



LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Lahti University of Applied Sciences

SÄHKÖMAGNEETTINEN KIIHDYTIN

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietokone-elektronikka
Opinnäytetyö
Kevät 2014
Jani Pietikäinen

Lahden ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma

PIETIKÄINEN, JANI:

Sähkömagneettinen kiihdytin

Tietokone-elektronikan opinnäytetyö, 45 sivua, 10 liitesivua

Kevät 2014

TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä käsitellään sähkömagneettisen kiihdyttimen suunnittelua ja rakentamista sekä siihen liittyvien fysikaalisten ilmiöiden ja elektronisten periaatteiden tutkimista ja dokumentoimista. Tässä työssä sähkömagneettinen kiihdytin tarkoittaa laitetta, joka sähkömagneettista vuorovaikutusta hyväksi käyttäen saa aikaan kiihtyvyyden ammuksena toimivaan metallikappaleeseen.

Työn tekeminen aloitettiin tutustumalla laitteen toiminnan kannalta välttämättömiin fysikaalisiin ilmiöihin. Laitteen toteutustavat määriteltiin näiden alustavien tietojen pohjalta. Työn käytännön osuudessa laite jaettiin osa-alueisiin jotka suunniteltiin, rakennettiin ja testattiin erikseen. Lopuksi laite kasattiin yhdeksi toimivaksi kokonaisuudeksi. Teoriaosuudessa analysoidaan sähkömagneettisen kiihdyttimen toimintaan liittyviä ilmiöitä sekä tarkastellaan laitteen suorituskykyä.

Laitteen keskeisimpänä osana toimii ilmasydäminen käämi, joka muuntaa osan laitteen tehollähteen tuottamasta sähköenergiasta sähkömagneettiseksi kentäksi. Sähkömagneettinen kenttä saa aikaan liikettä käämin sisään sijoitetulle rautakappaleelle. Käämin lisäksi muita tärkeitä osa-alueita ovat tehollähde, jossa tuotetaan käämin tarvitsemat energiapulssit, sekä ohjauselektronikka, jonka välityksellä laitteen muita osia käytetään.

Työn tuloksena saatu sähkömagneettinen kiihdytin on toimiva ja helppokäyttöinen kokonaisuus, joka toimii neljällä 9 V:n paristolla ja joka laukaisee 4 cm:n mittaisia metallikappaleita ulos laitteesta kohtalaisella nopeudella. Laitteen päätarkoitus on ainoastaan esitellä sähkömagneettista voimaa, joten sen suorituskyky on rajoitettu vaarattomalle tasolle.

Asiasanat: sähkömagnetismi, tehoelektronikka, mikro-ohjain, sulautettu järjestelmä, prototyyppi

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Information Technology

PIETIKÄINEN, JANI:

Electromagnetic accelerator

Bachelor's Thesis in Computer Electronics, 45 pages, 10 pages of appendices

Spring 2014

ABSTRACT

This Bachelor's thesis deals with the designing and building of an electromagnetic accelerator, as well as researching and documenting the related physical phenomena and electronic principles. In the thesis, electromagnetic accelerator refers to a device that, while utilizing electromagnetic interaction, causes acceleration to a piece of metal acting as a projectile.

The work began by studying the physical phenomena that are essential for the functioning of the device. This preliminary information was used to determine the execution of the device. In the practical part of the thesis, the device was divided into sections, which then were designed, built and tested separately. Eventually the device was put together. In the theoretical part the phenomena around the operation of the electromagnetic accelerator are analyzed and the performance of the device is examined.

The most essential part of the device is an air-core coil, which transforms a portion of the electronic energy produced by the device's power supply into an electromagnetic field. The electromagnetic field moves a piece of iron placed inside the coil. Apart from the coil, the other important sections are the power supply unit where the energy pulses used by the coil are produced, and the control electronics unit, which is used to operate the other sections of the device.

The result of this thesis is a functioning, easily operated electromagnetic accelerator powered by four 9-volt batteries. It is capable of launching 4 cm long projectiles out of the device with a moderate velocity. The main purpose of the device is merely to demonstrate the electromagnetic force, and for that reason, its performance has been limited to a safe level.

Key words: electromagnetism, power electronics, microcontroller, embedded system, prototype

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	SÄHKÖMAGNEETTISEN KIIHDYTTIMEN PERUSTEET	2
2.1	Magnetismi	2
2.2	Sähkömagneetit	4
2.3	Laitteen toimintaperiaate	6
2.3.1	Laitteen toiminnalliset lohkot	7
2.3.2	Rajoitukset ja tavoitteet	8
3	TYÖN ELEKTRONINEN OSUUS	10
3.1	Jännitelähde	11
3.1.1	Ohjauselektroniiikan käyttöjännitteen tuottaminen	12
3.1.2	Boost-hakkuriteholähteen ohjauskomponentit	13
3.1.3	Laukaisujännitteen tuottaminen	15
3.2	Laukaisupiiri	20
3.2.1	Laukaisukäämi ja -kondensaattori	21
3.2.2	Laukaisukondensaattorin lataaminen	24
3.2.3	Laukaisupiirin muut komponentit	27
3.3	Ohjauselektronikka	28
3.3.1	Mikro-ohjain	29
3.3.2	Ohjauselektroniikkalohkon kytkennät	30
4	TYÖN OHJELMALLINEN OSUUS	32
4.1	Tilakone	32
4.2	Ohjauselektroniiikan ohjelmakoodin toiminta	33
5	PROJEKTIN ONNISTUMINEN JA ARVIOINTI	37
5.1	Projektin aikana ilmenneet haasteet	37
5.2	Sähkömagneettisen kiihdyttimen suorituskyky	39
5.3	Arvio laukaisukäämin magneettivuon tiheydestä	41
5.4	Jatkokehitysmahdollisuudet	43
6	YHTEENVETO	45
	LÄHTEET	46
	LIITTEET	49

1 JOHDANTO

Sähkömagneettinen vuorovaikutus on yksi luonnon perusvuorovaikutuksista. Jos sitä ei olisi, koko maailmankaikkeus olisi mahdoton sellaisena, kuin me sen nykyään näemme. Sähkömagneettinen vuorovaikutus saa aikaan niin sähköiset kuin magneettisetkin fysiikan ilmiöt, ja tässä opinnäytetyössä tutustutaan niistä molempiin.

Työssä perehdytään erääseen sähkömagneettisen vuorovaikutuksen helpoiten havaittavimmista ilmiöistä, eli magneettiseen vetovoimaan kahden magneetin välillä. Tämä vetovoima on avainasemassa esimerkiksi sähkömoottoreissa, joissa sähköenergiaa muutetaan liike-energiaksi napaisuuttaan vaihtavan sähkömagneettisen kentän avulla. Sähkömoottoreista poiketen tämän työn päämääränä on saada aikaan laite, joka tuottaa liike-energiaa hyvin nopeissa pulsseissa siten, että laite pystyy laukaisemaan ammuksia ulos laitteesta huomattavalla nopeudella. Tällöin magneettisen vetovoiman ilmiö tulee esiin erittäin selkeällä ja helposti havaittavalla tavalla.

Tämän opinnäytetyön idea on saanut alkunsa työn tekijän omista pitkäaikaisista mielenkiinnon kohteista sekä halusta tehdä opinnäytetyö, joka on samalla sekä toiminnallinen että tutkimuksellinen. Työn tarkoituksena on elektroniikkaa ja sähköoppia hyväksi käyttäen havainnollistaa yhtä luonnon perusvoimista.

Työn fyysisenä osuutena aikaansaattava laite on kannettava kokonaisuus, joka tuottaa lyhytkestoisia, mutta korkeatehoisia sähköpulseja. Laitteen käämi muuntaa pulsseista saatavaa energiaa liikkeeksi. Laitteen nopean ja tarkan toiminnan ajoituksesta huolehtii mikro-ohjaimella toteutettu ohjauslohko.

2 SÄHKÖMAGNEETTISEN KIIHDYTTIMEN PERUSTEET

Sähkömagneettinen kiihdytin on työn tekijän itsensä käyttämä työnimi laitteesta, joka kiihdyttää metalliesineitä haluttuun suuntaan sähkömagneettisen vetovoiman avulla. Metallikappaleen kiihdyttämiseen tarvittava energia siirtyy metalliin ilman liikkuvia osia. Kiihdytettävänä oleva kappale voi olla mikä tahansa ferromagneettisesta aineesta tehty esine, esimerkiksi rautanaula, joka mahtuu laitteen käämin sisään. Sähkömagneettisen kiihdyttimen suurimpana eroavaisuutena sähkömoottoriin nähden on sen kyky tuottaa suora kiihtyvyyttä ulkoiseen kappaleeseen sähkömoottorin tuottaessa pyörivää liikettä omaan roottoriinsa.

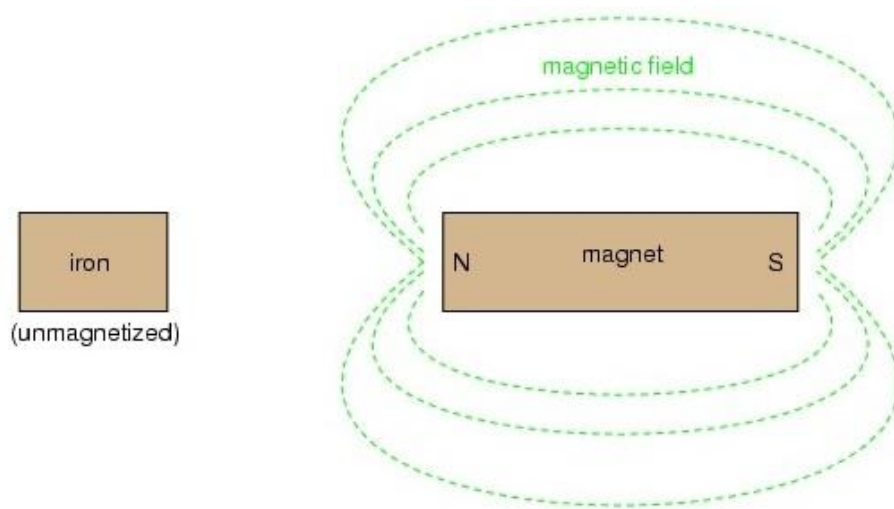
2.1 Magnetismi

Pohjimmiltaan kaikki magnetismi saa alkunsa liikkuvista sähkövarauksista. Jokapäiväisessä elämässä helpoiten havaittavat magneettiset ilmiöt ovat kuitenkin usein kestopagneettien aikaansaamia, eikä sähkönsä läsnäoloa näissä tapauksissa välttämättä pysty havaitsemaan. Kestomagneetit muodostuvat ferromagneettisista aineista, joiden magneettiset momentit ovat ryhmittyneet yhdensuuntaisesti. Magneettiset momentit, tai domainit, ovat alueita, joissa aineen elektronien pyörimisliike on samansuuntaista. Tämä on verrannollista sähkövarauksen liikkumiseen, ja siksi nämä alueet luovat ympärilleen magneettikentän. (Allaboutcircuits 2014.)

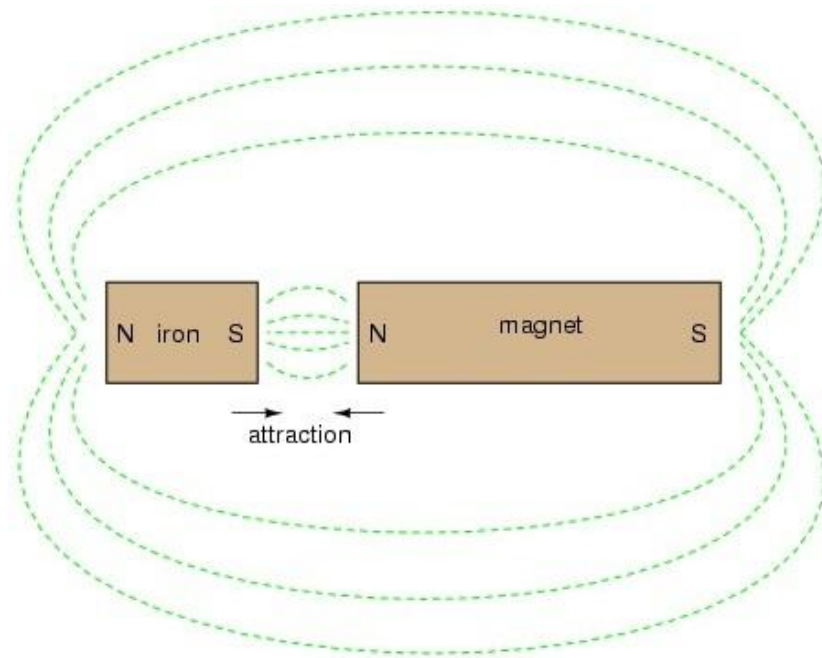
Normaalitilassa ferromagneettisen aineen magneettiset momentit ovat keskenään eri asennoissa, jolloin niiden magneettikentät kumoavat toisensa, mutta kestopagneetin tapauksessa momentit on saatettu yhdensuuntaiseksi. Tällöin kappaleen magneettiset momentit vahvistavat toisiaan ja kappaleen ympärille muodostuu yhdensuuntainen magneettikenttä, joka ei ole riippuvainen ulkoisista kentistä. Tämä saadaan aikaan riittävän voimakkaalla ulkoisella magneettikentällä, joka kääntää magneettiset momentit kentän suuntaiseksi. Tätä heikompi ulkoinen magneettikenttä magnetisoi ferromagneettisen kappaleen vain siksi aikaa, kun ulkoinen magneettikenttä on läsnä. Ferromagneettisia aineita ovat rauta, nikkeli ja koboltti sekä eräät maametallimineraalit. (Hyperphysics 2014.)

Magneettikentillä on kaksi napaa: pohjois- ja etelänapa. Kaksi magneettikenttää pyrkii asettumaan siten, että niiden vastakkaiset navat ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Magneettinen vetovoima perustuu tähän ilmiöön. Samoin magneetti vetää puoleensa myös ei-magnetisoituja ferromagneettisia kappaleita, sillä ulkoinen magneettikenttä ensin magnetisoi kappaleen, minkä jälkeen näiden kahden magneetin välille muodostuu keskinäinen vetovoima. (Allaboutcircuits 2014.)

Yllä esitetty ilmiö on sähkömagneettisen kiihdyttimen toiminnan kannalta tärkein fysikaalinen tekijä. Sitä on havainnollistettu kuvioissa 1 ja 2.



KUVIO 1. Magneetti sekä ei-magneettinen rautakappale kaukana toisistaan (Allaboutcircuits 2014)



KUVIO 2. Magneetti sekä aikaisemmin ei-magneettinen rautakappale lähellä toisiaan (Allaboutcircuits 2014)

2.2 Sähkömagneetit

Sähkömagneetti on komponentti, joka magnetisoituu, kun sen läpi kulkee sähkövirta. Virran kulun loputtua sähkömagneetti menettää magneettiset ominaisuutensa. Sähkömagneetteja käytetään hyvin laajalti erilaisissa sähköisissä sovelluksissa, kuten moottoreissa, generaattoreissa, releissä ja äänentoistojärjestelmissä. Sähkömagneetin monikäyttöisyys perustuu sen säädeltävyyteen; virran kululla voidaan ohjalla sähkömagneetin aikaansaaman magneettikentän voimakkuutta ja ajoitusta. (Wikipedia 2014a.)

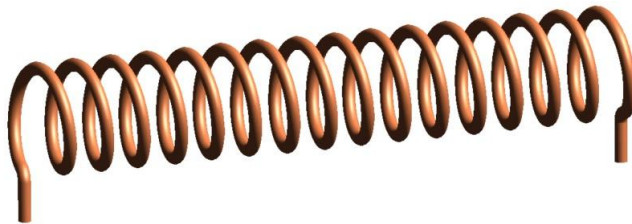
Koska liikkuva sähkövaraus on aina yhteydessä magneettikenttään, on jokainen sähköä johtava kappale periaatteessa sähkömagneetti. Voimakkaamman magneettikentän aikaansaamiseksi johdin on kuitenkin kierrettävä käämiksi. Tällöin eri johdinkierrosten tuottamat magneettikentät yhdistyvät käämin sisällä, ja samalla virralla voidaan tuottaa huomattavasti voimakkaampi magneettikenttä. (Wikipedia 2014a.)

Käämin aikaansaaman magneettikentän voimakkuutta voidaan arvioida sen tuottaman magneettivuon tiheyden perusteella. Magneettivuon tiheyden

laskemiseksi on useita erilaisia kaavoja, joista solenoidin magneettivuon kaava (kaava 1) sopii parhaiten tämän sovelluksen yhteydessä käytettäväksi. Kaavassa B on magneettivuon tiheys, N johtimen kierrosten lukumäärä ja I johtimessa kulkeva virta. (Wikipedia 2014d.)

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{L} \quad (1)$$

Solenoidi on käämi joka on käämitty suoran, sylinterimäisen ytimen ympärille (kuvio 3). Kaavan 1 jakaja L on käämin pituus. (Wikipedia 2014d.)



KUVIO 3. Ilmasydäminen solenoidi (Wikipedia 2014d)

Kaavassa 1 oleva $\mu_0 \mu_r$ on solenoidia ympäröivän aineen permeabiliteetti, eli sen kyky ylläpitää magneettikenttää (Wikipedia 2014b). Tämä arvo koostuu tyhjiön permeabiliteetista μ_0 , joka on luonnonvakio, sekä ympäröivän aineen suhteellisesta permeabiliteetista μ_r . Useimmiten erityisesti solenoidin ydinaineen permeabiliteetilla on suuri merkitys, koska ytimessä magneettivuon tiheimmillään. Koska suhteellinen permeabiliteetti on suoraan verrannollinen solenoidin tuottaman magneettivuon tiheyden suuruuteen, on ydinaineen valinnalla suuri merkitys solenoidin tuottaman magneettikentän ominaisuuksiin. (Wikipedia 2014d.)

Tyhjiön permeabiliteetin μ_0 arvo on $4\pi * 10^{-7}$ H/m. Ilman suhteellinen permeabiliteetti on hyvin lähelle 1, joten ilmasydämisen solenoidin hyötysuhde on pieni. Ferromagneettisilla aineilla suhteellinen permeabiliteetti voi olla kymmeniä tuhansia kertoja suurempi, minkä vuoksi useimpien sovelluksien sähkömagneeteissa käytetään ferromagneettisista aineista tehtyjä ytimiä. (Wikipedia 2014b.)

2.3 Laitteen toimintaperiaate

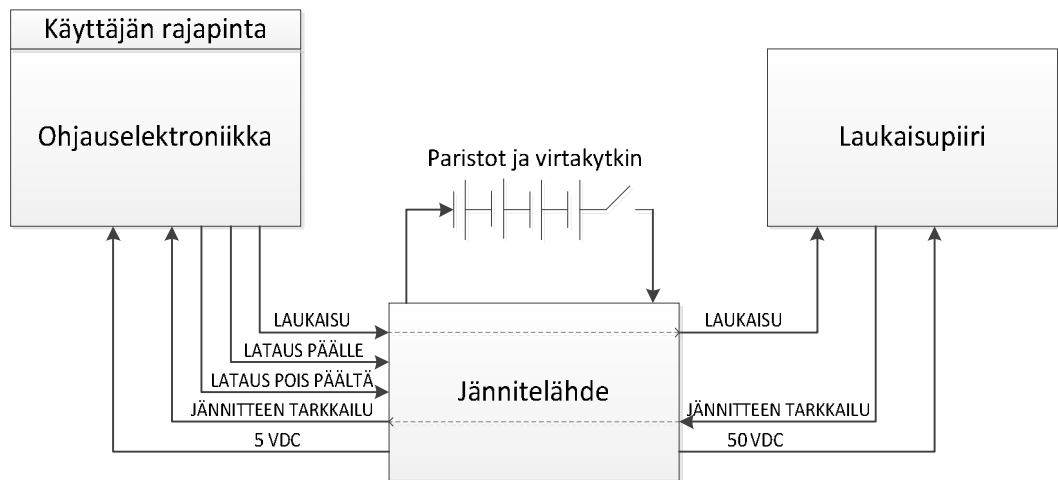
Sähkömagneettisen kiihdyttimen toiminta perustuu sähkömagneetin aikaansaamaan magneettikenttään varastoituvaan energiaan. Tätä energiaa käytetään lähelle sähkömagneettia asetetun ferromagneettisen ammuksen magnetisoimiseksi ja sen jälkeen kiihdyttämiseksi kohti sähkömagneettia. Sellaisenaan tämä ilmiö kuitenkin vain vetäisi ammuksen kiinni sähkömagneettiin, jolloin sen liike pysähtyisi. Sähkömagneettisen kiihdyttimen ideana on saada ammus jatkamaan matkaa poispäin laitteesta saavuttamansa liike-energian avulla. Tämän saavuttamiseksi on laitteen suunnittelussa otettava huomioon kaksi tärkeää näkökohtaa.

Ensiksi laite on suunniteltava siten, että ammuksella on suora ja esteetön linja, jota pitkin se ensin kiihtyy ja sen jälkeen jatkaa matkaansa ilman, että se osuu mihinkään kiinteään ja näin ollen menettää liike-energiansa. Sähkömagneetin geometrian kannalta ainoa käyttökelpoiselta vaikuttava ratkaisu on ilmasydäminen solenoidi (kuvio 3), jonka ytimen läpi ammus kulkee pituussuunnassa. Edellisen kappaleen johtopäätösten perusteella tämä aiheuttaa haasteita laitteen toiminnalle, sillä ilmasydämisen solenoidin permeabiliteetti on heikko ja voimakkaan magneettikentän luominen sen ympärille on vaikeaa.

Toinen näkökohta on magneettikentän katkaisu juuri oikeaan aikaan. Kun virta kytketään kulkemaan solenoidin läpi, sen ympärille ja erityisesti sen ytimeen syntyy magneettikenttä, joka alkaa vetää ammusta kohti solenoidin ydintä. Tästä seuraa se, että ammuksen saavuttaessa solenoidin ytimen keskikohdan magneettikenttä alkaakin vetää ammusta toiseen suuntaan – jälleen ytimen keskikohtaa kohti – kuluttaen nopeasti ammuksen aiemmin tuotetun liike-energian. Mikäli siis halutaan että ammus jatkaa liikettään solenoidin ytimen jälkeen, on magneettikenttä saatava häviämään juuri silloin, kun ammus on ytimen keskikohdassa.

2.3.1 Laitteen toiminnalliset lohkot

Sähkömagneettisen kiihdyttimen rakenne voidaan jakaa kolmeen päälohkoon, joista jokainen koostuu omasta erillisestä piirilevystä sekä oheiskomponenteista (kuvio 4). Lohkot kytketään toisiinsa kaapeleilla, jotka mahdollistavat lohkojen välisen kommunikoinnin. Osiin jaottelun päätarkoituksena on laitteen toiminnan yksinkertaistaminen, mutta erilliset piirilevyt tarjoavat myös paremmat mahdollisuudet laitteen jatkokehittämiselle sekä laitteen mekaanisen toteutuksen ja koteloinnin muuntelemiselle.



KUVIO 4. Sähkömagneettisen kiihdyttimen päälohkot ja niiden väliset kytkennät

Yhtenä kokonaisuutena laite on suunniteltu mahdollisimman helppokäyttöiseksi, eikä käyttäjän tarvitse huolehtia muusta kuin laitteen virransaannista ja laukaisusta. Laite ottaa virtansa neljästä 9 V:n paristosta, ja laukaisu tapahtuu painokytkimellä. Laitteessa on turvallisuussyistä päävirtakytkin, mutta varsinaisen jännitelähteen käytöstä huolehtii ohjauselektronikka.

Ohjauselektronikkalohko sisältää mikro-ohjaimen, joka käynnistyy heti, kun laitteeseen kytketään virta. Mikro-ohjain tarkkailee laukaisupiirin jännitetasoa ja säätelee jännitelähteen toimintaa keräämiensä jännitenäytteiden perusteella. Ohjauselektronikkalohko sisältää myös käyttäjän ja laitteen välisen rajapinnan, joka pitää sisällään laukaisupainikkeen ja merkkivalot, jotka kertovat laitteen tilasta.

Jännitelähdelohko tuottaa muiden lohkojen tarvitsemat jännitteet, eli ohjauselektronikan tarvitseman 5 V:n käyttöjännitteen, sekä laukaisupiirin käyttämän hieman yli 50 V:n jännitteen, jolla ammuksen kiihdytys toteutetaan. Koska jännitelähdelohko on keskimmäisenä, se myös välittää laukaisu- ja jännitteentarkkailusignaalit ohjauselektronikkalohkon ja laukaisupiirilohkon välillä.

Laukaisupiirilohko on yksinkertaisin kolmesta lohkoista. Se koostuu varsinaisesta laukaisukäämistä sekä laukaisukondensaattorista, jotka yhdessä mahdollistavat laukaisun.

2.3.2 Rajoitukset ja tavoitteet

Sähkömagneettisen kiihdyttimen suunnittelun alkaessa on tarpeen asettaa laitteelle tietyt rajoitukset ja tavoitteet, joiden mukaisesti laite tullaan suunnittelemaan. Turvallisuuden kannalta on tärkeää, että laitteen suorituskyky rajoitetaan riittävän alhaiseksi siten, että käyttäjälle ei koidu vaaraa laitteen käytöstä. Ensimmäisenä lähtökohtana on rajoittaa laitteen jännite pienen jännitealueelle, eli korkeintaan 120 V tasajännitteeseen, jotta käyttäjälle ei koidu haitallisen sähköiskun vaaraa (Tieteentermipankki 2014).

Toinen huomioonotettava asia on ammuksen lähtönopeus. Koska ammuksen liikkeelle saattava voima tulee yksin omaa magneettikentästä, on magneettikentän voimakkuus suoraan verrannollinen ammuksen lähtönopeuteen. Kaavasta 1 voidaan todeta, että käämissä kulkeva virta on suoraan verrannollinen sen tuottaman magneettikentän voimakkuuteen. Käämin virta riippuu laukaisukondensaattorin sille syöttämästä laukaisujännitteestä, joten rajoittamalla laitteen laukaisujännitettä voidaan varmistaa sen turvallisuus.

Sähkömagneettinen kiihdytin on kannettava laite, joten laukaisujännite täytyy olla tuotettavissa laitteen sisällä. Tämä aiheuttaa lisärajoituksia jännitteen suhteen, sillä suurempien jännitteiden tuottamiseen vaatisi painavampia akkuja ja suurempia komponentteja. Laitteen minimilaukaisujännitteeksi valittiin 50 V, sillä alustavissa testeissä havaittiin tämän suuruisen jännitteen saavan aikaan

kohtuullisia tuloksia jännitteen kuitenkin ollessa niin alhainen, että siitä ei koidu vaaraa käyttäjälle.

Työn tavoitteena on suunnitella ja rakentaa lohkoista koostuva kokonaisuus, jotka yhteen kytkettyinä muodostavat toimivan sähkömagneettisen kiihdyttimen. Edellä mainittujen rajoitusten vuoksi laitteen suorituskyvyn maksimointi ei ole päämääränä. Lopputuloksena tulee kuitenkin olla kiihdytin, jossa sähkömagnetismin vetovoima on selkeästi havaittavissa. Myös laitteen helppokäyttöisyyteen ja toimintavarmuuteen kiinnitetään huomiota.

3 TYÖN ELEKTRONINEN OSUUS

Sähkömagneettisen kiihdyttimen tärkeimpänä osa-alueena on sen elektroninen toteutus, joka koostuu kolmesta erillisestä piirilevystä. Kukin piirilevystä on kasattu stripboard-levylle. Stripboard on yleisnimitys harraste-elektronikassa laajalti käytetylle levylle, joka on rei'itetty tasaisesti 0,1 tuuman välein ja jossa jokainen rivi reikiä on yhdistetty kuparikaistaleilla (Wikipedia 2014e). Tyypillinen stripboard-levy on esitetty kuviossa 5.



KUVIO 5. Kalustamaton stripboard (Wikipedia 2014e)

Tämän työn osalta stripboard valittiin käytettäväksi kahdesta syystä. Sähkömagneettisen kiihdyttimen suunnittelemiseksi ei ole valmiita esimerkkejä, joten laitteen rakennusvaiheessa on varauduttava muutoksiin, ja stripboard-levyt soveltuvat hyvin juuri tämänkaltaiseen prototyypirakentamiseen. Toisena syynä on otettu huomioon laitteen lopullisen kokoonpanon pitkänomainen muoto. Stripboard-levyn valmiit kuparikaistaleet mahdollistavat pitkien ja kapeiden piirilevyjen helpon ja taloudellisen suunnittelun.

3.1 Jännitelähde

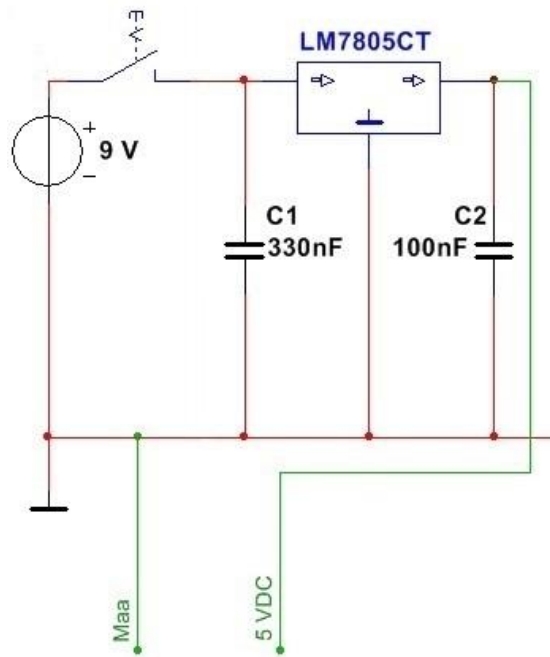
Jännitelähde on laitteen lohkoista keskimmäinen, eli se on kytketty kumpaankin muuhun lohkoon kaapeleilla. Jännitelähdelohkon tehtävänä on tuottaa sähkömagneettisen kiihdyttimen tarvitsemat käyttöjännitteet. Koska laitteen muilla lohkoilla on kaksi eritasoista käyttöjännitettä, sisältää jännitelähdelohko itse asiassa kaksi erillistä jännitelähdettä.

Laitteen käyttöjännitteet tuotetaan neljällä 9 V:n paristolla, joista kolme on kytketty jännitelähdelohkoon sarjaan. Nämä kolme paristoa osallistuvat laukaisujännitteen tuottamiseen. Käytännön testit osoittavat 9 V:n pariston jännitteen heikkenevän muutamalla voltilla varaustason laskiessa, joten yhden käyttökunnossa olevan pariston jännitteen voi arvioida olevan 7 V:n ja 9 V:n välillä. Sarjaan kytketyt jännitelähteet summaavat tuottamansa jännitteet yhteen, joten piirilevylle sisään tuleva jännite on suuruudeltaan 21 V:n ja 27 V:n välillä, riippuen paristojen varaustasosta. Neljäs paristo tuottaa ohjauselektronikkalohkon tarvitseman käyttöjännitteen.

Jännitelähdelohkon koko kytkentäkaavio on esitetty liitteessä 1. Lohko on seuraavissa aliluvuissa jaettu kolmeen osaan, jotta sen eri toiminnot tulevat selkeämmin esiin. Kytkentäkaaviossa vihreällä esitetyt signaalit tuodaan jännitelähdelohkon ulkopuolelta, ja vihreällä esitetyt jännitetasot sekä maat viedään jännitelähdelohkon ulkopuolelle. Jännitelähdelohkon piirilevyä käytetään myös kahden signaalin välittämiseen ohjauselektronikkalohkon ja laukaisupiirilohkon välillä. Näitä kahta signaalia, laukaisukomentoa ja laukaisupiirin jännitteentarkkailua, ei ole merkitty kytkentäkaavioon, sillä ne eivät vaikuta millään tavalla jännitelähteen toimintaan. Kyseiset signaalit viedään jännitelähdelohkon kautta jotta vältetään ohjauselektronikkalohkon ja laukaisupiirilohkon väliseltä erilliseltä kaapeloinnilta, mikä puolestaan helpottaa laitteen asentamista erilaisiin kotelointiratkaisuihin.

3.1.1 Ohjauselektronikan käyttöjännitteen tuottaminen

Ohjauselektronikkalohkolle vietään 5 V:n tasajännite, jota tarvitaan laitetta ohjaavan mikro-ohjaimen käyttämiseen. Tämä jännite tuotetaan LM7805CT-jänniteregulaattorilla, jota syötetään yhdellä jännitelähdelohkoon kytketyistä 9 V:n paristoista (kuvio 6).



KUVIO 6. 7805-lineaariregulaattori oheiskomponentteineen

Regulaattori saa tulojännitteeksi 7 V – 9 V, pariston varauksesta riippuen, josta se tuottaa noin 5 V:n lähtöjännitteen. Korkeimman tulojännitteen tapauksessa regulaattorin yli on siis 4 V:n jännitehäviö. Yleismittarilla mitattuna ohjauselektronikkalohkon virrankulutus on keskimäärin 145 mA, joten siinä tapahtuva tehohäviö korkeimman tulojännitteen tapauksessa on keskimäärin 0,58 W. Tämä saadaan tehon kaavasta (kaava 2), jossa P on sähköteho, U on jännite ja I on jännitteellä tuotettu virta.

$$P = UI \quad (2)$$

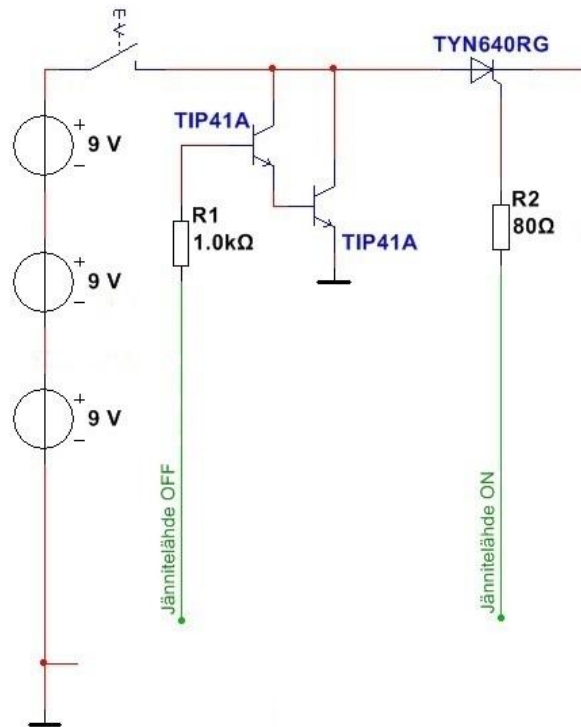
Tehohäviön laskeminen on tarpeen, sillä regulaattori on toiminnassa jatkuvasti laitteen virtakytkimen ollessa ON-asennossa, ja sen mahdollinen ylikuumentuminen on otettava huomioon. LM7805CT:n datalehti antaa

komponentin lämpövastukseksi liitoksesta ilmaan arvon $65\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Jos tämä arvo kerrotaan yllä lasketulla teholla, voidaan komponentin lämpötilan arvioida nousevan noin $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ympäristön lämpötilaa korkeammalle. Jos laitetta käytetään $25\text{ }^{\circ}\text{C}$:n huoneenlämpötilassa, komponentti kuumenee noin $63\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Komponentin maksimi toimintalämpötilaksi on ilmoitettu $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, joten komponentin ylikuumentumista ei pääse tapahtumaan, eikä erillisille lämmönjohtimille ole tarvetta. (Fairchildsemi 2013, 2.)

Kytkenässä olevat kondensaattorit C1 ja C2 päästävät lävitseen korkeita taajuuksia, joten ne johtavat regulaattorin tulo- ja lähtönavoissa mahdollisesti esiintyvät nopeat jännitepiikit maahan vakauttaen regulaattorin tuottamaa jännitettä entisestään. Kapasitanssiarvot näille suotokondensaattoreille on otettu komponentin datalehdessä esitetystä mallikytkenästä (Fairchildsemi 2013, 19).

3.1.2 Boost-hakkuriteholähteen ohjauskomponentit

Jännitelähdelohko on suojattu virtakytkimellä, jolla käyttäjä voi katkaista sekä laukaisupiirille, että ohjauselektronikalle menevän virran. Kun virtakytkin käännetään ON-asentoon, alkaa LM7805CT heti tuottaa ohjauselektronikan tarvitsemaa käyttöjännitettä, mutta laukaisujännitteen tuottamiseen käytetyllä boost-hakkuriteholähteellä on myös toissijaiset ohjauskomponentit (kuvio 7). Tämä on tarpeen, jotta ohjauselektronikalla on mahdollisuus kytkeä hakkuriteholähde päälle ja pois ilman, että käyttäjän tarvitsee huolehtia asiasta. Toisin sanoen käyttäjä ei milloinkaan kytke varsinaista laukaisujännitettä päälle tai pois, sillä heti kun virtakytkin käännetään ON-asentoon, ottaa ohjauselektronikka hakkurin hallintaansa.



KUVIO 7. Boost-hakkurin jännitteensyöttö ja ohjauskomponentit

Hakkuriteholähteen toimintaa säädellään joko sallimalla tai estämällä sen virransaanti. Oletusarvoisesti kuviossa 7 esitetyt komponentit eivät päästä virtaa eteenpäin hakkurille, sillä tyristori TYN640RG on sulkuilassa. Tyristori on puolijohdekomponentti, joka saatetaan johtavaan päästötilaan kytkemällä virtapulssi hilalta katodille (Silvonen 2009, 289). TYN640RG:n tapauksessa tämän hilavirran on oltava vähintään noin 20 mA, joten hakkurin aktivoimiseksi on tämän tyristorin hilalle tuotava vähintään 20 mA:n virta, minkä jälkeen tyristori menee johtavaan tilaan ja pysyy siinä tilassa, kunnes myötäsuuntainen jännite tyristorin yli loppuu. Tämä virta tuotetaan ohjauselektronikkalohkolta tulevallla 3,3 V:n jännitesignaalilla, joka tuodaan tyristorin hilalle vastuksen R2 läpi. Tällöin tyristorin hilavirta voidaan laskea ohmin lain avulla (kaava 3), jossa I on virta ja U on vastuksen R yli jäävä jännitehäviö. Tässä tapauksessa U on vastuksen R2 yli jäävä jännitehäviö, joka on lohkolle tuotu 3,3 V, josta vähennetään tyristorin hila-katodi -liitoksen kynnyksjännite. Tässä sovelluksessa tyristorin toiminta ja sen navoissa olevat jännitetasot vaihtelevat nopeasti, eikä tarkan hila-katodi -jännitteen määrittäminen onnistunut, mutta 80 Ω:n vastuksen läpi tuotuna tyristorin liipaisu onnistui testatessa joka kerta.

$$U = RI \quad (3)$$

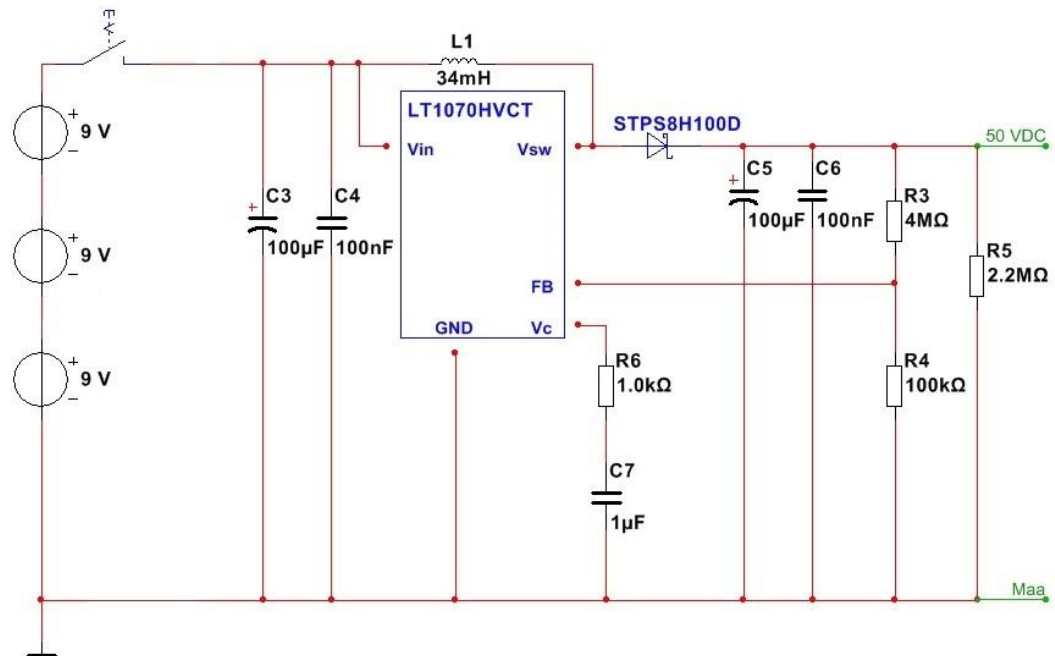
Hakkuriteholähteen pois päältä kytkeminen toteutetaan kahden TIP41A-transistorin darlingtonkytkennällä. Darlingtonkytkennäksi kutsutaan kahden transistorin kytkentää, jossa transistorit käyttäytyvät kuin yksi transistori ja jossa transistorien virranvahvistuskertoimet kertautuvat yhteen antaen kytkennälle erityisen suuren virranvahvistuksen (Kitronik 2014). Tässä tapauksessa Darlingtonkytkentää käytetään tyristorin sulkemiseksi: Kun ohjauselektroniikkalohkolta tuodaan mikro-ohjaimen tuottama noin 3,3 V:n jännitesignaali vastuksen R1 kautta Darlingtonkytkennän kannalle, se saa aikaan pienen kantavirran, joka transistorien suuren virtavahvistuskertoimen vuoksi avaa kytkennän kokonaan. Tällöin tyristorin anodin jännite putoaa äkisti Darlingtonkytkennän kynnyksjännitteen päähän maatasosta samalla, kun katodin jännite on edelleen korkeammalla tasolla. Tämä saa tyristorin menemään takaisin sulkutilaan, jossa se pysyy vaikka Darlingtonkytkentä suljettaisiinkin.

3.1.3 Laukaisujännitteen tuottaminen

Laukaisupiirille vietävä laukaisujännite tuotetaan boost-tyylisellä hakkuriteholähteellä, joka nostaa sille syötetyn maksimissaan 27 V:n jännitteen noin 51 V:iin. Sähkömagneettisessa kiihdyttimessä käytetyn boost-hakkuriteholähteen on kyettävä nostamaan jännite tähän arvoon myös silloin, kun paristojen antama jännite on laskenut, joten tehollähde on mitoitettu ja testattu tulojännitteellä 21 V. Laukaisupiirin latautumisen nopeuttamiseksi on myös haluttu, että hakkuri pystyy tuottamaan yli 50 V:n jännitteen kohtalaisen suurella virralla. Suunnitteluvaiheessa tavoitearvoiksi asetettiin 100 mA 50 V:n jännitteellä, eli hakkuri pystyy tuottamaan ainakin 5 W:n tehon (kaava 2).

Tehollähde on laite, joka muokkaa sille syötettyä sähkötehoa kuorman tarvitsemaan muotoon. Linearisista tehollähteistä, kuten LM7805CT jänniteregulaattorista, poiketen hakkureiden toiminta perustuu nopeassa tahdissa kiinni- ja auki tilojen välillä vaihtelevaan kytkimeen, eli käytännössä transistoriin. Boost-hakkurin tapauksessa tämä transistori vuoroin sallii ja vuoroin estää virran kulun energiavarastona toimivalla kelalla, joka pyrkii vastustamaan jatkuvaa virran muutosta nostamalla jännitettään. Koska kela on sarjassa

hakkuriteholähteen tulojännitteen kanssa, voidaan tilanne ajatella kahden jännitelähteen sarjaankytkentänä. Tämän seurauksena boost-hakkuriteholähteen lähtöjännite on aina vähintään sen tulojännitteen suuruinen, mutta useimmiten boost-hakkuria käytetään nimenomaan jännitteen nostamiseen. (Wikipedia 2014f.)

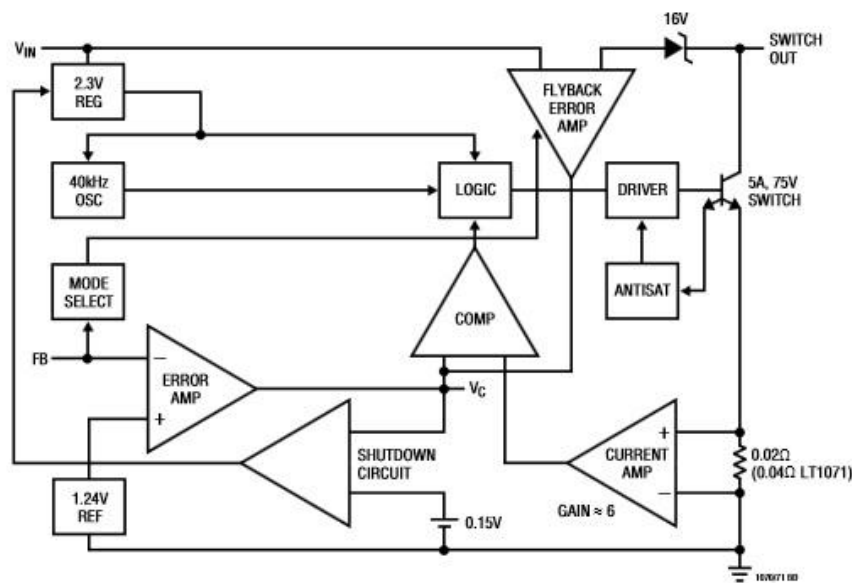


KUVIO 8. Boost-hakkuriteholähde

Kuviossa 8 on 51 V:n maksimilaukaisujännitteen tuottamiseen tarkoitettun boost-hakkuriteholähteen kytkentäkaavio. Sähkömagneettisen kiihdyttimen yhteydessä boost-hakkuriteholähteen käyttöön päädyttiin sen yksinkertaisen rakenteen, korkean hyötysuhteen sekä tulojännitettä korkeamman lähtöjännitteen vuoksi. Kuviossa 8 esitetyn kytkentäkaavion pohjana on käytetty boost-hakkurin esimerkkikytkentää kirjasta 307 Kytkentää, mutta komponentit ja niiden arvot on valittu erityisesti tähän sovellukseen sopiviksi, ja kirjan kytkennässä esitetty useamman diodin kaskadikytkentä on yksinkertaistettu yhdellä diodilla toteutettavaksi (Pohjolainen 2001, 324).

Sähkömagneettisen kiihdyttimen teholähteen ohjauspiirinä käytetään LT1070HVCT-hakkuriinohjauspiiriä. Kuviossa 9 esitettyyn lohkokaaevioon viitaten piirin toiminta voidaan selittää seuraavasti: Piirin sisäinen 40 kHz:n oskillaattori pyrkii avaamaan ja sulkemaan V_{sw} pinnan ja maatason välillä olevan

transistorin 40 kHz:n taajuudella. V_{sw} on kytketty kelaan L1, joten tämä kytkintoiminta mahdollistaa hakkuripiirissä tapahtuvan jännitteen reguloinnin aiemmin tässä luvussa kuvatulla tavalla. Oskillaattori käyttää transistoria logiikka- ja ajurilohkojen välityksellä. Logiikkalohkon toimintaan vaikuttaa myös komparaattorilta (kuviossa 9 keskellä) tuleva signaali, joka estää transistorin aukeamisen tietyissä olosuhteissa. Komparaattorin tulosignaaleilla voidaan siis säädellä sitä, milloin hakkuri nostaa jännitettä, ja milloin se on lepo-tilassa, eli ei nosta jännitettä. (Linear Technology 2014a, 16–17.)



KUVIO 9. LT1070HVCT-hakkuriinohjauspiirin lohkokkaavio (Linear Technology 2014a, 6)

Kuviossa 9 komparaattorin oikeanpuoleiseen tuloon tuodaan virtatieto transistorin emitteriltä. Tämä virtatieto kerätään tuomalla virtavahvistimelle jännitesignaali sekä ennen että jälkeen $20\text{ m}\Omega$ vastuksen. Tämän vastuksen yli oleva jännitehäviö vahvistetaan virtavahvistimella ja tuodaan komparaattorille. Vastusarvo on valittu siten, että transistorin läpi kulkevan virran käydessä komponentin toiminnan kannalta liian suureksi, logiikka sulkee transistorin ja virran kasvu loppuu. Tämän toiminnon tarkoitus on rajoittaa hakkurin antama maksimivirta sellaiselle tasolle, jolla komponentti voi toimia ilman vaurioitumista. LT1070HVCT:n tapauksessa maksimi kytkinvirraksi on ilmoitettu 5 A. (Linear Technology 2014a, 16–17.)

Komparaattorin toista tuloa käytetään hakkuriteholähteen tuottaman jännitteen suuruuden määrittämiseksi. Tämä toteutetaan tuomalla jännitesignaali ohjauspiirin FB-pinniin, jossa sitä verrataan piirin sisäiseen 1,24 V:n referenssijännitteeseen. Jännitesignaali tuodaan hakkurikytkennän lähdöstä jännitteenjakoalla siten, että halutulla lähtöjännitteen arvolla jännitteenjako tuottaa FB pinnille juuri referenssijännitteen suuruisen jännitetason. Tällöin pienikin korotus kytkennän lähtöjännitteeseen vaihtaa kuviossa 9 error ampiksi nimetyn lohkon alatilaa, mikä puolestaan komparaattorin ja logiikkalohkon kautta sulkee transistorin. Tällä toiminnolla hakkuriteholähteen lähtöjännite voidaan säätää sovelluksessa tarvittavalle tasolle. (Linear Technology 2014a, 16–17.)

Kuviossa 8 esitettyssä hakkuriteholähteessä tämä jännitteenjako on toteutettu vastuksilla R3 ja R4. Kun jännite ohjauspiirin FB-pinnille otetaan vastusten R3 ja R4 välistä, voidaan jännitteen suuruus laskea sovelletulla jännitteenjaon kaavalla (kaava 4).

$$U = U_{out} * R4 / (R3 + R4) \quad (4)$$

Sijoittamalla vastusten arvot kaavaan ja käsittelemällä tilannetta, jossa hakkurin lähtöjännite on noussut haluttuun 51 V:iin asti, voidaan ohjauspiirin FB-pinnille tuoduksi jännitteeksi laskea hieman yli 1,24 V. Ohjauspiiri sallii siis jännitteen nousun noin 51 V:iin, joka on sähkömagneettisen kiihdyttimen toiminnan kannalta riittävä jännite.

Muut LT1070HVCT:n pinnit ovat käyttöjännite V_{in} , sekä maapinni GND. LT1070HVCT toimii hyvin laajalla käyttöjännitealueella – datalehdessä piirin on ilmoitettu toimivan 3 – 60 V:n käyttöjännitteellä. Piirin viides pinni V_c on kytketty 1 k Ω :n vastuksen (R6) ja 1 μ F:n kondensaattorin (C7) kautta maahan. Tämä on peruskytkentä, jota piirin datalehti ehdottaa käytettäväksi boost-hakkuriteholähteen yhteydessä. V_c -pinnillä on useita käyttötarkoituksia, joista tämän sovelluksen yhteydessä mainittakoon virranrajoitus sekä niin kutsuttu pehmeä käynnistys. Vastus R6 toimii ohjauspiirin ulkoisena virranrajoitusvastuksena, ja kondensaattori C7 vastustaa jännitteen äkillistä nousua komparaattorilla käynnistytksen yhteydessä, mikä puolestaan suojaa

komponenttia mahdollisilta käynnistyksen yhteydessä esiintyviltä jännitepiikeiltä. (Linear Technology 2014a, 16–17.)

Kela L1 on valmistettu käsin, sillä korkean induktanssin ja korkean virrankeston omaavat kaupalliset kelat osoittautuivat hintaviksi ja vaikeasti saataviksi. Kela on käämitty DTS-25/1/5-VCAP-toroidikuristimen rungon ympärille ja kelalankana on käytetty samaa 1 mm:n emaloitua kuparilankaa, jota myös laukaisupiirilohkossa olevassa laukaisukäämissä on käytetty. Kelan induktanssi Agilent U1732C LCR-mittarilla mitattuna on noin 34 mH.

Kondensaattorit C3 – C6 ovat kytkennän tulo- sekä lähtöjännitteen suodatusta varten. Suodatuksessa käytetään isompaa elektrolyyttikondensaattoria sekä pienempää keraamista kondensaattoria rinnan kytkettyinä, jotta suodatus olisi tehokasta sekä matalilla, että korkeilla taajuuksilla. Kapasitanssiltaan korkea elektrolyyttikondensaattori pystyy pitämään varastoimensa jännitteen kauemmin yllä, joten se suodattaa tehokkaasti matalia taajuuksia. Pienempi keraaminen kondensaattori taas on tehokkaampi korkeiden taajuuksien suodattamiseen sen pienemmän induktanssin vuoksi.

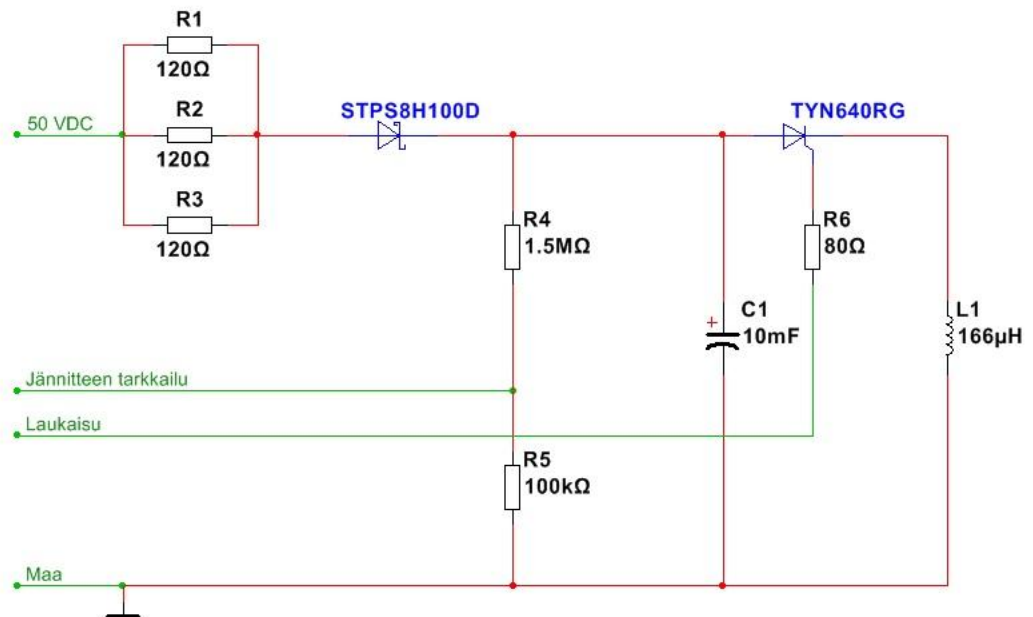
STPS8H100D on Schottky-diodi, joka ohjauspiirin kytkimen auki ollessa päästää virran kulkemaan kuormaa kohti, mutta joka kytkimen sulkeutuessa estää virran kulun kuormalta takaisinpäin. Tämä diodi on keskeisessä osassa kytkennän toiminnan kannalta ja sen ominaisuuksilta vaaditaan paljon: Diodin on kestettävä kohtalaisen suuri-induktanssisen kelan tuottamat virtapiikit, sen on pystyttävä pitämään yli 50 V:n lähtöjännite kuormalla ja sen täytyy avautua riittävän nopeasti 40 kHz hakkuripiirin kytkimen tahdissa. Schottky-diodit ovat diodeja, joiden toimintaperiaate poikkeaa tavallisten liitosdiodien toiminnasta siltä osin, että sen läpi kulkeva virta koostuu pääasiassa enemmistövarauksenkuljettajista, mikä mahdollistaa suuremman kytkentänopeuden (Silvonen 2009, 128). Tästä syystä Schottky-diodit ovat hyvin usein käytettyjä hakkuriteholähteiden yhteydessä. Tässä sovelluksessa käytetyn STPS8H100D Schottky-diodin valintaan päädyttiin, koska se on tarkoitettu korkeataajuuksisille hakkuriteholähteille ja sen virta- ja jännitearvot soveltuvat hyvin sähkömagneettisen kiihdyttimen asettamiin vaatimuksiin (STMicroelectronics 2006, 1).

Vastus R5 on lisätty kytkentään nopeuttamaan lähdössä olevien kondensaattoreiden purkautumista laitteen sammuttamisen jälkeen. Tämän vastuksen arvo on kokeilemalla valittu siten, että mikäli jännitelähdelohkoa jostain syystä käytetään ilman sille tarkoitettua kuormaa, eli laukaisupiiriä, hakkuripiiri ottaa niin vähän virtaa, ettei kuviossa 7 esitetyn tyristori TYN640RG:n läpi kulje riittävästi virtaa sen auki pitämiseksi. Tämä ominaisuus on turvallisuustekijä, joka estää hakkuri-teholähteen käynnistymisen silloin, kun sähkömagneettinen kiihdytin ei ole kokonaisuudessaan kasattu.

Jännitelähdelohkon valmistuttua sitä testattiin 51 V:n lähtöjännitteellä 500 Ω :n kuorman yli. Kytkentä pystyi tuottamaan tasaista hieman yli 100 mA:n virtaa, eivätkä kytkennän komponentit tai jännitelähteinä toimivat paristot kuumentuneet merkittävästi. Sekä hakkuriinohjauspiiri että Schottky-diodi ovat T0-220-kotelossa. T0-220-kotelotyyppi sisältää metallisen lämpönielun, joka parantaa komponentin lämmönjohtokykyä ja auttaa siten estämään komponenttien ylikuumentumista.

3.2 Laukaisupiiri

Laukaisupiiri on sähkömagneettisen kiihdyttimen lohkoista yksinkertaisin, mutta fyysiseltä kooltaan suurin ja laitteen toiminnan kannalta kriittisin. Laukaisupiiri huolehtii laukaisuun tarvittavan energian varastoinnista sekä laukaisun yhteydessä sen nopean muunnoksen sähköenergiasta liike-energiaksi. Laukaisupiirilohkon kytkentäkaaviossa (kuvio 10) vihreällä esitetyt signaalit ovat yhteydessä jännitelähdelohkoon kaapelin välityksellä.



KUVIO 10. Sähkömagneettisen kiihdyttimen laukaisupiiri

3.2.1 Laukaisukäämi ja -kondensaattori

Laukaisukäämi on sähkömagneettisen kiihdyttimen keskeisin komponentti. Miltei kaikkien muiden laitteessa olevien komponenttien päämääränä on laukaisukäämin tarkoituksenmukaisen käytön mahdollistaminen. Laukaisukäämi on myös se komponentti, jossa sähkömagneettisen kiihdyttimen päätoiminta – sähköenergian muuttuminen liike-energiaksi – tapahtuu.

Kuviossa 10 laukaisukäämiä kuvataan komponentilla L1. Laukaisukäämi on käämitty ulkohalkaisijaltaan 13 mm:sen muoviputken ympärille. Käämilankana on käytetty 1 mm:n paksuista emaloitua kuparilankaa. Kuparilangan valinnassa on otettu huomioon sen resistanssi, virrankesto sekä muovailtavuus. Paksumpi lanka tarjoaa matalamman resistanssin, joka mahdollistaa suuremman laukaisuvirran, mikä puolestaan kaavan 1 perusteella nostaa käämin ytimeen muodostuvan magneettivuon tiheyttä. Koska laukaisuvirta voi laukaisun hetkellä olla merkittävän suuri, on myös kuparilangan virrankeston oltava kohtalainen. Nämä asiat puoltavat mahdollisimman paksun käämilangan käyttöä. Langan paksuutta rajoittavana tekijänä on otettu huomioon langan käämimisen aiheuttamat haasteet: paksun kuparilangan tiivis käämiminen on vaikeaa ilman teollisia laitteita.

Koska laukaisukäämi on käämitty käsin, on langan paksuus rajoitettu 1 mm:iin. Tällainen lanka tarjoaa melko alhaisen resistanssin mutta on silti käämittävissä käsin.

Laukaisukäämin resistanssiin vaikuttaa käytetyn kuparilangan halkaisijan lisäksi myös sen pituus, eli käytännössä käämin kierrosluku. Kaavan 1 perusteella käämin kierrosluku on virran tavoin suoraan verrannollinen syntyvän magneettivuon tiheyteen. Tämän vuoksi sopivan kierrosluvun määrittäminen laukaisukäämille on vaikeaa: kierrosluvun kasvattaminen nostaa magneettivuon tiheyttä, mutta toisaalta se myös nostaa käämin resistanssia, mikä vaikuttaa pienentävästi käämissä kulkevaan virtaan ja sitä kautta myös magneettivuon tiheyteen.

Sähkömagneettisen kiihdyttimen suunnittelun alkuvaiheessa käämittiin useita käämejä, joista lupaavimmalta vaikuttava valittiin lopulliseen laitteeseen. Käämien käämiminen ja niiden testaaminen osoittautui aikaa vieväksi tehtäväksi, joten lopullisen laukaisukäämin ei voi todeta olevan optimaalinen käyttötarkoitukseensa, mutta se on valmistetuista vaihtoehdoista paras. Lopullinen laukaisukäämi on 4 cm pitkä, ja se sisältää 200 kierrosta viidessä kerroksessa. Agilent U1732C LCR-mittarilla mitattuna käämin induktanssi on $166 \mu\text{H}$ ja resistanssi $250 \text{ m}\Omega$.

Laukaisukondensaattori, eli kuviossa 10 komponentti C1, toimii laukaisukäämin energiavarastona. Jännitelähdepiiri tuottaa tarvittavan 50 V:n jännitteen, mutta se kykenee tuottamaan tämän jännitteen korkeintaan noin 100 mA:n virralla. Magneettivuon tiheyden kaavassa (kaava 1) ainoa sähkötekkinen suure on virta, joten nimenomaan riittävän suuren virran tuottaminen käämille on ensisijaisen tärkeää. Huomattavasti 100 mA:a suuremman laukaisuvirran tuottaminen hetkellisesti onnistuu käyttämällä kondensaattoria väliaikaisena energiavarastona, joka ennen laukaisua ladataan hieman yli 50 V:iin ja joka laukaisun hetkellä tyhjenetään laukaisukäämin läpi. Laukaisun hetkellä kondensaattori siis toimii käämin jännitelähteenä, mutta varsinaisesta jännitelähdelohkosta poiketen kondensaattori ei juuri aseta rajoituksia sen tuottaman virran maksimiarvolle. Kuten kuvioista 10 käy ilmi, on C1 kytketty suoraan L1:sen napoihin ilman välissä olevia virtaa rajoittavia vastuksia. Käämin ja siihen johtavien johtimien

resistanssit ovat pieniä, joten laukaisun yhteydessä kondensaattori käytännössä oikosuljetaan käämin yli. Ladatun kondensaattorin oikosulkemista ei yleensä suositella kondensaattorin tuottaman korkean virtapiikin vuoksi, mutta tässä sovelluksessa edellä mainittu virtapiikki nimenomaan mahdollistaa sähkömagneettisen kiihdyttimen toiminnan. Kondensaattorin käyttö tällä tavalla todennäköisesti rasittaa kondensaattoria huomattavasti, eikä sen toimintaikä välttämättä ole kovin pitkä, mutta juuri tämä toiminta on laitteen toiminnan kannalta oleellista.

Laukaisukondensaattorin valinnassa on keskitytty sen kapasitanssiin, toimintajännitteeseen sekä fyysiseen kokoon. Kondensaattorin kapasitanssi kuvaa sen kykyä varastoida sähkövarausta tietyn jännite-eron suhteen.

Sähkömagneettisessa kiihdyttimessä laukaisu tapahtuu kondensaattoriin varastoidulla varauksella, joten laukaisukondensaattorin on oltava kapasitanssiltaan suuri, jotta se pystyy varastoimaan mahdollisimman paljon energiaa laukaisukäämin käytettäväksi. Useimmiten korkean kapasitanssin omaavat kondensaattorit ovat kuitenkin toimintajännitteeltään alhaisia. Koska laukaisukondensaattorin toimintajännite oli suunnitteluvaiheessa tiedossa, oli kapasitanssiarvo valittava suurimmaksi mahdolliseksi siten, että toimintajännite on riittävä. Kondensaattoria käytetään maksimissaan 51 V:n jännitteellä, mutta rasitusvaramitoitukset huomioon ottaen on kondensaattorille spesifioidun toimintajännitteen oltava tätä suurempi. Laukaisukondensaattoriksi valittiin elektrolyyttikondensaattori HC1J109M30050HA, jonka nimelliskapasitanssiarvo on 10 mF ja jännitteenkesto 63 V. Kondensaattoreiden kapasitanssiarvolle annetaan datalehdessä usein melko suuri virhemarginaali, eli niiden todellinen kapasitanssi voi poiketa huomattavasti nimellisarvosta. Agilent U1732C LCR-mittarilla mitattuna laukaisukondensaattorin kapasitanssi on 9,6 mF.

Eräänä vaihtoehtona oli useamman laukaisukondensaattorin käyttö rinnan, jolloin niiden kapasitanssiarvot olisivat summaantuneet, ja ne olisivat toiminaan yhtenä suurempana kondensaattorina. Tämän kokoluokan kondensaattorit ovat kuitenkin melko kalliita ja fyysiseltä kooltaan isoja, joten tilansäästö- ja kustannussyistä lopullinen laukaisupiiri toteutettiin yhdellä kondensaattorilla.

Laukaisukondensaattori ja keskeneräinen laukaisukäämi näkyvät kuviossa 11.



KUVIO 11. Laukaisukondensaattori ja -käämi keskeneräisellä laukaisupiirilevyllä

3.2.2 Laukaisukondensaattorin lataaminen

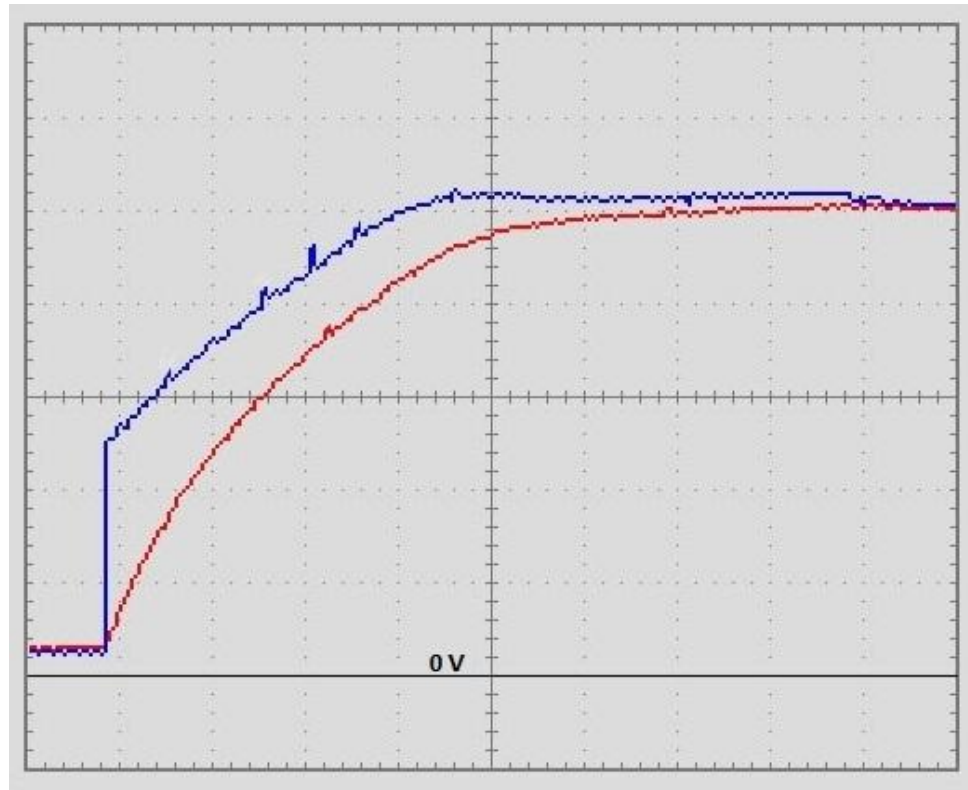
Laukaisupiirilohkon vastukset R1 – R3 ovat tehovastuksia, joiden tehtävä on rajoittaa laukaisukondensaattorin latausvirtaa. Nämä kolme 120 Ω :n vastusta on kytketty rinnan, joten niiden kokonaisresistanssi on 40 Ω . Laukaisupiirilohkolle tuleva 51 V:n jännite tuodaan näiden vastusten läpi, jolloin varmistetaan se, ettei latausvirta pääse kasvamaan hallitsemattoman suureksi. Ohmin lailla (kaava 3) laskettuna tyhjän kondensaattorin latautumisen alussa virta I voisi teoriassa olla yli 1 A.

Jännitelähdelohko on kuitenkin suunniteltu ja testattu siten, että laitteessa käytetty boost-hakkuriteholähde kykenee tuottamaan todistetusti vain noin 5 W:n tehon. Kaavan 2 mukaan teho lasketaan jännitteen ja virran tulona, joten virran noustessa jännitteen täytyy laskea, jos teho pysyy samana. Jos jännitelähdelohkon tuottamaa jännitettä siis syötettäisiin pelkästään vastusten R1 – R3 läpi, jännitelähteen tuottama jännite jäisi hyvin alhaiseksi. Tämän sovelluksen yhteydessä ladattava kondensaattori aiheuttaa kuitenkin tilanteeseen muutosta.

Vaihtosähkölle kondensaattori vastustaa jännitteen muutosta, mutta tasasähkölle kondensaattori näkyy katkaistuna virtapiirinä, joten tyhjän kondensaattorin voi rinnastaa maatasoksi latautumisen alussa. Tällöin jännitelähdelohko ei pysty tuottamaan haluttua 51 V:n jännitettä, sillä tämän jännitteen jäädessä latausvastusten R1 – R3 yli nousisi piirin virta ja sen myötä myös jännitelähteen tuottama teho liian suureksi. Yhdistämällä kaavat 2 ja 3 saadaan tehon, jännitteen ja resistanssin välille yhtälö $P = U^2/R$. Yllä esitetystä tapauksesta $R = 40 \Omega$ ja $P = 5 \text{ W}$. Yllä olevalla kaavalla tyhjän laukaisukondensaattorin tapauksessa jännitelähteen tuottamaksi jännitteeksi voidaan arvioida noin 14 V.

Tilanne muuttuu kondensaattorin jännitetason nousun myötä: Kondensaattorin jännitteen noustessa esimerkiksi 14 V:iin, aikaisemmin kuviteltu maataso nousee myös tähän arvoon. Tällöin jännitelähde voi tuottaa tuplasti aikaisemmassa tarkastelussa lasketun jännitteen, eli edelleen 14 V yli laukaisukondensaattorilla olevan jännitetason, tehohäviön latausvastuksissa pysyessä edelleen samana. Tämä prosessi jatkuu, kunnes jännitelähde tuottaa sille määritellyn 51 V:n maksimijännitteen. Tästä eteenpäin jännite kondensaattorilla jatkaa nousuaan, mutta jännitelähteen jännite pysyy samana. Tästä seuraa latausvirran pieneneminen ja sitä kautta latausnopeuden hidastuminen.

Kuviossa 12 on Agilent U1604A -oskilloskoopilla mitatut kuvaajat jännitteistä laukaisukondensaattorin latauksen yhteydessä. Alempi, punainen kuvaaja, on jännite laukaisukondensaattorilla, ja ylempi, sininen kuvaaja, on hakkuri-teholähteen lähdestä mitattu jännite. Kuvaa on skaalattu siten, että maataso on yhtenäinen viiva kuvan alaosassa ja jokainen ruutu pystysuunnassa vastaa 10 V:n jännitettä maatasoon nähden. Vaakasuunnassa jokainen ruutu vastaa 500 ms:n aikaa.



KUVIO 12. Kondensaattorin ja jännitelähteen jännite latautumisen yhteydessä

Noin 3 V:n jännite ennen latautumista on jäännös aikaisemmasta laukaisusta. Kuvaajista voidaan tarkastella jännitelähteen käyttäytymistä kondensaattorin latautumisen aikana. Jännitelähteen kuvaaja on keskimäärin noin 10 V kondensaattorin kuvaajan yläpuolella, joten edellä teoreettisesti laskettu latautumiskäyttäytyminen on havaittavissa kuvioista 12, joskin arvot vaihtelevat lasketuista arvoista varsinkin ensimmäisen 500 ms:n aikana. Kuvaajista voidaan myös havaita latausvirran merkitys kondensaattorin latautumisnopeudelle. Kahden kuvaajan välinen etäisyys pystyakselilla kuvaa latausvastusten $R1 - R3$ yli jäävää jännitehäviötä ja sitä kautta myös latausvirran suhteellista suuruutta. Kuten edellä todettiin, kondensaattorin latautuminen hidastuu latausvirran pienentyessä.

Kuvaajasta laskemalla koko latausprosessin kestoaika on noin 3 s. Latauksen alkamisesta lukien 4 s:n kohdalla kuvaajat asettuvat miltei samaan tasoon. Tässä vaiheessa jännitelähde on kytketty pois päältä, ja se tasaa jännitteensä laukaisukondensaattorin jännitteen tasolle.

3.2.3 Laukaisupiirin muut komponentit

Vastukset R4 ja R5 muodostavat jännitteenjakokytkennän, jota kautta otetaan jännitesignaali ohjauselektroniikkalohkolla tapahtuvaa jännitteen tarkkailua varten. Kaavaa 4 soveltaen tämän jännitteenjaon voi laskea ottavan kondensaattorilla olevasta jännitteestä noin kuudestoistaosan, joka viedään ulos laukaisupiirilohkolta. Näiden vastusten resistanssit on valittu suuriksi, jotta jännitteenjaon läpi kulkeva virta olisi pieni eikä näin ollen hidastaisi laukaisukondensaattorin latautumista. Vastukset R4 ja R5 toimivat myös vuotovastuksina, joiden avulla laukaisukondensaattori hitaasti tyhjennetään, kun laite on pitempiä aikoja käyttämättömänä.

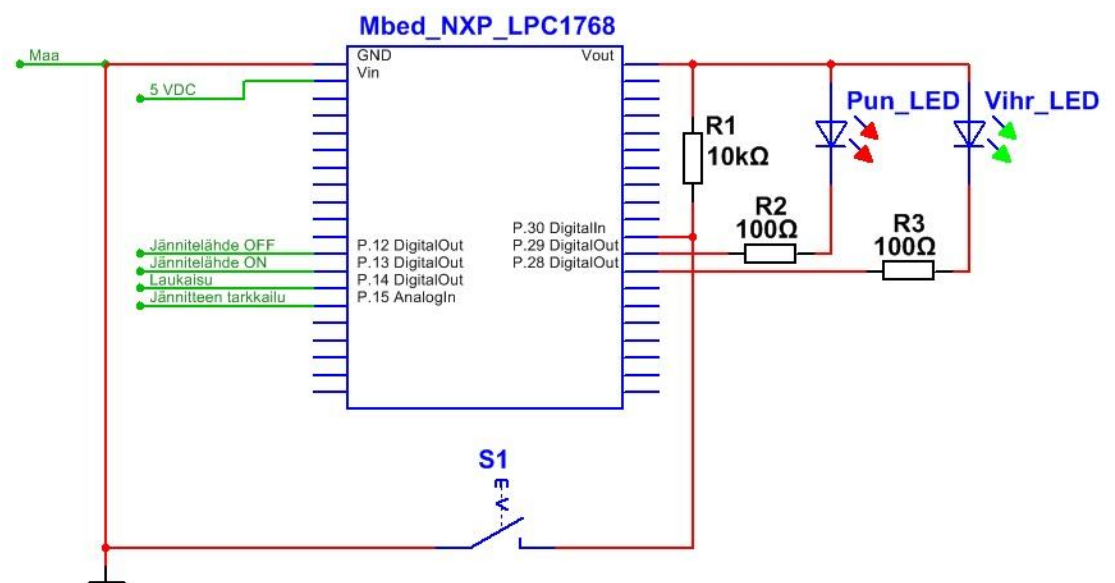
STPS8H100D on Schottky-diodi, joka estää laukaisukondensaattorin purkautumisen takaisin jännitelähdelohkolle silloin, kun jännitelähde on pois päältä. STPS8H100D:n kynnySJännite on maksimissaan 0,58 V (STMicroelectronics 2006, 1). Tämä jännite leikkautuu pois laukaisukondensaattoria lataavasta jännitteestä, mutta jännitelähdelohkon tuottama jännite on tarkoituksella säädetty hieman korkeammaksi kuin haluttu 50 V, joten diodin aiheuttama jännitehäviö ei tuota ongelmaa.

Tyristori TYN640RG estää virran kulun laukaisukondensaattorilta laukaisukäämille. Laukaisun yhteydessä ohjauselektroniikkalohkolta tuodaan 3,3 V:n jännitesignaali tyristorin hilalle, jolloin se aukeaa ja kondensaattorin varaus pääsee käämille. Vastus R6 toimii tyristorin hilavirran rajoittimena samaan tapaan kuin jännitelähdelohkon yhteydessä. TYN640RG kestää vaurioitumatta jopa 460 A:n virtapiikkejä, joten sen käyttö tämän tyyppisessä korkean huippuvirran sovelluksessa on turvallista (STMicroelectronics 2013, 2).

3.3 Ohjauselektronikka

Ohjauselektronikkalohko huolehtii sähkömagneettisen kiihdyttimen toiminnan automatiikasta sekä toimii rajapintana käyttäjän ja laitteen toiminnan välillä.

Ohjauselektronikkalohkon ytimenä toimii mikro-ohjain, jonka lisäksi lohkon piirilevy sisältää johtimien päihin asennetut merkkiledit sekä liipaisimena toimivan painokytkimen. Ledit ja kytkin muodostavat hyvin yksinkertaisen käyttöliittymän laitteen ja käyttäjän välille. Ohjauselektronikkalohkon kytkentäkaaviossa (kuvio 13) vihreällä esitetyt signaalit ovat yhteydessä jännitelähdelohkoon kaapelin välityksellä.



KUVIO 13. Ohjauselektronikkalohkon kytkentäkaavio

Sähkömagneettisen kiihdyttimen ohjauselektronikkalohko on tarpeen, jotta eri lohkojen toiminta saadaan synkronisoitua siten, että lohkot muodostavat yhden saumattomasti yhteen toimivan kokonaisuuden. Vaikka sekä jännitelähdelohko, että laukaisupiirilohko on periaatteessa suunniteltu irtonaisiksi laitteiksi, on kokonaisuuden kannalta tärkeää että sähkömagneettisessa kiihdyttimessä on mukana myös logiikkaa, joka säätelee muiden lohkojen toimintaa. Ilman tällaista logiikkaa laite olisi huomattavasti vaikeakäyttöisempi. Laitteen logiikkana toimii Mbed NXP LPC1768 -mikro-ohjain.

3.3.1 Mikro-ohjain

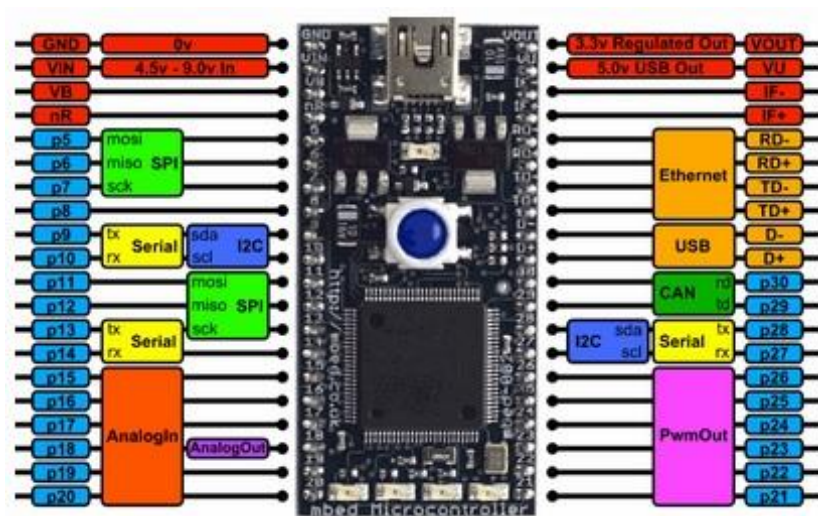
Mikro-ohjaimet ovat yhdelle mikrosirulle tai yhdeksi komponentiksi rakennettuja pienikokoisia mikrotietokoneita, jotka pitävät sisällään varsinaisen mikroprosessorin lisäksi vaihtelevan määrän erilaisia oheislaitteita. Mikro-ohjainten käyttö on nykyään hyvin yleistä lähes kaikäntyylisten elektronisten sovellusten yhteydessä. Käytännössä lähes jokainen laite, joka mittaa, varastoi tai käsittelee tietoa, pitää sisällään mikro-ohjaimen. (Circuitstoday 2011.)

Mikroprosessoreihin verrattuna mikro-ohjainten tärkeimpänä etuna on se, että mikro-ohjain itsessään on toimiva kokonaisuus, kun taas mikroprosessorit tarvitsevat ympärilleen oheiskomponentteja pelkän perustoiminnan toteuttamiseksi. Mikro-ohjaimissa suurin osa niiden pinneistä on ohjelmoitavissa, mikä tekee niiden käyttöönotosta helpompaa ja nopeampaa. Varsinainen laskentateho on mikro-ohjaimissa yleensä erillisiä mikroprosesseja alhaisempi, mutta mikro-ohjaimia käytetäänkin laajasti pienemmissä ohjaujärjestelmissä, joissa pientä kokoa ja monikäyttöisyyttä voidaan pitää suurta laskentatehoa tärkeämpinä asioina. (Circuitstoday 2011.)

Sähkömagneettisen kiihdyttimen yhteydessä käytetty mikro-ohjain on hyvin suosittu Mbed NXP LPC1768. Mbed-sarjan mikro-ohjaimet ovat ARM Cortex -sarjan mikroprosessorien ympärille rakennettuja kehitysalustoja, jotka on suunniteltu nopeaan prototyypirakentamiseen ja kehittämiseen. LPC1768 käyttää ARM Cortex-M3 ydintä. Mbed-sarjan mikro-ohjaimet ovat saatavilla 40-pinnisissä koteloissa, jotka soveltuvat hyvin käytettäväksi esimerkiksi koekytentälevyillä tai stripboardilla. Mbedin ohjelmointi tapahtuu USB-väylän välityksellä. (Mbed 2014b.)

LPC1768 sisältää suuren määrän oheislaitteita ja liitäntöjä (kuvio 14), joista sähkömagneettisen kiihdyttimen yhteydessä tarvitaan vain pientä osaa. Tämän laitteen yhteydessä olisi muuten voitu käyttää myös pelkistetympää mallia, Mbed NXP LPC1114:sta, mutta LPC1768 on spesifioitu käytettäväksi korkeampitehoisissa sovelluksissa ja tyristorien avaamiseen tarvittava virta laukaisupiirilohkolla sekä jännitelähdelohkolla on kohtalaisen suuri. Kehittyneemmän LPC1768:n käyttöön päädyttiin, jotta riittävä virransyöttö

tyristoreille ja ohjauselektronikkalohkon merkkiledeille on varmasti mahdollinen. (Mbed 2014b.)



KUVIO 14. Mbed NXP LPC1768:n pinnikartta ja liitännät (Mbed 2014a)

3.3.2 Ohjauselektronikkalohkon kytkennät

Kuviossa 13 esitettyssä kytkentäkaaviossa mikro-ohjaimen pinnit on esitetty niiden todellisessa järjestyksessä. Suurin osa ohjauselektronikkalohkon signaaleista on digitaalisia, eli niissä mahdollisia eri tiloja on vain kaksi: jännitteellinen ja jännitteetön. Mbed NXP LPC1768:ssa pinnit 5 – 30 on määritettävissä digitaaliulostuloiksi tai -sisääntuloiksi sen lisäksi, että niillä on pinnikartassa esitetyt erityiskäyttötarkoitukset (Mbed 2014a). Koska näitä erityistoimintoja ei juuri tarvita, on käytettävät pinnit valittu ennenkaikkea piirilevyn layoutin yksinkertaisuutta silmälläpitäen.

Kuvioon 13 on merkitty kukin käytössä oleva pinni sekä niiden käyttötavat. Kaikki ohjauselektronikkalohkon ulkopuolelle kytkeytyvät signaalit on yhdistetty Mbed:n yhdellä puolella oleviin pinneihin, eli pinneihin 1 – 20. Tämä mahdollistaa ohjauselektronikan piirilevylle hyvin yksinkertaisen ja tehokkaan layoutin. GND kytkeytyy jännitelähdelohkon maahan ja Vin:iin tuodaan jännitelähdelohkon LM7805CT-lineaariregulaattorin tuottama 5 V:n jännite. Näiden signaalien avulla mikro-ohjain käynnistyy heti, kun laitteen virtakytkin

suljetaan. Pinnit 12 – 14 ovat digitaalisia ulostuloja, joita käytetään boost-hakkuriteholähteen ohjaamiseen sekä laitteen laukaisuun.

Pinni 15 on määritelty analogiseksi sisääntuloksi, eli se tunnistaa sisääntulevan jännitteen suuruuden käyttämällä yhtä LPC1768:n analogia-digitaali muuntimista. Tälle pinnille tuodaan laukaisupiiriltä kerätty jännitetieto, jonka avulla mikro-ohjain määrittää laukaisukondensaattorin varaustason.

Ohjauselektronikkalohkon toisella puolella toteutetaan käyttäjän ja laitteen välinen rajapinta. Pinnejä 28 ja 29 käytetään vihreän ja punaisen merkkiledin tilojen säätelyyn. Ledit, eli loistediodit, ovat diodeja, jotka säteilevät sähkömagneettista säteilyä näkyvän valon aallonpituuksilla. Toimiakseen ledin läpi on virrattava riittävän suuri sähkövirta, joka tässä yhteydessä käytävillä ledeillä on noin 10 mA. Ledejä käytetään Mbed:n pinnistä 40 saatavalla 3,3 V:n jännitteellä. Ledien anodit on kytketty 3,3 V:iin, ja niiden katodit on kytketty vastusten R2 ja R3 kautta niitä ohjaaviin digitaalisiin ulostuloihin. Tällöin ledejä ohjataan käänteisesti siten, että tuomalla pinnien jännitetasot lähelle maata ylittää ledien anodin ja katodin välinen jännite-ero niiden kynnysjännitteen, ja ne alkavat johtaa. Vastuksilla säädetään ledien virta sopivaksi. Ledeillä on muihin diodeihin verrattuna melko suuri kynnysjännite, noin 2 V, joten virtaa rajoittavien vastuksien yli jää vain noin 1,3 V:n jännite. Tästä voidaan kaavan 3 avulla laskea ledien virraksi noin 13 mA, joka riittää saattamaan ledit sopivan kirkkaiksi.

Pinni 30 on kytketty 3,3 V:iin vastuksen R1 kautta sekä maatasoon painokytkimen S1 kautta. Kun S1 on auki, on pinni ylätilassa, ja kun S1 suljetaan, painuu pinni alatilaan. Tällä tavoin mikro-ohjain tulkitsee, milloin käyttäjä painaa kytkintä alas. Koska tämä toiminto ei tarvitse juuri lainkaan virtaa, on vastus R1 lisätty kytkentään vähentämään kytkimen läpi kulkevan virran määrää. Painokytkin on sähkömagneettisen kiihdyttimen liipaisin, jota käytetään laitteen laukaisemiseen.

4 TYÖN OHJELMALLINEN OSUUS

Suurin osa sähkömagneettisen kiihdyttimen toiminnasta tapahtuu laitteiston tasolla, eikä ohjauselektronikkalohko olekaan täysin välttämätön laitteen toiminnan kannalta. Suuri osa projektin aikana tehdyistä laitteen koelaukaisuista on tehty ilman ohjauselektronikkalohkoa, jolloin laukaisukondensaattorin varausta on tarkkailtu mittareiden avulla ja ohjaussignaalit on annettu manuaalisesti. Laite toimii niinkin, ja projektin tarkoitus, eli sähkömagneettisten ilmiöiden esiintuominen on nähtävissä. Ohjauselektronikkalohko on kuitenkin haluttu mukaan laitteeseen, jotta laitteen käyttäminen olisi mahdollisimman helppo ja automatisoitu tapahtuma.

Tämän automaation toteuttaa työn ohjelmallinen osuus, joka sisältää ohjauselektronikkalohkon mikro-ohjaimen syötetyn ohjelmakoodin. Ohjelma on kirjoitettu C++-ohjelmointikielellä, jota Mbed-sarjan mikro-ohjaimet käyttävät. Ohjelman arkkitehtuuri on suunniteltu tilakone-muotoiseksi.

4.1 Tilakone

Tilakone on tietokoneohjelmien sekä digitaalisten logiikoiden suunnittelussa käytetty käsite, joka viittaa järjestelmän eri tiloihin pohjautuvaan rakenteeseen. Tilakoneessa järjestelmä voi kerrallaan olla yhdessä ennalta määrätystä tiloista. Järjestelmä vaihtaa tilaansa sille tuotavien signaalien perusteella tiettyjen ehtojen täytyessä ja tuottaa näiden pohjalta ulos vietäviä signaaleita. (Techopedia 2014.)

Tilakoneen toiminta alkaa yhdestä sille ennalta määrätystä alkutilasta, josta se lähtee muuttamaan tilaansa sisään tulevien signaalien pohjalta siten, että sen nykyinen tila vaikuttaa tapahtumaan. Tilakoneen ulostuloa voidaan siis pitää sen sisääntulon sekä kulloinkin aktiivisena olevan tilan funktiona. Tilakoneita on helppo havainnollistaa tiloja ja niiden välisiä ehtoja kuvaavien lohkoavioiden, eli tilakaavioiden avulla. (Techopedia 2014.)

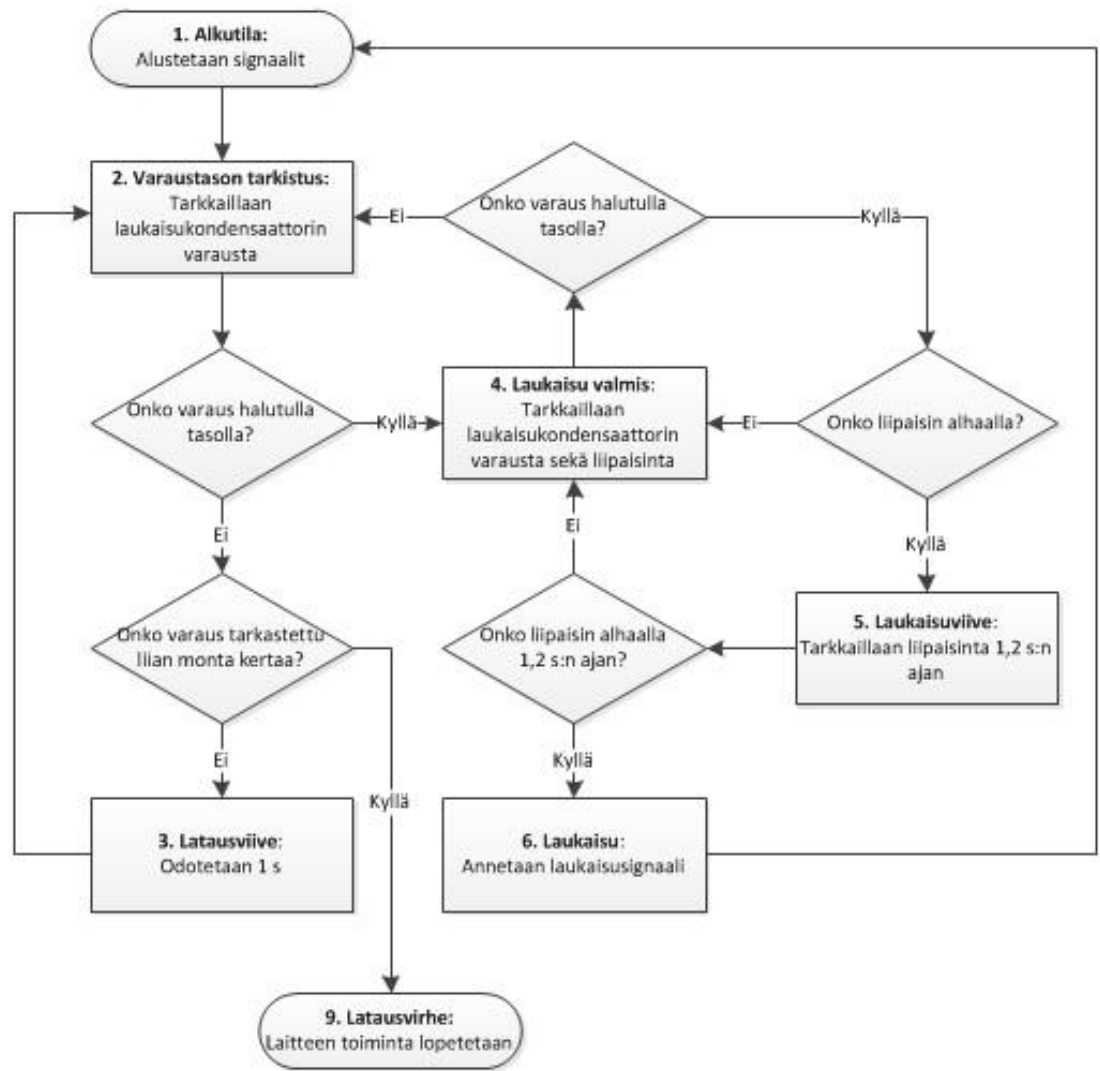
Sähkömagneettisen kiihdyttimen ohjauselektronikan ohjelmakoodiksi tilakonerakenne sopii hyvin laitteen tiloihin perustuvan toiminnan vuoksi. Ensimmäisenä lähtökohtana ohjelmaa suunniteltaessa oli ottaa huomioon laitteen toiminnan kannalta tärkein tieto, eli laukaisukondensaattorin varaustaso. Karkeasti

jaoteltuna laite voi olla kahdessa tilassa, joista toisessa kondensaattorilla ei ole riittävästi varausta laukaisun suorittamiseksi ja toisessa on. Tämän jaottelun vuoksi tilakone vaikutti parhaalta vaihtoehdolta laitetta ohjaavaksi ohjelmarakenteeksi. Lopullisessa ohjelmakoodissa tiloja tarvitaan huomattavasti kahta enemmän, jotta laitteen toiminnasta tulee sujuvaa ja turvallista.

4.2 Ohjauselektronikan ohjelmakoodin toiminta

Sähkömagneettisen kiihdyttimen ohjelmakoodi on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2. Ohjelmaan kuuluu Mbed.org verkkosivuilta saatava Mbed-kirjasto, joka esitellään ohjelmakoodin ensimmäisellä rivillä. Tämä kirjasto sisältää yleisimmät ja käytetyimmät C++-ohjelmointikielen kirjastot sekä kaikki Mbed-kehitysalustan tarvitsemat funktiot ja määritelmät. Tämän jälkeen ohjelmakoodissa esitellään ohjauselektronikkalohkolla käytetyt pinnit, jotka ovat nähtävissä kuviossa 13.

Ohjelma käyttää ainoastaan pääfunktioita, jota suoritetaan päättymättömässä silmukassa. Ennen silmukkaan menemistä ohjelma alustaa laitteen tilamuuttujan tilaan 1 sekä nolaa laskurimuuttujat. Silmukkaan päästessään ohjelmakoodi asettuu tilakoneeksi, joka on toteutettu switch-case -rakenteella. Jokaisella ohjelmakierroksella koodista suoritetaan se osuus, jonka case vastaa laitteen sen hetkistä tilamuuttujan arvoa. Tilakoneen tiloja havainnollistava tilakaavio on esitetty kuviossa 15.



KUVIO 15. Mikro-ohjaimen tilakaavio

Tila 1 on alustustila, josta laite käynnistyy ja johon laite palaa jokaisen laukaisun jälkeen. Tässä tilassa kaikki ohjauselektronikkalohkolta ulos vietävät signaalit vedetään alatilaan ja punainen ledi sytytetään sen merkiksi, että laite ei ole vielä valmis laukaistavaksi. Laitteen tilamuuttuja muutetaan arvoon 2, minkä jälkeen ohjauselektronikka suorittaa kahden sekunnin mittaisen viiveen. Viiveen tarkoituksena on laitteen käynnistyessä sekä erityisesti laukaisun jälkeen antaa järjestelmälle aikaa tasaantua. Ilman viivettä tehdyissä koelaukauksissa ohjauselektronikan toiminta häiriintyi laukaisun jälkeen. Tämä johtui mahdollisesti laitteen puutteellisesta ja heikosta maarakenteesta, jonka vuoksi laukaisun yhteydessä voi esiintyä vaikeasti ennalta arvattavia maavirtoja, jotka vaikuttavat mikro-ohjaimen toimintaan.

Tila 2 on laukaisukondensaattorin varaustason tarkkailutila. Tästä tilasta laite voi mennä tiloihin 3, 4 tai 9 riippuen kondensaattorin varauksesta sekä ajasta, jonka laite on yrittänyt ladata kondensaattoria. Varausta tarkkaillaan analogiseen sisääntulopinniin tuotavalla jännitteellä, joka laukaisupiirilohkon jännitteenjakokytkennän vuoksi on kuudestoistaosa laukaisukondensaattorin todellisesta jännitteestä. Pinni tunnistaa jännitteen, joka on 0 V:n ja 3,3 V:n välillä ja skaalaa sen arvoalueelle 0,0 – 1,0. Kondensaattorilla oleva jännite voidaan siis laskea kertomalla analogisen sisääntulon antama arvo ensin 3,3:lla, jolloin saadaan pinnillä oleva jännite, ja kertomalla se sen jälkeen 16:lla, jolloin laukaisupiirin jännitteenjaon tekemä skaalaus on otettu huomioon. Tilamuuttuja vaihdetaan arvoon 4 jos pinnin antama lukema on suurempi tai yhtä suuri kuin 0,956. Tämä vastaa laukaisukondensaattorin jännitetasoa 51 V. Edellä esitetyn laskennan perusteella vertailuarvoksi saadaan 0,966, mutta arvoa jouduttiin testien jälkeen muuttamaan yhdellä sadasosalla. Syynä tähän on se, että laukaisupiirin jännitteenjaon vastusarvot poikkeavat hiukan niiden nimellisarvoista. Ennen tilasta 2 poistumista mikro-ohjain antaa myös signaalin, joka kytkee jännitelähdelohkon hakkuriteholähteen pois päältä.

Tilamuuttuja vaihdetaan arvoon 3, jos laukaisukondensaattorin jännitetieto ei ole halutulla tasolla. Tällöin myös annetaan signaali, joka kytkee hakkuriteholähteen päälle. Teholähteen käynnistymiskertojen määrästä pidetään kirjaa laskurimuuttujalla, jonka arvoa kasvatetaan ennen tilaan 3 siirtymistä. Laskuri nollataan samalla, kun kondensaattorin jännite on halutulla tasolla, mutta mikäli laskurin arvo nousee kymmeneen asti, laitteen tilaksi asetetaan 9. Tila 9 on virhetila, jossa laite lopettaa normaali toimintansa, pitää kaikki ohjauselektronikalta ulos vietävät signaalit alatilassa ja vilkuttaa molempia ledejä 0,5 Hz:n taajuudella. Tämän tilan tarkoituksena on estää laitetta yrittämästä teholähteen käynnistämistä tapauksessa, jossa laukaisukondensaattorin latautuminen on kestänyt liian kauan, esimerkiksi laitteen paristojen ollessa liian heikot laitteen normaalitoiminnan ylläpitämiseksi.

Tila 3 on yhden sekunnin viive, jonka jälkeen laite ohjataan takaisin tilaan 2. Toisin sanoen laukaisukondensaattorin varaustaso tarkastetaan sekunnin välein, ja maksimi latausaika on kymmenen sekuntia. Tilan 3 aluksi teholähteen

käynnistämissignaali asetetaan alatilaa. Laitteen ohjaussignaali on määritetty 10 ms:n mittaisiksi.

Tilassa 4 laite on valmis laukaistavaksi. Punainen ledi sammutetaan, ja vihreä ledi sytytetään tämän merkiksi. Tämän jälkeen ohjelma siirtyy silmukkaan, jossa tarkkaillaan sekä kondensaattorin varaustasoa, että liipaisinpainiketta. Laite siirtyy takaisin tilaan 2, jos kondensaattorin varaus laskee arvoon 50 V. Jos liipaisinta painetaan, laite siirtyy tilaan 5.

Tila 5 on laukaisuviive, jonka tarkoitus on estää tahattomia laukaisuja. Tässä tilassa ohjelma odottaa 1,2 sekuntia, jonka aikana vilkutetaan molempia ledejä 5 Hz:n taajuudella. Ledien toiminnan on tarkoitus herättää käyttäjän huomio siihen, että liipaisin on painettu alas. Mikäli liipaisin päästetään ylös ennen kuin 1,2 s on kulunut, tilamuuttuja asetetaan takaisin arvoon 4. Jos liipaisinta pidetään painettuna 1,2 s:n ajan, laite siirtyy tilaan 6.

Tila 6 käsittää sähkömagneettisen kiihdyttimen laukaisun. Mikro-ohjain nostaa laukaisukomentoa vastaavan signaalin ylätilaan 100 ms:n ajaksi. Tämän jälkeen hakkuriteholähteen pois päältä kytkävä signaali nostetaan varmuuden vuoksi ylätilaan, jotta laukaisun aiheuttamat maavirrat eivät saa aikaan tehölähteen tarkoituksetonta käynnistymistä. Lopuksi ohjelma vaihtaa tilamuuttujan takaisin arvoon 1.

Switch-case -rakenteessa on myös Default-osio johon ohjelma menee, mikäli tilamuuttuja ei vastaa mitään koodiin kirjoitetuista tiloista. Tässä tapauksessa laite ohjataan tilaan 9, eli virhetilaan. Ohjausyksikön toimiessa normaalisti ohjelma ei koskaan mene Default-osioon. Se on kuitenkin lisätty ohjelmaan mahdollisten toimintahäiriöiden varalta, jotta ohjauselektronikka ei jää hallitsemattomasti väärään tilaan häiriön jälkeen.

5 PROJEKTIN ONNISTUMINEN JA ARVIOINTI

Työn onnistumista voidaan arvioida sille asetettujen tavoitteiden saavuttamisen kautta. Pää tavoitteiksi määritettiin sähkömagneettisten ilmiöiden tutkiminen sekä niitä hyödyntävän laitteen, sähkömagneettisen kiihdyttimen, suunnittelu ja rakentaminen. Tavoitteet liittyivät läheisesti toisiinsa siten, että laitteen rakentaminen edellytti sähkömagneetteihin perehtymistä teoreettisella tasolla, kun taas valmiin laitteen testaus havainnollisti niitä käytännön tasolla. Tavoitteiden saavuttaminen edellytti luonnollisesti myös elektroniikan ja sähköopin ymmärrystä riittävällä tasolla itse laitteen suunnittelun ja rakentamisen toteuttamiseksi. Koska sähkömagneettinen kiihdytin on erittäin kokeellisella tasolla oleva prototyyppi, oli projektissa myös varauduttava erilaisiin ongelmatilanteisiin ja haasteisiin, joiden selvittämistä voidaan myös pitää yhtenä projektin tavoitteista.

5.1 Projektin aikana ilmenneet haasteet

Sähkömagneettisen kiihdyttimen suunnitteluvaiheessa suurimpana haasteena oli laitteen toiminta-ajatuksen muuntaminen toteutettavissa olevaan muotoon. Sähkömagneettisen vetovoiman hyödyntäminen on yleisesti tunnettua teknologiaa esimerkiksi sähkömoottoreissa, mutta sen käyttäminen tämän tyyllisessä sovelluksessa on huomattavasti vähemmän tutkittu ja dokumentoitu asia. Vaikka laitteen peruseriaate oli alusta asti selvä, sen toteutuksen suunnittelu vaati huomattavan määrän työtunteja. Tämän lisäksi suunnitelmien toimivuudesta oli vaikea varmistua ennen ensimmäisten laukaisukäämien ja alustavien laukaisupiirien rakentamista. Suuri osa työhön varatusta ajasta kului mahdollisten toimintatapojen ja käytettävissä olevien tekniikoiden kartoittamiseen.

Muita projektin etenemistä hidastavia asioita esiintyi projektin keskivaiheilla, kun valmiiksi todettu hakkuriteholähde lakkasi yllättäen toimimasta. Syyksi tähän osoittautui alimitoitettu hakkurinohjauspiiri, joka ennen lopullisesti käyttöön valittua LT1070HVCT:tä oli tämän vähemmän virtaa kestävä versio LT1072CT. LT1072CT:n kytkimen virrankestoksi oli ilmoitettu 1,25 A, jonka alustavien simulaatioiden mukaan piti olla riittävä sähkömagneettisessa kiihdyttimessä

käytettäväksi (Linear Technology 2014b). Jännitelähde toimi useamman päivän ajan LT1072CT:llä, mutta jossakin vaiheessa komponentti oli vaurioitunut siten, ettei jännitelähde toiminut käynnistettäessä enää lainkaan. Syytä vaurioitumiselle ei pystytty varmistamaan, mutta todennäköisesti jännitelähteen käynnistyksen yhteydessä saattaa esiintyä virtapiikkejä, jotka olivat liian korkeita LT1072CT:n kytkimelle. Tämä vikatilanne aiheutti laitteen rakentamiselle ja testaamiselle viivettä, sillä uuden ja tehokkaamman hakkurinohjauspiirin tilaaminen kesti noin kaksi viikkoa. Vikaantumisen jälkeen käytössä olleen LT1070HVCT:n virran kestoksi on ilmoitettu vähintään 5 A, ja se on toiminut moitteettomasti (Linear Technology 2014a, 3).

Toinen projektia hidastanut ja eniten projektin alkuperäistä suunnitelmaa muuttanut ongelmatilanne ilmeni projektin loppuvaiheilla ohjauselektronikkalohkoa rakennettaessa. Alkuperäisen suunnitelman mukaan ohjauselektronikkalohko tuli toteuttaa Lattice Semiconductorin ispLSI 1016 -ohjelmoitavalla piirillä (Lattice Semiconductor 2010). Ohjelmoitavat piirit ovat elektronisia komponentteja, joissa yhdistyy logiikka-, sekä muistikomponentin ominaisuudet. Tehtaalta valmistuessaan ohjelmoitavat piirit eivät suorita mitään toimintoja, sillä niitä ei ole vielä ohjelmoitu. Muista mikropiireistä, kuten mikro-ohjaimista, poiketen ohjelmoitavien piirien logiikka ei kuitenkaan ole tallennettu ohjelmakoodiin, vaan itse piirin fyysiseen rakenteeseen. (Wikipedia 2014c.) Tämä voisi teoriassa tarjota ohjauselektronikalle korkeamman sietokyvyn laitteen laukaisun yhteydessä syntyviä voimakkaita magneettikenttiä vastaan.

IspLSI 1016 on kuitenkin melko vanha komponentti, jonka valmistaminen on lakkautettu ja jonka ohjelmointimahdollisuudet Lahden ammattikorkeakoululla ovat hyvin rajalliset. Ongelmatilanne ilmeni, kun ainoa LAMK:n täysin toiminnassa oleva ispLSI 1016:n ohjelmointiin kykenevä tietokone vikaantui ohjauselektronikkalohkon testausvaiheessa. Nopean tilannekatsauksen jälkeen ohjelmoitavan piirin käytöstä sähkömagneettisen kiihdyttimen yhteydessä luovuttiin, ja se korvattiin Mbed NXP LPC1768 -mikro-ohjaimella. Tämä muutos vaati täysin uuden ohjauselektronikkalevyn suunnittelun ja rakentamisen, mutta helppokäyttöisen Mbed -mikro-ohjaimen tapauksessa levystä tuli pieni ja nopeasti rakennettava. Ohjelmoitavaa piiriä huomattavasti kalliimman Mbed:n käyttö lisäsi

laitteen rakentamisen kokonaiskustannuksia, mutta sen avulla ohjauselektroniiikan viimeistelystä tuli tehokasta ja nopeaa.

Ohjelmoitava piiri oli tarkoitus ohjelmoida VHDL-kielellä. Osittain testattu VHDL-versio sähkömagneettisen kiihdyttimen ohjauselektroniiikan logiikasta on liitteessä 3. VHDL-koodi seuraa lähes täysin samaa rakennetta kuin kuviossa 15 esitetty mikro-ohjaimen tilakaavio.

5.2 Sähkömagneettisen kiihdyttimen suorituskyky

Lopullisessa kokoonpanossa olevan sähkömagneettisen kiihdyttimen suorituskykyä voidaan arvioida laitteen toiminnan virheettömyyden sekä ammuksina toimivien metallikappaleiden lähtönopeuden perusteella. Laitetta testattiin laukaisemalla se 30 kertaa peräkkäin ilman uudelleenkäynnistyksiä.

Toiminnan virheettömydessä laite täytti kaikki sille asetetut tavoitteet. 30 laukaisusta jokainen onnistui, eikä laitteen toiminnassa esiintynyt mitään häiriötilanteita. Ensimmäisen testisarjan jälkeen yksi laitteen paristoista korvattiin lähes tyhjäksi kuluneella paristolla, minkä jälkeen uusi testisarja aloitettiin. Laite meni odotetusti ja hallitusti virhetilaan. Laukaisuja tehtiin kolmella eri ammuksella ja ammuksen tarkkaa lähtöpaikkaa vaihdeltiin laukaisukäähin sisällä parhaan lähtöpaikan määrittämiseksi. Parhaaksi lähtöpaikaksi osoittautui asetelma, jossa ammuksen pituudesta 20 % on laukaisukäähin sisällä. Laukaisukäähin putki viimeisteltiin leikkaamalla se sopivan mittaiseksi 4 cm pitkän ammuksen laukaisua varten ja tukkimalla sen takaosa.

Testeissä käytetyt ammukset olivat 4 cm pitkiä. Painavimpana ammuksena käytettiin 17,2 g painavaa, halkaisijaltaan 9,6 mm:stä kierretankoa. Toinen käytetyistä ammuksista oli 4,8 g painava 5,5 mm:n ruuvi ja kevyin ammuksista oli 2,1 g painava 2 mm:n naula. Ammusten lähtönopeuden arvioimiseksi on käytetty kaavaa, joka laskee ammuksen keskinopeuden sen lentomatkan ja -ajan perusteella (kaava 5). Lennon aikana ilmanvastus pienentää ammuksen nopeutta, mutta koska lyhyellä matkalla nopeuden muutos voidaan arvioida melko pieneksi, on ilmanvastuksen osuus jätetty pois kaavasta kaavan yksinkertaistamiseksi.

$$v_a = \frac{l}{\sqrt{h \cdot \frac{2}{g}}} \quad (5)$$

Kaavassa v_a on ammuksen vaakatasossa tapahtuvan liikkeen keskinopeus ja l on matka, jonka ammus liikkui ennen lattiaan osumista. Jakoviivan alla oleva termi laskee ammuksen lentoajan lähtökorkeuden h sekä maan painovoimakiihtyvyyden $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ avulla. Tällä menetelmällä ammusten keskinopeudet voidaan arvioida laukaisemalla laite ennalta tunnetulta korkeudelta ja tarkkailemalla kohtaa lattiassa, johon ammus ensimmäisenä osuu. Pienen ilmanvastuksen ja lyhyen lentoajan vuoksi keskinopeuksia voidaan käytännössä pitää lähtönopeuksina.

Koelaukaisut suoritettiin siten, että laukaisukäämi oli vaakatasossa 78,5 cm:n korkeudella lattiasta. Ammusten lentomatkat ja niistä lasketut keskinopeudet on dokumentoitu taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Sähkömagneettisen kiihdyttimen laukaisunopeudet

Ammus	Lentomatka	Keskinopeus	Paino	Ammuksen liike-energia
Kierretanko	2,54 m	6,35 m/s	17,2 g	347 mJ
Ruuvi	3,00 m	7,50 m/s	4,8 g	135 mJ
Naula	3,29 m	8,22 m/s	2,1 g	71 mJ

Taulukossa 1 on myös esitetty eri ammuksien liike-energiat, eli kineettiset energiat, jotka ne saavuttavat laukaisun yhteydessä. Koska ennen laukaisua ammuksien ovat lepotilassa, eikä niillä siten ole liike-energiaa, voidaan kineettisen energian kaavalla arvioida sähkömagneettisen kiihdyttimen laukaisun aikana liikkeeksi muuttuvan energian määrä. Kineettisen energian laskemiseksi on käytetty kaavaa 6, jossa m on kappaleen massa ja v on sen nopeus (Physicsclassroom 2014).

$$KE = 1/2 * m * v^2 \quad (6)$$

Tuloksista nähdään sähkömagneettisen kiihdyttimen antaman liike-energian olevan sitä suurempi, mitä painavampi laukaistava kappale on. Tämä johtuu

raskaampien ammusten suuremmasta koosta. Kaavasta 1 voidaan lukea solenoidin ydinaineen permeabiliteetin merkitys magneettivuon tiheyden suuruudelle. Tässä sovelluksessa solenoidin ydin koostuu kulloisenakin hetkenä käämin sisällä olevan ammuksen osan metallista sekä sitä ympäröivästä ilmasta.

Ammusmetallien permeabiliteetti voi olla tuhansia kertoja ilman permeabiliteettia korkeampi (Wikipedia 2014b). Kooltaan suurempi ammus täyttää suuremman osan käämin ytimeistä korkean permeabiliteetin metallilla, joten suurempia ammuksia laukaistaessa laukaisukäämin sähkömagneettinen kenttä on voimakkaampi.

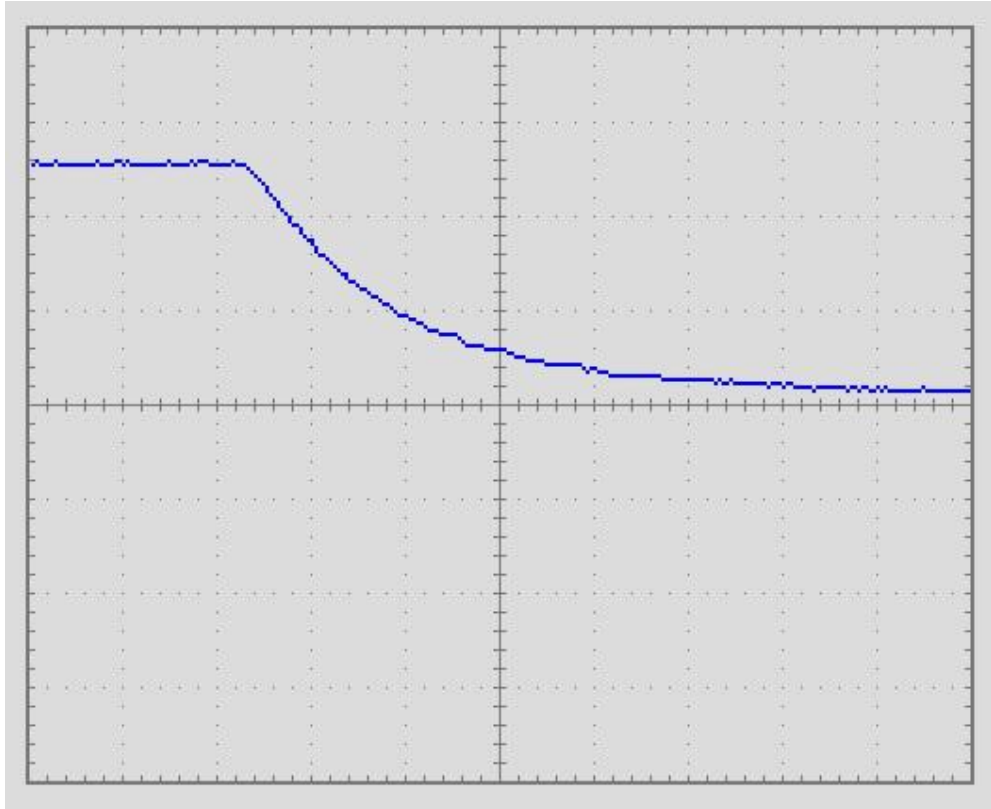
5.3 Arvio laukaisukäämin magneettivuon tiheydestä

Laukaisukäämin tuottaman magneettivuon tiheyttä voidaan arvioida kaavan 1 avulla. Tarkkaan arvoon ei käytettävissä olevilla tiedoilla päästä, sillä laukaisukäämin suhteellinen permeabiliteetti on tuntematon. Myös laukaisuvirran suuruuden tarkka arvo voi poiketa alla olevista luvuista, joten tässä luvussa esitetyt laskelmat on käsiteltävä suuntaa antavina arvioina.

Ilman ja muoviputken suhteellinen permeabiliteetti on lähelle arvoa 1, joten ilman ammusta laukaistuna laukaisukäämin suhteellinen permeabiliteetti voidaan arvioida olevan 1. Laukaisun aikana käämin läpi kulkeva virta voidaan puolestaan arvioida ohmin lain avulla (kaava 3), jossa resistanssiksi sijoitetaan laukaisukäämin impedanssi, eli sen resistanssin ja reaktanssin summa. Käämin resistanssiksi on mitattu 250 mΩ, ja kondensaattorilta käämille johtavien kuparikaistaleiden resistanssiksi 200 mΩ. Reaktanssi, eli vaihtovirtaa vastustava komponentti, voidaan laskea reaktanssin kaavalla (kaava 7), jossa L on käämin induktanssi ja f on siinä kulkevan virran taajuus (Electronics Tutorials 2014).

$$X_L = 2f\pi L \quad (7)$$

Laukaisukäämin induktanssiksi on mitattu 166 μH. Laukaisuvirran taajuus voidaan arvioida kuviosta 16, jonka kuvaaja esittää laukaisukondensaattorin purkautumista laukaisun yhteydessä.



KUVIO 16. Laukaisukondensaattorin purkautuminen laukaisun aikana

Kuviossa 16 jännitteen maataso on kuvion keskellä ja jokainen ruutu pystysuunnassa vastaa 20 V:n jännitettä maatasoon nähden. Vaakasuunnassa jokainen ruutu vastaa 2 ms:n aikaa. Kuvaajasta luettuna jännite laskee 12 ms aikana huippuarvosta sen alhaisimpaan arvoon – tätä voidaan pitää virtapulssin puolijaksona. Kertomalla tämän puolijakson aika kahdella, saadaan lasketuksi laukaisuvirtapulssin teoreettinen jaksonaika, jonka käänteisluku on sen teoreettinen taajuus. Taajuudeksi saadaan siis noin 42 Hz. Kaavalla 7 saadaan lasketuksi laukaisukäämin reaktanssin arvo, joka pyöristettynä on 44 mΩ. Kun tähän lisätään käämin ja kuparikaistaleiden resistanssit, saadaan laukaisukäämin impedanssiksi 494 mΩ.

Laukaisuvirta pienenee laukaisun aikana, mutta korkeimmillaan virta on laukaisun alussa, kun jännite on noin 50 V. Tällöin laukaisuvirta voidaan kaavan 3 avulla arvioida noin 100 A:n suuruiseksi.

Laukaisukäämin pituus on 4 cm ja sen kierrosluku 200. Sijoittamalla näiden lisäksi tässä luvussa lasketut virta- ja permeabiliteettiarvot kaavaan 1, saadaan

laukaisukäämin suurimman magneettivuon tiheyden arvoksi 628 mT. Arvo vastaa noin puolta neodyymistä valmistetun kestmagneetin magneettivuon tiheydestä (Wikipedia 2014g). Tämä arvo kuitenkin pitää paikkansa vain ilman ammusta suoritettuna laukaisun yhteydessä. Ammuksen metalli nostaa kaavaan 1 sijoitettavan suhteellisen permeabiliteetin arvoa, joka puolestaan nostaa magneettivuon tiheyttä samassa suhteessa, todennäköisesti usean teslan suuruiseksi. Arvoa 628 mT voidaan pitää kohtalaisen korkeana ilmasydämisellä solenoidilla aikaansaadun magneettivuon tiheyden arvoksi.

5.4 Jatkokehitysmahdollisuudet

Tässä työssä aikaansaatu sähkömagneettinen kiihdytin on rajallisessa ajassa ja hyvin rajallisilla resursseilla tehty laite, jonka päätarkoituksena on tuoda esiin haluttuja fysikaalisia ilmiöitä ja demonstroida laitteen toiminnan periaatteet. Laitteen suorituskyky ja sen optimoiminen oli toissijainen tavoite, johon perehdyttiin muun työn ohessa. Näin ollen laitteen toiminnasta voisi jatkokehittelyllä saada entistä suorituskykyisempää, sujuvampaa ja energiatehokkaampaa.

Suorituskyvyn, eli käytännössä laukaistavien kappaleiden lähtönopeuden, parantaminen liittyy kaavan 1 osoittamiin asioihin. Kuten aiemmin on todettu, kappaleiden kiihtyvyyteen vaikuttaa laitteen tuottaman magneettivuon tiheyden suuruus. Tämän kasvattaminen onnistuu teoriassa rajattomasti kasvattamalla joko laukaisuvirran suuruutta, tai laukaisukäämin kierroslukua. Käytännössä tähän päästään kehittyneempien komponenttien ja tehokkaampien käämimismenetelmien avulla. Eräs suunnitteluvaiheessa mukana ollut idea oli rakentaa laitteeseen useita peräkkäisiä laukaisukäämejä. Tällöin jokaisella käämillä olisi ollut oma laukaisukondensaattori, joista niihin varastoitunut energia olisi vapautettu nopeassa tahdissa peräkkäisiin käämeihin. Teoriassa jokainen käämi olisi siirtänyt enemmän energiaa jo valmiiksi liikkuvaan ammukseseen, jolloin ammuksen nopeus olisi kasvanut entisestään.

Laitteen sujuvampaa käyttöä ajatellen uusien ja pysyvämpien kotelointiratkaisujen kehittäminen on tarpeen. Kunnollisen paristokotelon, kestävästä materiaalista valmistetun ulkokuoren ja pitävämpien kiinnitysten myötä sähkömagneettisesta

kiihdyttimestä saisi valmiimman ja viimeistellymmän laitteen. Laitteen tämänhetkinen kotelo koostuu paksusta pahvista valmistetusta rasiasta, johon eri lohkot on kiinnitetty ja jonka pintaan on tehty läpiviennit virtakytkimelle, liipaisinpainikkeelle ja merkkiledeille. Kotelon sivussa on aukko, josta laukaisukäämin putki on näkyvissä. Tällaisen koteloinnin tarkoitus on ennen kaikkea koota laitteen eri lohkot yhteen, jolloin niiden kuljetus ja säilytys on helpompaa.

6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä magnetismiin sekä tutkia sähkömagneettisen vetovoiman tarjoamia mahdollisuuksia käytännön sovelluskohteessa, joka tässä tapauksessa oli sähkömagneettinen kiihdytin. Lopputuloksena opinnäytetyö tuotti valmiin prototyypin laitteesta, joka täyttää työn alussa kyseiselle laitteelle määritellyt vaatimukset.

Työn ensimmäinen vaihe sisälsi laitteen perustana toimivaan fysiikkaan tutustumisen sekä laitteen elektronisen toiminnan peruseriaatteiden hahmottamisen. Tämän jälkeen oli vuorossa varsinainen suunnitteluosuus, jossa laitteen kolme lohkoa suunniteltiin erillisiksi elektronisiksi laitteiksi. Suunnittelujen jälkeen jännitelähdelohko ja laukaisupiirilohko rakennettiin, jotta laitteen testaus saatiin käyntiin. Kolmas lohko, eli laitteen automatiikasta huolehtiva ohjauselektroniikkalohko, rakennettiin vasta työn loppuvaiheissa, sillä tämän lohkon toiminta oli toissijaista muiden lohkojen toiminnan testaamiselle.

Lopuksi laitteen suorituskykyä tarkkailtiin ja dokumentoitiin. Valmiin sähkömagneettisen kiihdyttimen oli tarkoitus kiihdyttää sen sisään asetettu metallikappale suurella nopeudella ulos laitteesta. Kiihdytettyjen kappaleiden nopeudelle ei työn alussa asetettu tavoitearvoja, sillä laitteen onnistumista oli mahdotonta arvioida ilman ennakkotapauksia. Laukaisujen yhteydessä esiintyviä nopeuksia voidaan pitää onnistuneina, jos ammuksen selvästi poistuvat laitteen vaikutuspiiristä. Tätä tarkastelua vasten laitteen suorituskyky on riittävä. Laitteen käytön tuli myös olla helppoa ja pitkälle automatisoitua, ja tässä tavoitteessa työ onnistui erittäin hyvin.

Työn tekijän henkilökohtainen mielipide työstä on erittäin positiivinen. Sähkömagneettisen kiihdyttimen suunnittelu ja rakentaminen osoittautui hyvin mielenkiintoiseksi ja monessa mielessä haastavaksi projektiksi, joka auttoi sisäistämään paitsi sähkömagneettisia ilmiöitä, myös elektroniikan eri osa-alueita entistä paremmin. Laitteen suorituskyky täyttää työn tekijän henkilökohtaiset odotukset.

LÄHTEET

Allaboutcircuits. 2014. Permanent magnets [viitattu 15.1.2014].

Saatavissa: http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_14/1.html

Circuitstoday. 2011. Basics of Microcontrollers [viitattu 19.3.2014].

Saatavissa: <http://www.circuitstoday.com/basics-of-microcontrollers>

Electronics Tutorials. 2014. Inductive Reactance [viitattu 2.4.2014].

Saatavissa: <http://www.electronics-tutorials.ws/inductor/ac-inductors.html>

Fairchildsemi. 2013. LM78XX/LM78XXA [viitattu 18.2.2014].

Saatavissa: <http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM7805.pdf>

Hyperphysics. 2014. Ferromagnetism [viitattu 15.1.2014].

Saatavissa: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/ferro.html#c1>

Kitronik. 2014. How a Darlington pair transistor works [viitattu 19.2.2014].

Saatavissa: <http://www.kitronik.co.uk/resources/understanding-electronics/how-a-darlington-pair-transistor-works>

Lattice Semiconductor. 2010. ispLSI 1016 Device Datasheet [viitattu 27.3.2014].

Saatavissa:

<http://www.latticesemi.com/~media/Documents/DataSheets/ispLSI/ispLSI1016DataSheet.PDF#search=%221016%22>

Linear Technology. 2014a. LT1070/LT1071 [viitattu 3.3.2014].

Saatavissa: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/10701fe.pdf>

Linear Technology. 2014b. LT1072 [viitattu 27.3.2014].

Saatavissa: <http://www.linear.com/product/LT1072#overview>

Mbed. 2014a. mbed LPC1768 [viitattu 20.3.2014].

Saatavissa: <https://mbed.org/platforms/mbed-LPC1768/>

Mbed. 2014b. mbed Microcontrollers [viitattu 20.3.2014].

Saatavissa: <https://mbed.org/handbook/mbed-Microcontrollers>

Physicsclassroom. 2014. Kinetic Energy [viitattu 31.3.2014].

Saatavissa: <http://www.physicsclassroom.com/class/energy/Lesson-1/Kinetic-Energy>

Pohjolainen, S. 2001. 307 Kytcentää. Juva: Helsinki Media OY.

Silvonen, K. 2009. Elektroniikka ja puolijohdekomponentit. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press.

STMicroelectronics. 2006. STPS8H100 [viitattu 5.3.2014].

Saatavissa: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00001293.pdf>

STMicroelectronics. 2013. TYN640RG [viitattu 13.3.2014].

Saatavissa: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00001992.pdf>

Techopedia. 2014. State Machine [viitattu 24.3.2014].

Saatavissa: <http://www.techopedia.com/definition/16447/state-machine>

Tieteentermipankki. 2014. Pienoisjännite [viitattu 11.2.2014].

Saatavissa:

<http://tieteentermipankki.fi/wiki/S%C3%A4hk%C3%B6tekniikka:pienoisj%C3%A4nnite>

Wikipedia. 2014a. Electromagnet [viitattu 15.1.2014].

Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnet>

Wikipedia. 2014b. Permeability (electromagnetism) [viitattu 23.1.2014].

Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_\(electromagnetism\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism))

Wikipedia. 2014c. Programmable logic device [viitattu 27.3.2014].

Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_logic_device

Wikipedia. 2014d. Solenoid [viitattu 16.1.2014].

Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solenoid>

Wikipedia. 2014e. Stripboard [viitattu 12.2.2014].

Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Stripboard>

Wikipedia. 2014f. Switched-mode power supply [viitattu 20.2.2014].

Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/Switched-mode power supply](http://en.wikipedia.org/wiki/Switched-mode_power_supply)

Wikipedia. 2014g. Tesla (unit) [viitattu 2.4.2014].

Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla \(unit\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_(unit))

LIITE 2/1. Ohjauselektroniikan ohjelmakoodi

```
#include "mbed.h"
```

```
AnalogIn charge(p15);
```

```
DigitalIn trigger(p30);
```

```
DigitalOut boost_off(p12);
```

```
DigitalOut boost_on(p13);
```

```
DigitalOut launch(p14);
```

```
DigitalOut g_led(p28);
```

```
DigitalOut r_led(p29);
```

```
int main() {
```

```
    int state = 1;
```

```
    int launch_delay_counter = 0;
```

```
    int boost_on_counter = 0;
```

```
    while (1){
```

```
        switch(state){
```

```
            case 1: // Initialization
```

```
                boost_off = 0;
```

```
                boost_on = 0;
```

```
                launch = 0;
```

```
                g_led = 1;
```

```
                r_led = 0;
```

```
                state = 2;
```

```
                wait(2);
```

```
            break;
```

LIITE 2/2.

```
case 2: // Check charge
    if(charge >= 0.956){
        boost_off = 1;
        boost_on_counter = 0;
        state = 4;
    }
    else{
        if(boost_on_counter >= 10){
            boost_on_counter = 0;
            state = 9;
        }
        else{
            boost_on = 1;
            boost_on_counter++;
            state = 3;
        }
    }
    break;
```

```
case 3: // Charge wait
    wait(0.01);
    boost_on = 0;
    wait(0.99);
    state = 2;
    break;
```

LIITE 2/3.

```
case 4: // Launch ready
    r_led = 1;
    g_led = 0;
    wait(0.01);
    boost_off = 0;
    while(g_led == 0){
        wait(0.1);
        if(trigger == 0){
            state = 5;
            g_led = 1;
        }
        if(charge < 0.945){
            state = 2;
            g_led = 1;
            r_led = 0;
        }
    }
    break;
```


LIITE 2/4.

```
case 5: // Launch delay
    while((launch_delay_counter < 120) && (trigger == 0)){
        wait(0.01);
        launch_delay_counter++;
        if((launch_delay_counter % 20) == 0){
            g_led = 1;
            r_led = 0;
        }
        else if((launch_delay_counter % 10) == 0){
            g_led = 0;
            r_led = 1;
        }
    }
    launch_delay_counter = 0;
    if(trigger == 0){
        state = 6;
    }
    else{
        state = 4;
    }
}
break;
```

```
case 6: // Launch
    launch = 1;
    wait(0.1);
    launch = 0;
    boost_off = 1;
    wait(0.1);
    state = 1;
}
break;
```

LIITE 2/5.

```
case 9: // Charging error
    boost_off = 1;
    wait(0.01);
    while(1){
        boost_off = 0;
        boost_on = 0;
        launch = 0;
        g_led = 0;
        r_led = 0;
        wait(1);
        g_led = 1;
        r_led = 1;
        wait(1);
    }

default: // Unexpected event
    state = 9;
    break;
}
}
```

LIITE 3/1. Ohjauselektroniikan ohjelmakoodi VHDL-kielellä

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity main is
port (CHARGE,CLK,TRIGGER : in bit;
      B_OFF,B_ON,G_LED,R_LED,LAUNCH : out bit);
end main;

architecture structure of main is
signal INNER_LOOP, OUTER_LOOP, SEC_LOOP : integer range 1 to 100;
signal STATE : integer range 1 to 7;
begin
process (CLK, CHARGE, TRIGGER)
begin
if (CLK 'event AND CLK = '1') then

if (STATE = 1) then
    INNER_LOOP <= 1;
    OUTER_LOOP <= 1;
    SEC_LOOP <= 1;
    B_OFF <= '0';
    B_ON <= '0';
    G_LED <= '1';
    R_LED <= '1';
    LAUNCH <= '0';
    STATE <= 2;

elsif (STATE = 2) then
    B_ON <= '1';
    if (CHARGE = '1') then
        STATE <= 4;
```

LIITE 3/2

```
else
    STATE <= 3;
end if;

elsif (STATE = 3 or STATE = 4) then
    if (INNER_LOOP < 100) then
        INNER_LOOP <= INNER_LOOP + 1;
    elsif (INNER_LOOP = 100) then
        B_ON <= '0';
        B_OFF <= '0';
        G_LED <= '1';
        R_LED <= '0';
        INNER_LOOP <= 1;
        OUTER_LOOP <= OUTER_LOOP + 1;
    end if;
    if (OUTER_LOOP = 100) then
        OUTER_LOOP <= 1;
        SEC_LOOP <= SEC_LOOP + 1;
    end if;
    if (SEC_LOOP = 100) then
        INNER_LOOP <= 1;
        OUTER_LOOP <= 1;
        SEC_LOOP <= 1;
        if (STATE = 4) then
            STATE <= 5;
            B_OFF <= '1';
        else
            STATE <= 2;
        end if;
    end if;
end if;
```

LIITE 3/3

```
elsif (STATE = 5) then
  if (INNER_LOOP < 100) then
    INNER_LOOP <= INNER_LOOP + 1;
  elsif (INNER_LOOP = 100) then
    B_ON <= '0';
    B_OFF <= '0';
    G_LED <= '0';
    R_LED <= '1';
    INNER_LOOP <= 1;
    if (TRIGGER = '0' and CHARGE = '1') then
      STATE <= 6;
    elsif (CHARGE = '0') then
      STATE <= 2;
    end if;
  end if;
end if;

elsif (STATE = 6) then
  if (SEC_LOOP = 0 or SEC_LOOP = 40 or SEC_LOOP = 80) then
    G_LED <= '0';
    R_LED <= '0';
  elsif (SEC_LOOP = 20 or SEC_LOOP = 60 or SEC_LOOP = 100) then
    G_LED <= '1';
    R_LED <= '1';
  end if;
  if (INNER_LOOP < 100) then
    INNER_LOOP <= INNER_LOOP + 1;
  elsif (INNER_LOOP = 100) then
    B_ON <= '0';
    B_OFF <= '0';
    INNER_LOOP <= 1;
    if (TRIGGER = '1') then
```

LIITE 3/4

```
STATE <= 5;
OUTER_LOOP <= 1;
else
  OUTER_LOOP <= OUTER_LOOP + 1;
end if;
end if;
if (OUTER_LOOP = 100) then
  OUTER_LOOP <= 1;
  SEC_LOOP <= SEC_LOOP + 1;
end if;
if (SEC_LOOP = 100 and TRIGGER = '0') then
  INNER_LOOP <= 1;
  OUTER_LOOP <= 1;
  SEC_LOOP <= 1;
  STATE <= 7;
end if;

elsif (STATE = 7) then
  if (INNER_LOOP < 100) then
    LAUNCH <= '1';
    INNER_LOOP <= INNER_LOOP + 1;
  elsif (INNER_LOOP = 100) then
    INNER_LOOP <= 1;
    LAUNCH <= '0';
    STATE <= 2;
  end if;
end if;
end if;
end process;
end structure;
```