 - Lyhyt + pitkä painallus → lisää moottorin nopeutta
 - Lyhyt + lyhyt + pitkä painallus → hidasta moottorin nopeutta
 - 5 lyhyttä painallusta → muuta moottorin pyörimissuunta
- LEDien toiminnallisuus
 - Punainen ja vihreä yhdistelmä-LED → säädä väri portaattomasti akun varaustasosta riippuen
 - 0-10 % punainen
 - 10-90 % oranssin sävyt
 - 90-100 % vihreä
 - Kun ulkoinen jännitelähde on kytketty latausta varten → välkytä LEDejä, väri akun varaustasosta riippuen
 - Kun lataus valmis → lopeta välkytys ja näytä vihreä LED
 - Akun tyhjentyessä alarajalle → välkytä punaista LEDiä kolmesti, kun moottoria yritetään käynnistää
 - Muu vika → Välkytä punaista LEDiä viidesti
- Moottorin ohjaus
 - Moottorin parametrit ohjelmoidaan ensin mikrokontrolleriin, josta ne ladataan moottoriohjaimelle käyttämällä I2C-protokollaa
 - Moottorin nopeuden säätö PWM-signaalilla
 - Moottorin kiihtyvyys ja hidastuvuus
- Lepotila ja virransäästö, kun laitetta ei käytetä

Moottoriohjaimen parametrit

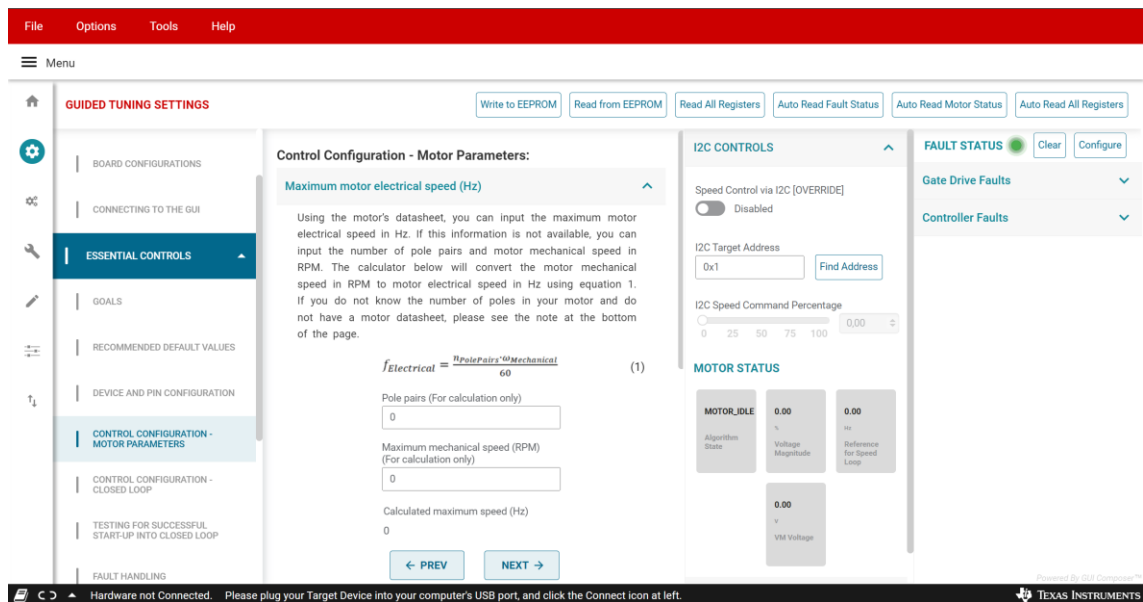
Moottoriohjaimen parametrien hakemista varten voidaan hankkia moottoriohjaimen valmistajan, Texas Instrumentsin evaluaatiopiirilevy MCF8316AEVM (kuva 6).



Kuva 6. Texas Instrumentsin evaluaatiopiirilevy MCF8316AEVM moottorin parametroinnin helpottamiseksi (Texas Instruments 2024).

Evaluaatiopiirilevy sisältää suunnittelussa käytetyn moottoriohjaimen, sekä integroidun mikrokontrollerin, joka mahdollistaa moottoriohjaimen yhdistämisen tietokoneeseen USB-liitännällä. Piirilevyllä on valmiiksi ruuviliitännät moottorille ja jännitelähteelle, kytkimet moottorin käynnistämiseen ja suunnanvaihtoon, sekä potentiometri pyörimisnopeuden säätöön.

Valmistaja tarjoaa myös ohjelmiston ja käyttöliittymän (kuvio 20), jolla moottorinohjaimen parametreja voidaan muuttaa moottorille ja käytölle sopivaksi. Ohjelmisto tarjoaa opastetun käyttöönoton ja parametrien muuttamisen moottoriohjaimelle, jonka avulla moottorin toimintaa ja käyttäytymistä voidaan säätää. Myös moottorin ja ohjaimen käyttäytymistä voidaan seurata reaaliajassa. Alkuun ohjelmalle syötetään moottorista tiedetyt tiedot, kuten napaluku ja maksimi kierrosnopeus. Tämän jälkeen moottoriohjain suorittaa MPET-toiminnon, jolla mitataan moottorin sähköiset arvot, kuten induktanssi L, resistanssi R sekä moottorin tuottaman vastasähkömotorisen voiman vakio B_{emf} .



Kuvio 20. Kuvakaappaus Texas Instrumentsin ohjelmasta moottoriohjaimen ja moottorin parametointiin.

Moottorin toiminnallisuutta voidaan hienosäätää, kuten

- Kierrosnopeus, nopeuden ylä- ja alarajat
- Virta- ja jänniterajat
- Käynnistyskiihtyvyys ja pysäytyksen hidastuvuus
- Toiminta vikatilanteissa
- Open loop / closed loop-toiminta
- Akustinen käyttäytyminen
- EMI:n määrä

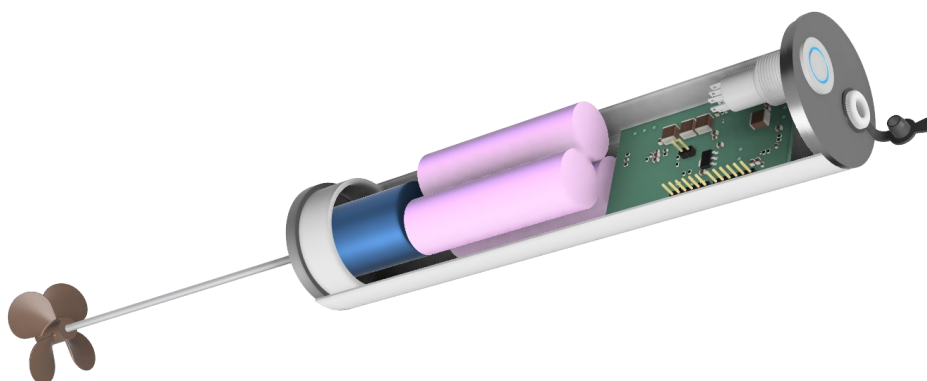
Mikrokontrolleri tallentaa muutetut parametrit moottoriohjaimen rekisteriin.

5 SEURAAVAT VAIHEET

5.1 Prototyyppi

Seuraava vaihe työssä on prototyypin valmistus. Sekoittajalaite on suunniteltu siten, että piirilevyn voi tilata valmiiksi ladottuna. Laitteen muu kokoonpano ja ohjelmiston asennus suoritetaan kokoonpanijan toimesta. Laitekokonaisuuteen (kuvio 21) kuuluvat seuraavat osat kokoonpanoa varten:

- Piirilevy ladottuna
- Akut
- Moottori
- Akseli ja potkuri
- Painonappi
- Virtaliitin
- Kotelo, polypropeeniputki
- Kotelon kansi- ja pohjaosa, koneistettu alumiini tai polypropeeni



Kuvio 21. Fusion 360 ohjelmalla tehty 3D-mallinnus laitteen kokoonpanosta.

Akut, moottori, painonappi ja virtaliitin kytketään piirilevylle, muodostaen laitteen sähköisen kokoonpanon. Sähköinen kokoonpano asennetaan kotelon sisälle. Suunnittelun seuraavissa revisioissa harkitaan valmiita piirilevyläitä kokoonpanon helpottamiseksi.

5.2 Toiminnallinen testaus ja pilotointi

Toiminnallinen testaus suoritetaan kokoonpanijan toimesta.

Testaus pitää sisällään seuraavat vaiheet:

- Toiminnan testaus
 - o Painonapin toiminnallisuus
 - o LEDit
 - o Näytteen sekoitus → moottorin nopeudet ja suunnanvaihto
- Syöttö, akusto ja laturi
 - o Lataus, aika ja virta
 - o Purku, aika ja virta
- Vikakäyttäytyminen
 - o Ylivirta
 - o Yli- ja alijännite
- Dokumentointi

Prototyyppi toimitetaan asiakkaalle pilottivaihetta varten. Pilottivaiheessa kerätään asiakaskokemuksia, näin selvitetään tarve mahdollisille muutoksille. Asiakkaan hyväksyttyä pilotointi, laitetta voidaan tuottaa sarjavalmistuksena.

6 POHDINTA

Työn tarkoitus oli luoda kokonaisvaltainen suunnitelma sekoittajalaitteen tuottamisesta. Taloudellisuus oli merkittävässä roolissa suunnittelun perusteena, hinta ei saanut nousta liian suureksi loppukäyttäjälle. Suomessa toteutettu suunnittelu ei ole varsinaisesti edullista, joten suunnitteluun käytetty aika täytyy kompensoida myynnin volyymilla. Suunnittelun lopputulos on kuitenkin laite, jollaista ei vielä markkinoilla ole. Tämä antaa positiivista kuvaa myynnin mahdollisuuksille. Suunnittelua toteutettiin myös ajatuksella, että vastaavaa kytkentää voisi hyödyntää myös muille akkukäyttöisille moottorin sisältäville laitteille. Näin jatkossa saadaan vastaavien tuotteiden suunnitteluaikaa lyhennettyä.

Kaiken kaikkiaan suunnittelussa onnistuttiin hyvin. Nykyaikaisten ohjelmistojen avulla suunnittelu on helpottunut, sähköisiä toiminnallisuuksia pystytään simuloimaan ja mekaniikkaa 3D-mallintamaan. Kompromisseja jouduttiin tekemään, esimerkiksi moottorivalinnan suhteen. Tunnettujen valmistajien moottorit ovat kertaluokkaa kalliimpia. Suunnittelussa oli myös haasteita, osavalmioiden valmistajien datalehtien tutkimiseen meni paljon aikaa, sekä ohjelmistokehitys ja siihen liittyvään virheenhakuun täytyy myös varata työtunteja.

Laitteen seuraavien revisioiden osalta mietitään kokoonpanon helpottamista, korvataanko kaikki juotokset liittimillä. Myös ohjelmisto on saatavilla valmiiksi ladattuna mikrokontrollerille piirilevyvalmistajan toimesta, tämänkin kustannustehokkuutta tulee arvioida jatkossa.

LÄHTEET

Analog Devices 2016. MAX17048/MAX17049 3 μ A 1-Cell/2-Cell Fuel Gauge with ModelGauge. Datasheet. Pdf-dokumentti.

<https://www.analog.com/MAX17049/datasheet>

Analog Devices 2020. MAX77751 3.15A USB-C Autonomous Charger for 1-Cell Li+ Batteries. Datasheet. Pdf-dokumentti.

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/MAX77751.pdf>

Banggood 2024. Racerstar BR2826 1290KV 2-4S Brushless Motor for RC Models Airplane. RC Parts. Toys Hobbies and Robot.

<https://www.banggood.com/Racerstar-BR2826-1290KV-2-4S-Brushless-Motor-For-RC-Models-Airplane-p-1114330.html>

Espressif Systems 2023. ESP32WROOM32E. Datasheet. Pdf-dokumentti.

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf

Hein, M. 2020. Demystifying BLDC motor commutation: Trap, Sine, & FOC. Powerpoint-esitys. TI TECH DAYS-seminaari. Webinaari.

Lanboo n.d. 16mm 3A Push-button Switch. Push button switch. Product.

<https://www.lanbooswitch.com/push-button-switch/16mm-push-button-switch/16mm-3a-push-button-switch.html>

LG Chem 2016. Rechargeable Lithium-Ion Battery Model: INR21700 M50 18.20Wh. PRODUCT SPECIFICATION. Pdf-dokumentti.

<https://www.dnkpowers.com/wp-content/uploads/2019/02/LG-INR21700-M50-Datasheet.pdf>

Motiva 2024. Sähkömoottorityypit. Verkkojulkaisu.
[https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava liikenne ja liikkuminen/valitse auto viis aasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot/sahkomoottorityypit](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viiis_aasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot/sahkomoottorityypit)

Plettenberg motors 2024. Inrunner BLDC Motors for UAV Applications. Verkkojulkaisu. Unmanned systems technology.
<https://www.unmannedsystemstechnology.com/feature/inrunner-bldc-motors-for-uav-applications/>

Raboesch n.d. Blue RM-430 Brushed Motor 12 Volt. Electric Brushed Motors.
<https://raboeschmodels.com/product/blue-rm-430-brushed-motor/>

Raboesch 2019. Electric Brushed Motor Blue RM 430. Technical information. Pdf-dokumentti.
https://raboeschmodels.com/wp-content/uploads/2019/06/handleiding_109-43-.pdf

Texas Instruments 2023. MCF8316A Sensorless Field Oriented Control (FOC) Integrated FET BLDC Driver. Datasheet. Pdf-dokumentti.
<https://www.ti.com/lit/gpn/mcf8316a>

Texas Instruments 2024. MCF8316AEVM. Design & development.
<https://www.ti.com/tool/MCF8316AEVM>

The MathWorks, Inc. 2024. Introduction to Brushless DC Motor Control. Six-Step Commutation E-kirja. Osa 4.
<https://se.mathworks.com/campaigns/offers/next/introduction-to-brushless-dc-motor-control.html>

Tyto Robotics Inc. 2023. AC vs DC vs BLDC Motor Efficiency Comparison. Verkkojulkaisu.
<https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/ac-vs-dc-motor-efficiency>