



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Toni Sihvonen

ARM-KEHITYSALUSTAN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Tekniikka
2021

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Toni Sihvonen
Opinnäytetyön nimi	ARM-kehitysalustan suunnittelu ja toteutus
Vuosi	2021
Kieli	suomi
Sivumäärä	33 + 4 liitettä
Ohjaaja	Jani Ahvonen

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa ARM-pohjainen kehitysalusta, käyttäen STM32L152RET6-mikro-ohjainta.

Työ toteutettiin Vaasan ammattikorkeakoulun laboratoriolle, Technobothnialle, opetus- ja prototyyppikäyttöön. Laite sisälsi kaksi eri piirilevyä; adapterilevy ainoastaan mikro-ohjaimelle, ja emolevy adapterilevylle sekä muille komponenteille. Työssä käytettiin KiCad-työkalua, jolla tehtiin piirikaavio- sekä layout-suunnittelu. Testauksessa käytin henkilökohtaista tietokonettani.

Laite suunniteltiin laboratorion opetuskäyttöön niin, että tämä laite korvaisi tietotekniikan opetuksessa olevan Nucleo-152-levyn, jossa on myös STM32L152RET6-mikro-ohjain. Työhön saatiin toteutettua piirikaaviot, layout-kuvat, valmis adapterilevy sekä ensimmäinen iteraatio emolevystä. Toinen iteraatio emolevystä olisi sisältänyt SMD-komponentteja THT-komponenttien sijasta.

ABSTRACT

Author	Toni Sihvonen
Title	Design and implementation of an ARM-development board
Year	2021
Language	Finnish
Pages	33 + 4 Appendices
Name of Supervisor	Jani Ahvonen

The objective of this thesis was to design and implement an ARM based development board using a STM32L152RET6 micro controller. This development board would replace the current development board, Nucleo-152, which is currently in use in the study programme of information technology. The Nucleo-152 development board also uses the STM32L152RET6 micro controller.

This development board included two different circuit boards; an adapter board only for the micro controller unit, and a motherboard for the adapter board and the rest of the components. The design tool used for this thesis was called KiCad, which was used to produce the schematics and layout designs for both the adapter board and the motherboard. For testing purposes of the adapter board, a personal computer was used.

The finished thesis includes the schematics, layout designs, adapter board and the first iteration of the motherboard. The second iteration would have included SMD components instead of THT components.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVALUETTELO

TERMIT JA LYHENTEET

1	JOHDANTO.....	8
2	TYÖN ALOITUS	9
	2.1 Lohkokaavio	9
	2.2 Vaatimusmäärittely.....	9
	2.3 STM32L152RET6-mikro-ohjain	10
	2.4 SMD-kolvausharjoittelu	11
	2.5 RC-piirin toiminta.....	12
	2.6 Bypass kondensaattorit	17
3	ADAPTERILEVY JA EMOLEVY.....	19
	3.1 Adapterilevy.....	19
	3.2 Adapterilevyn ohjelmointi ja testaus.....	20
	3.3 Emolevy.....	22
	3.3.1 Komponenttivalinnat	22
	3.3.2 Schematic-suunnittelu	27
	3.3.3 Layout-suunnittelu	29
4	YHTEENVETO	30
	LÄHTEET	31
	LIITTEET	34

KUVALUETTELO

Kuva 1. Kehitysalustan lohkokaavio.	9
Kuva 2. STM32L152RET6 1:100 suhdeviivaimen vierellä.	10
Kuva 3. Silta, joka aiheuttaa oikosulun toimivassa mikropiirissä.	11
Kuva 4. Komponentin hyvä liitos.	12
Kuva 5. RC-latauspiiri /15/.	14
Kuva 6. Kondensaattorin latauskäyrät viiden aikavakion aikana /15/.	15
Kuva 7. Adapterilevyn layout-kuva DIP64-standardissa.	20
Kuva 8. Ylösvetovastuksen kytkentä. Mitoituksessa sovellettu RC-piirin teoriaa.	23
Kuva 9. Piirikaavio, emolevy.	27
Kuva 10. KytKentä micro-USB:n, FT232RL:n ja mikro-ohjaimen välillä.	28
Kuva 11. KytKentä +12V DC jännitteestä +3,3V käyttöjännitteeksi.	34
Kuva 12. Adapterilevyn ensimmäinen iteraatio ilman standardimallia.	35
Kuva 13. Layout, Emolevy.	36
Kuva 14. Rotanpesä, Emolevy.	37

TERMIT JA LYHENTEET

ARM	Advanced RISC Machines, mikroprosessoriarkkitehtuuri
RISC	Reduced Instruction Set Computer, tietokoneiden suoritinarkkitehtuurien suunnittelufilosofia
LED	Light Emitting Diode, valoa säteilevä komponentti
SMT	Surface-mount technology, piirilevyn pintaan kiinni laitettavien komponenttien teknologia
SMD	Surface-mount device, piirilevyn pintaan kiinni laitettava komponentti
THT	Through-hole technology, piirilevyn reiän läpi laitettavien komponenttien teknologia.
I/O	Input/output, sisään- ja ulostulo
LQFP64	low-profile quad flat package, 64 pin, komponenttipakettiarkkitehtuuri
DIP64	Dual in-line package, 64 pin, komponenttipakettiarkkitehtuuri
SILTA	Kahden tai useamman komponentin jalan väliin jäänyt tina, joka aiheuttaa oikosulun
GND	Ground eli maa- tai nollataso
USB	Universal Serial Bus, sarjaväyläkommunikaatioon perustuva kommunikaatioarkkitehtuuri
JTAG	Joint Test Action Group, tuoteverifikaatioprotokolla
SWD	Serial wire debug, tuoteverifikaatioprotokolla

FOOTPRINT	Layout suunnittelussa käytettävä termi, jolla tarkoitetaan komponentin fyysisiä mittoja
IC	Integrated circuit, mikropiiri
I2C	Inter-Integrated Circuit, kaksisuuntainen kommunikaatioprotokolla, jossa kaksi signaalia; SCL ja SDA
SCL	Serial Clock, I2C:n kellosignaali
SDA	Serial Data, I2C:n tiedonsiirtosignaali

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö perustuu tarpeelle käyttää omatekoista piirikorttia, jota voidaan käyttää niin opetuksessa, kuin projektien prototyypeissä. Tässä opinnäytetyössä kehitetty kehitysalusta menee käyttöön Vaasan ammattikorkeakoulun laboratoriolle, Technobothnialle, tietotekniikan opetusyksikköön, ja tulee korvaamaan tällä hetkellä opetuskäytössä olevan Nucleo-152 piirikortin.

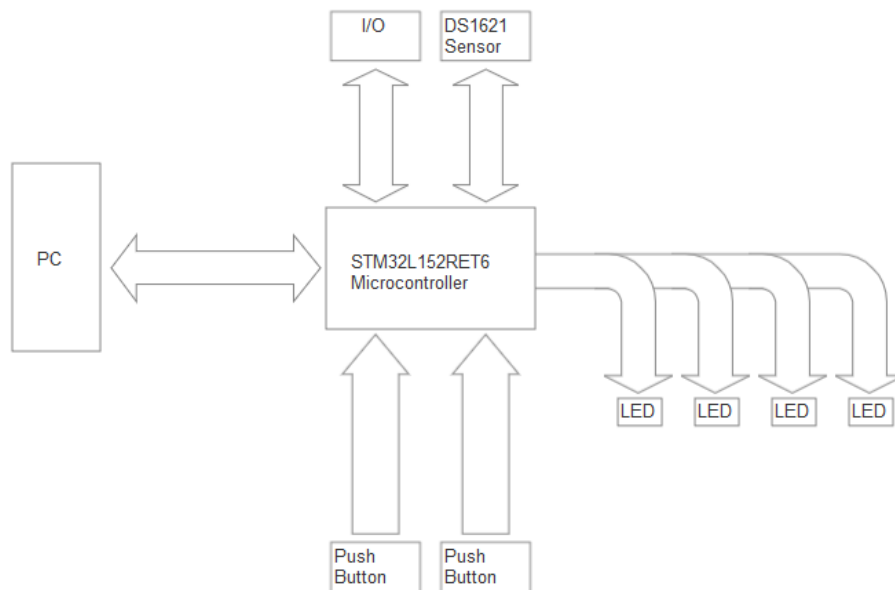
Opinnäytetyö sisälsi kaksi eri piirikorttia: adapterilevyn ARM-mikrokontrollerille sekä emolevyn, johon adapterilevy ja muut komponentit tulevat kiinni. Adapterilevyä pystyy opetusmielessä käyttämään koekytentälevyllä muussakin käytössä, mutta emolevy suunniteltiin käytettäväksi vain työssä tehdyn adapterilevyn kanssa.

Työhön sisältyi piirikaaviosuunnittelua, layout-suunnittelua sekä testausta. Käytettävän mikro-ohjaimen pienen koon ja resurssien haaskaamisten välttämiseksi, harjoiteltiin tässä työssä myös SMD-kolvausta.

2 TYÖN ALOITUS

2.1 Lohkokaavio

Lohkokaavio on yksinkertaistettu kuva järjestelmästä, jonka tarkoituksena on varmistaa, että työn suunnittelija sekä työn tilaaja ovat samalla kartalla lähtöpisteestä alkaen. Kuvassa 1 nähdään opinnäytetyön suunniteltu lohkokkaavio.



Kuva 1. Kehitysalustan lohkokkaavio.

Kehitysalusta tulee sisältämään LEDin, painonappeja, DS1621-lämpötilasensorin sekä I/O-nastoja. Lohkokaavion PC tarkoittaa, että kehitysalusta voidaan ohjelmoida käyttäen PC:n USB-liitäntää.

2.2 Vaatimusmäärittely

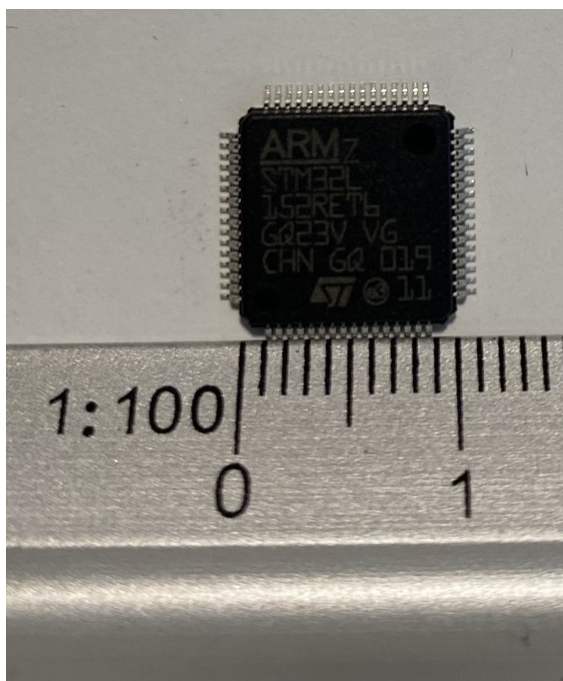
Vaatimusmäärittelyssä kerrotaan projektin tarkoituksesta ja asetetaan projektille tavoitteita sekä vaatimuksia. Vaatimukseen voi sisältyä esimerkiksi toiminnallisia vaatimuksia, suunnittelurajoituksia, ylläpitovaatimuksia ja ympäristövaatimuksia. Vaatimusmäärittely tehtiin yhdessä työn tilaajan kanssa ja tässä työssä

vaatimusmäärittelyhin sisällytettiin toiminnallisia vaatimuksia sekä ympäristövaatimuksia.

2.3 STM32L152RET6-mikro-ohjain

Vaasan ammattikorkeakoulun tietotekniikan opetusyksikössä on käytössä nucleo-152 kehitysalusta, ja tämän työn tarkoituksena on korvata käytössä oleva, kaupasta ostettava kehitysalusta /2/. Nucleo-152:ssa on STM32L152RET6 mikro-ohjain, joka määrittää tässä työssä käytettävän mikro-ohjaimen valinnan.

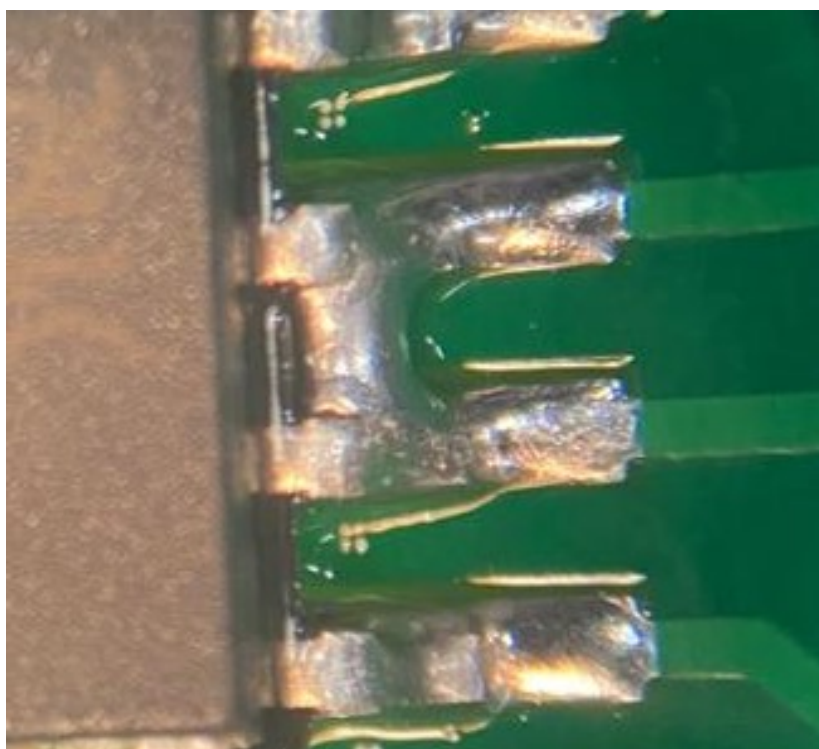
STM32L152RET6 on LQFP64-paketissa ja kooltaan (jalat poislukien) vain 10x10 millimetriä (**Kuva 2.**), /1/. Pienen kokonsa vuoksi mikro-ohjaimen käsinkolvaus on haastavaa, ja on tarpeen harjoitella SMT-kolvausta hieman mikro-ohjainta isompien komponenttien kanssa. Vasta sen jälkeen voidaan lähteä kolvaamaan mikro-ohjainta kiinni.



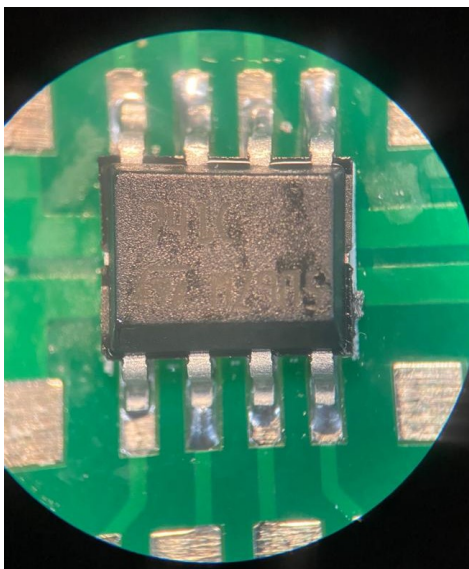
Kuva 2. STM32L152RET6 1:100 suhdeviivaimen vierellä.

2.4 SMD-kolvausharjoittelu

Työssä käytettävän STM32L152RET6 mikro-ohjaimen paketti tukee vain SMT:tä. Tämä aiheuttaa mahdollisuuden ihmisvirheelle, jonka seurauksena siltoja saattaa syntyä komponentin jalkojen välille (**Kuva 3**). Mikro-ohjain maksaa myös noin 10 euroa /20/. Siltojen ja resurssien haaskaamisen välttämiseksi harjoiteltiin SMD-kolvausta ensin harjoituslevyn avulla. Kuvassa 4 voidaan nähdä mikroskoopin läpi otettu kuva hyvästä liitoksesta. Kun liitokset oltiin saatu useaan kertaan kiinnitettyä ilman virheitä, lähdettiin koettamaan mikro-ohjaimen kolvausta kiinni adapterilevyyn. Mikro-ohjaimen pienen koon ja tekijän kokemattomuuden seurauksena, ei mikro-ohjainta heti saatu kiinnitettyä kunnolla, mutta muutaman yrityksen jälkeen saatiin hyväksyttävä lopputulos.



Kuva 3. Silta, joka aiheuttaa oikosulun toimivassa mikropiirissä.



Kuva 4. Komponentin hyvä liitos.

2.5 RC-piirin toiminta

Kaikki elektroniikkapiirit kärsivät jonkinlaisesta aikaviiveestä sisään- ja ulostuloterminaalien välillä, AC- tai DC-signaalia tai jännitettä käytettäessä. Tämä viive tunnetaan paremmin nimellä aikaviive (eng. time delay) tai aikavakio (eng. time constant) jotka kertovat piirin aikavastauksesta, kun sisääntulojännite tai -signaali is applied. Aikavakiolla on määreet $Tau - \tau$

Kun nostettavaa DC-jännite viedään lataamattomalle kondensaattorille, kondensaattori vetää virtaa itseensä niin sanotusta "varaavasta virrasta" (eng. charging current). Kun DC jännitettä tiputetaan, kondensaattori alkaa päästämään virtaa takaisin vastakkaiseen suuntaan. Koska kondensaattorit voivat varastoida elektronista energiaa, ne toimivat hieman kuin pienet paristot, varastoiden ja päästäten levyiltänsä virtaa tarvittaessa /15/.

Sähkövaraus, joka on varastoitu kondensaattorin levyille, voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

$$Q = CU, \text{ jossa} \quad (1)$$

$$Q = \text{Varauksen suuruus}$$

$$C = \text{Kapasitanssi}$$

$$U = \text{Elektrodien välinen potentiaaliero}$$

Kondensaattorin lataus ja purkaus ei ole ikinä välitöntä, vaan vie tietyn verran aikaa tapahtua. Aikavakioksi (τ) kutsutaan kondensaattorin aikaa latautuessaan tai purkautuessaan tietyllä prosentilla sen maksimi sisäntulojännitteestä.

Jos vastus on kytketty sarjaan kondensaattorin kanssa, muodostuu niin sanottu RC-piiri. Kondensaattori vähitellen latautuu vastuksen läpi, kunnes jännite kondensaattorin läpi kulkeva jännite on sama kuin sisäntulojännite. Kondensaattorin täyteen lataamisen aika on noin viisi aikavakiota (**Kuva 6.**), tai $5T$, joten RC-piirin taajuusvaste on viiden aikavakion verran.

Taajuusvasten aika sekunneissa mitataan kaavalla

$$\tau = R * C \quad (2)$$

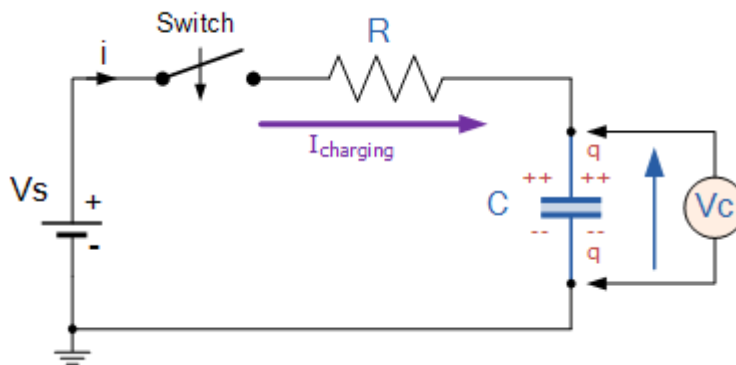
, jossa

$$R = \text{Vastuksen resistanssi Ohmeissa } (\Omega)$$

$$C = \text{Kondensaattorin arvo Faradeissa } (F)$$

Tämä muodostaa perustan RC-latauspiirille, missä $5T$ voidaan mieltää myös seuraavalla kaavalla.

$$5 * RC \quad (3)$$



Kuva 5. RC-latauspiiri /15/.

Kuvassa 5 nähdään kondensaattori (C) kytkettynä vastuksen (R) kanssa sarjaan, muodostaen RC-latauspiirin. Kytkennälle saadaan jännite paristolta (U_S), jonka tarvitsee ensin kulkea kytkimen (S) kautta. Aikatasossa nolla kytkimen ensi kertaa sulkeutuessa, kondensaattori latautuu vaiheittain vastuksen läpi, kunnes kondensaattorin yli kulkeva jännite (U_C) on sama kuin pariston jännite. Tapa, jolla kondensaattori latautuu, nähdään kuvassa 5.

Oletetaan, että kuvassa 5 nähtävä kondensaattori on täysin tyhjä ja kytkin (S) on auki. Tämä on kytkennän alkutila, jossa $t = 0, i = 0$ ja $q = 0$. Kun kytkin suljetaan, lähtee aika laskemaan alkutilasta $t = 0$ ja virta alkaa kulkemaan kondensaattorille vastuksen kautta.

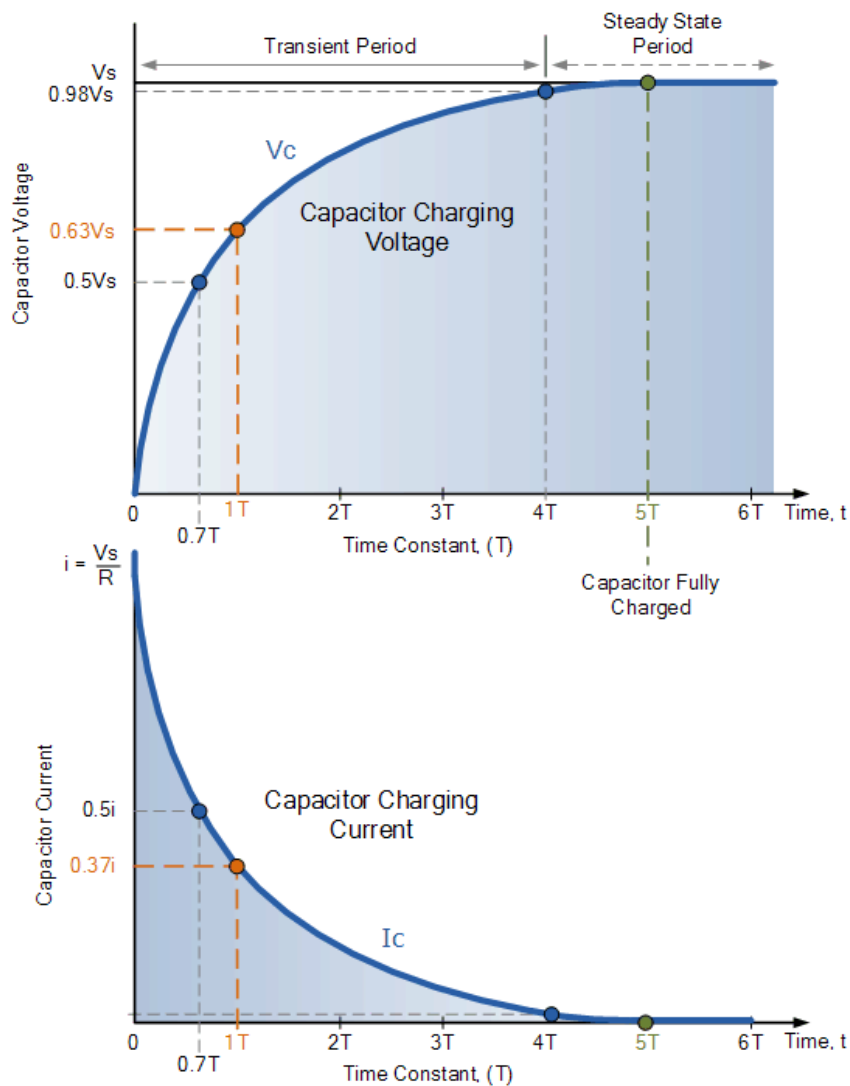
Ajassa $t = 0$, kondensaattorin yli kulkeva jännite on nolla $U_C = 0$ ja kondensaattori vaikuttaa olevan oikosulussa ja piirissä kulkevaa jännitettä rajoittaa vain vastus R . Kirchoffin jännitelakia käytettäessä, piirin ympäri kulkeva jännite lasketaan kaavalla,

(4)

$$U_S - R * i(t) - U_C(t) = 0$$

Kulkevaa virtaa voidaan kutsua lataavaksi virraksi, ja tämä voidaan todistaa ohmin lailla,

$$i = \frac{U_S}{R} \quad (5)$$



Kuva 6. Kondensaattorin latauskäyrät viiden aikavakion aikana /15/.

Kondensaattori latautuu kuvassa 6 nähtävän kaavion perusteella. RC-latauspiirissä käyrä on alussa paljon jyrkempi, koska lataustaso on nopeimmillaan alussa, mutta kavenee eksponentiaalisesti sitä mukaan kun kondensaattori ottaa lisävirtaa hitaammin.

Kondensaattorin latautuessa, potentiaalierot levyjen välillä alkavat nousta.

Kondensaattori jatkaa latautumista jolloin jännite-erot U_S :n ja U_C :n välillä pienenevät, samoin pienenevät myös virran väliset erot. Viiden aikavakion (5T) jälkeen, voidaan kondensaattorin sanoa olevan täysin latautunut. $t = \infty, i = 0$ ja $q = Q = CU$. Ajan ollessa ääretön, latausvirta tippuu nolnaan ja kondensaattori käyttäytyy kuten se olisi avoimessa piirissä, jossa kondensaattorin yli menevä jännite $U_C = U_S$.

Matemaattisesti kondensaattorin latautumisesta yhteen aikavakioon saadaan kaavalla,

$$\tau \equiv R * C \quad (6)$$

Tämä RC aikavakio määrittää vain latauksen nopeuden.

Kondensaattorin yli kulkeva jännite missä tahansa ajan kohdassa, voidaan laskea seuraavalla kaavalla,

$$U_C = U_S \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{RC}\right)} \right) \quad (7)$$

, jossa

$U_C =$ Kondensaattorin yli kulkeva jännite

$U_S =$ Sisääntulojännite

$e =$ Eulerin luku: 2.7182

$t =$ Kulunut aika, kun sisääntulojännite kytkettiin

$RC =$ Latauspiirin aikavakio

Neljän aikavakion ($4T$) jälkeen, RC-latauspiiri on lähes täyteen ladattu ja kondensaattorin levyt ovat saavuttaneet 98% maksimiarvoistaan. Aikajaksoa, jossa kondensaattori latautuu $4T$ aikavakion verran, tunnetaan transientin olotilan ajanjaksona.

Viiden aikavakion ($5T$) jälkeen, kondensaattorin yli kulkeva jännite (U_C) on lähes sama kuin sisääntulojännite (U_S). Kondensaattori on tässä hetkessä täysin latautunut ja latausvirta ei kulje enää piirin läpi, jolloin $I_C=0$. Tämä aikajakso on nimeltään vakaan olotilan ajanjakso (eng. steady state period).

2.6 Bypass kondensaattorit

Perusvaatimus kaikille elektroniikkapiireille on ohituskondensaattori. Nämä tunnetaan myös nimellä bypass- tai decoupling-kondensaattori. Näitä kondensaattorit asetetaan sisääntulojännitteen ja maatason väliin, mahdollisimman lähelle käytettävän laitteen sisääntulojalkaa /8/.

Tyypillisesti, valmistajat antavat suositusarvot ohituskondensaattoreille datalehdissään, mutta arvon voi laskea myös itse. Mikro-ohjainten tapauksessa, ohituskondensaattorin arvon voi laskea, kun tiedetään laitesignaalin tyypilliset nousu- ja laskuajat (t_{RISE}). Tarvitaan myös ohjaimen keskimääräinen virta (I_{AVE}). Näitä arvoja löytyy tuotteiden datalehtien taulukoista. Lopuksi tarvitsee määrittää maksimi jännitevärinäähäiriö (eng. voltage-ripple noise) (V_{RIPPLE}), jota käytettävän virtalähteen jäljet kestävät /8/. Näitä arvoja käyttämällä, voidaan häiriön taajuus laskea kaavalla,

$$f_{NOISE} = \frac{1}{2 * t_{RISE}} \quad (8)$$

Purkauksen suurinpiirteinen virta laskea kaavalla,

$$I_{SURGE} = \frac{I_{AVE} * f_{NOISE}}{f_{MICRO}} \quad (9)$$

, jossa

$$f_{MICRO} = \text{Mikro - ohjaimen kellotaajuus}$$

Saaduilla arvoilla, voidaan ohituskondensaattorin tarkka arvo laskea kaavalla,

$$C_{BYPASS} = \frac{I_{SURGE}}{2 * \pi * f_{NOISE} * V_{RIPPLE}} \quad (10)$$

3 ADAPTERILEVY JA EMOLEVY

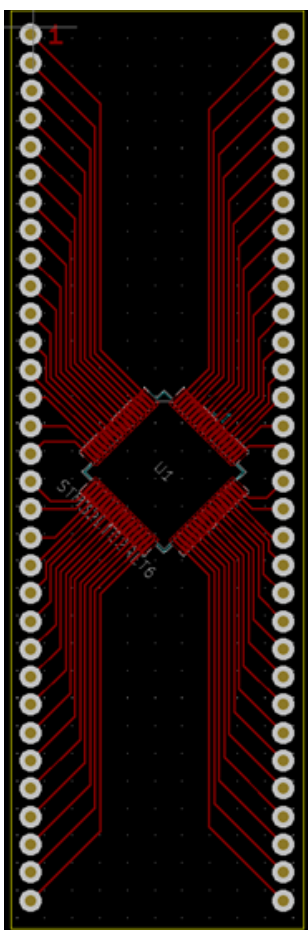
Työ päädyttiin jakamaan kahteen eri osioon: adapterilevyyn ja emolevyyn. Adapterilevy sisältää mikro-ohjaimen reititettyinä DIP64-standardin jalkoihin. Tämä mahdollistaa mikro-ohjaimen helpon vaihtamisen esimerkiksi sen rikkoutumisen yhteydessä. Emolevy sisältää työn loput komponentit ja tämän suunnittelu oli työn isoin vaihe.

3.1 Adapterilevy

Valmiita adapterilevyjä olisi ollut mahdollista ostaa kaupasta ja käyttää tätä itse suunnitellun levyn sijasta /2/. Valmiiden adapterilevyjen saatavuus oli kuitenkin heikko ja nämä levyt oltiin suunniteltu niin, että niille mahtuisi jopa 144 jalkainen mikro-ohjain. Työhön nähtiin järkevämpänä suunnitella oma adapterilevy, joka toteutettaisiin työssä käytettävän mikro-ohjaimen jalkamäärän mukaan ja saataisiin käytettyä myöhemmin paremmaksi huomattua DIP64-standardimallia. Oman adapterilevyn avulla, voitaisiin aina tarvittaessa tulostaa uusi levy ja kolvata siihen uusi mikro-ohjain. Tätä adapterilevyä voidaan käyttää myös muissa applikaatioissa, kuin tässä opinnäytetyössä.

Suunnittelu jatkui reitittämällä kaikki mikro-ohjaimen jalat omille rei'illeen ja ensimmäisestä iteraatiosta tuli hieman kömpelö, koska suunnittelussa ei käytetty mitään standardimallia (**Kuva 12**). Tämän perusteella suunniteltiin uusi adapterilevy käyttäen DIP64-standardimallia (**Kuva 7**).

DIP64-standardi oli selkeästi parempi vaihtoehto, sillä se antaa mahdollisuuden käyttää DIP64-holkkia, johon adapterilevy voidaan emolevyssä suoraan liittää. Emolevyllä täytyy nyt vain varata DIP64-holkille paikka, joka hieman suurentaa kehitysalustan kokoa mutta ei vaikuta negatiivisesti alustan toiminnallisuuteen.



Kuva 7. Adapterilevyn layout-kuva DIP64-standardissa.

Adapterilevyn jalkojen reitityksen jälkeen lisättiin levyn molemmille puolille kuparointi joka liitettiin GND-tasoon. Kuparointi vähentää ristivaikutusta (eng. crosstalk) kapasitiivisen kytkennän (eng. capacitive decoupling) seurauksena /17/.

3.2 Adapterilevyn ohjelmointi ja testaus

Ennen emolevyn toteutusta, oli adapterilevyn toiminnallisuutta tarpeen testata. Haluttiin nähdä, että saadaanko mikro-ohjaimen ajettua ohjelmia ja että toimiiko ohjelmointilaitte adapterilevyn kanssa. Testaukseen käytettiin STLINK/V2 in-circuit debugger/programmer laitetta /11/. Ohjelmointi on mahdollista tehdä kahdella eri protokollalla; JTAG:lla tai SWD:llä.

JTAG:n ja SWD:n erot ovat seuraavat:

Signaalivedot: SWD tarvitsee kaksi, kun taas JTAG vaatii neljä /18/.

Toiminnallisuudet: SWD on vain ohjelmointiin ja testaukseen. JTAG:lla voi ohjelmoida, testata ja tarkkailla rajoja tuotantotesteihin /18/.

Proessoriarkkitehtuurituki: SWD tukee vain ARM protokollaa. JTAG tukee ARM:n lisäksi myös useita muita protokollia /18/.

Topologia: SWD käyttää tähtitopologiaa kun taas JTAG kytkeytyy daisy-chain topologian kautta /18/.

Tässä työssä päädyttiin käyttämään SWD protokollaa. SWD käyttää kahta signaalivetoa ja koska tarkoitus oli vain testata ohjelmoinnin toimivuutta, käytettiin yksinkertaisempaa menetelmää. Myös JTAG:ia voitaisiin käyttää, mutta juurikin yksinkertaisuuden vuoksi käytettiin SWD:tä.

Adapterilevy kytkettiin koekytkentälevylle, jonka jälkeen mikro-ohjaimen tarvitsema +3,3V jännitelähde ja GND taso otettiin ohjelmointilaitteesta. 100µF ohituskondensaattoreita lisättiin +3,3V ja GND välille, mahdollisimman lähelle adapterilevyä. Ohjelmointilaitteen nastaan 15 kytkettiin adapterilevyn NRST-nasta. SWD protokolla lähti toimimaan, kun kytkettiin adapterilevyn nastat PA13, PA14 ohjelmointilaitteen nastoihin 7 ja 9 /11/. Kun kytkentä oli valmis, testattiin sitä ottamalla yhteys STM32CubeProgrammer-ohjelman avulla.

Emolevyn suunnittelu aloitettiin heti adapterilevyn piirtämisen jälkeen, mutta viimeisteltiin vasta kun adapterilevyn ohjelmoinnin toimivuus oltiin varmistettu.

3.3 Emolevy

3.3.1 Komponenttivalinnat

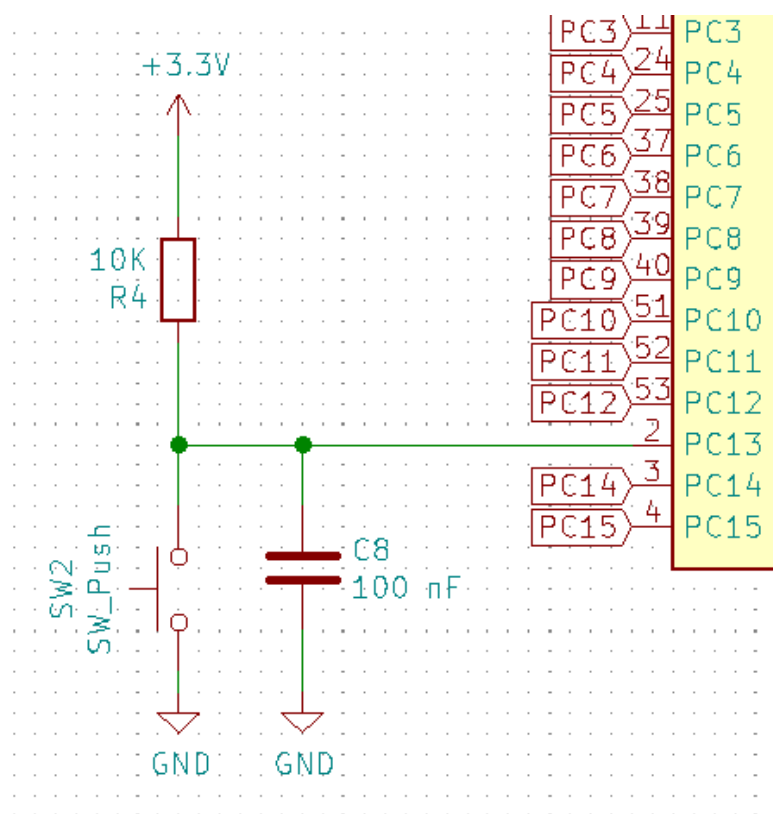
Työssä käytetyt komponentit valittiin työn edetessä. Työn keskeisin komponentti oli STM32L152RET6 mikro-ohjain /1/. Mikro-ohjaimelle tulevassa jännitteessä on mahdollista esiintyä häiriötä tai virtapiikkejä. Käyttöjännitteen tasaamiseksi, ja häiriöiden suodattamiseksi, asetetaan 100nF ohituskondensaattoreita (eng. bypass capacitors) mahdollisimman lähelle mikro-ohjainta. ”Kun (ohitus)kondensaattori kytketään sopivasti piirin lähelle, voidaan sillä suodattaa pois ikäviä häiriöitä kytkennästä, sekä tasata piirin tarvitsemia virtapiikkejä” /19/.

Vastuksia esiintyy kaikkialla. Vastustyyppejä on lähes yhtä monta, kuin on sovelluksia. Logiikkapiireissä, vastukset käyttäytyvät väylä- ja linjaterminaattoreina, ja myös ylös- sekä alasetovastuksina /13/. Logiikkapiireissä on kolme loogista tilaa: ylätila, alatila, ja korkean impedanssin tila. Korkean impedanssin tila esiintyy, kun nastaa ei olla vedetty ylä-tai alatilaan. Tässä tapauksessa mikro-ohjain voi tahattomasti olettaa tilan olevan looginen ylätila tai looginen alatila. Ylössetovastukset ratkaisevat tämän ongelman vetämällä arvon loogiseen ylätilaan /12/. Kuvassa 8 nähdään kytkentä ylössetovastuksesta. Vastuksen puuttuminen kytkennästä asettaisi nastan korkean impedanssin tilaan, ja vasta nappia painettaessa, nastaa vedettäisiin alatilaan. Tämän vuoksi ylössetovastus on tärkeä osa piirilevyä.

Mikro-ohjaimen datalehdessä nähdään, että piirilevy tarvitsee 1-24MHz korkeataajuisen ulkoisen kristallin (eng. high-speed external crystal, HSE) toimiakseen oikein /1/. Tähän valittiin 8MHz oskillaattori /14/.

Jos mikro-ohjainta halutaan käyttää tietokoneen kanssa, tarvitsee UART signaali muuttaa USB:n ymmärtämäksi signaaliksi /16/. Tämä signaalimuutos tehdään FT232RL piirillä /9/. Kuvassa 10 nähdään micro-USB:n, FT232RL:n ja mikro-ohjaimen välinen lohko. USB:n D+ ja D- datasiinaalit (pin 3 ja pin 2) lähtevät

FT232RL:n vastaaviin nastoihin (pin 15 ja pin 16). FT232RL lähettää TX ja RX (pin 1 ja pin 5) nastojen kautta datasiinaalit mikro-ohjaimen nastoille PA2 ja PA3 (pin 16 ja pin 17).



Kuva 8. Ylösvetovastuksen kytkentä. Mitoituksessa sovellettu RC-piirin teoriaa.

Työn tarkoituksena oli tuottaa ohjelmoitava laite, joten tarvittiin myös jotakin mitä ohjelmoida. Tähän tarkoitukseen otettiin DS1621-lämpötila-anturi ja ensimmäiseen iteraatioon yksi LED. DS1621-lämpötila-anturi yksinkertaisesti lisää lämpötilan tarkkailun ja hallinnan mihin tahansa järjestelmään /3/. Anturin lämpötilamittausalue on -55°C - $+125^{\circ}\text{C}$, 0.5°C resoluutiolla. Lämpötila-anturi on kytketään mikro-ohjaimen I2C-nastoihin SCL ja SDA, ja näille molemmille tulee asettaa ylösvetovastus. Ylösvetovastusten arvot lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$R_{P_{min}} = (U_{CC} - \frac{U_{OL_{max}}}{I_{OL}}) \quad (11)$$

, jossa

$$U_{CC} = \text{Sisääntulojännite}$$

$$U_{OL_{max}} = \text{Maksimi LOW – tason ulostulojännite}$$

$$I_{OL} = \text{LOW – tason ulostulovirta}$$

LEDin kirkkaus määrittyy sen saaman virran mukaan. LED voi vahingoittua jos se saa liikaa virtaa, ja tämän vuoksi emolevyllä kytketään LEDin kanssa LM324 operaatiovahvistin /6/. Operaatiovahvistin puskuroi ja sarjavastus R rajoittaa LEDille tulevaa virtaa, kunnes operaatiovahvistimen plus- ja miinusnavalla on sama jännite /4/. Tuleva jännite lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$U = I_{LED} * R + Vf \quad (12)$$

, jossa

$$U = \text{Jännite}$$

$$I_{LED} = \text{LEDin yli kulkeva virta}$$

$$R = \text{Etuvastuksen resistanssi}$$

$$Vf = \text{LEDin myötasuuntainen jännite}$$

Negatiivisesta takaisinkytkennästä (eng. negative feedback-loop) johtuen operaatiovahvistin nostaa tai laskee sen ulostulovirtaa, kunnes vastuksessa oleva jännite vastaa lähdejännitettä /4/.

Emolevyllä otetaan normaalitilanteessa +12V DC jännite /7/. Tämä jännite on mikro-ohjaimen käyttöjännitettä korkeampi ja sitä tarvitsee pudottaa, jotta

saataisiin ohjaimen tarvitsema +3,3V käyttöjännite. Tämä saavutetaan säädettävällä LM317-regulaattorilla, joka tukee ulostulojännitettä 1.25V ja 37V välillä. /5/. LM317:n regulointi lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$U_{Out} = U_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + (I_{ADJ} * R_2) \quad (13)$$

LM317 datalehdessä nähdään, että U_{REF} arvo on 1.25V ja vastuksen R_1 suositeltu arvo on välillä 240 - 1000Ω /5/. Mikä arvo tulee olla R_2 :lla, jotta regulaattorilta saadaan +3,3V, kun $R_1 = 1 K\Omega$?

$$3.3 V = 1.25 V \left(1 + \frac{R_2}{1 K\Omega} \right) + (50 \mu A * R_2)$$

$$1.25 \left(1 + \frac{R_2}{1000} \right) + 50 * 10^{-6} * R_2 = 3.3$$

$$1.25 + \frac{1.25 * R_2}{1000} + 50 * 10^{-6} * R_2 = 3.3 \quad || * 1000$$

$$1.25 * 1000 + \frac{1.25 * R_2}{1000} * 1000 + 50 * 10^{-6} * R_2 * 1000 = 3.3 * 1000$$

$$1250 + 1.3 * R_2 = 3300 \quad || - 1250$$

$$1.3 * R_2 = 2050 \quad || : 1.3$$

$$R_2 = \frac{2050}{1.3} = 1576.923077 \Omega$$

$$R_2 = 1.58 K\Omega$$

$$U_{Out} = 1.25 V \left(1 + \frac{1.58 K\Omega}{1 K\Omega} \right) + (50 \mu A * 1.58 K\Omega) = 3.304 V \approx 3.3 V, \text{ jossa}$$

$$U_{Out} = \text{Regulaattorin ulostulojännite}$$

$$U_{REF} = \text{Regulaattorin referenssijännite}$$

$I_{ADJ} = \text{Regulaattorin ADJ} - \text{nastan läpi kulkeva virta}$

R_1 ja R_2 regulaattorin ulostulojännitettä säätelevät vastukset

Kun ulkoisia kondensaattoreita käytetään minkä tahansa IC-regulaattorin kanssa, on joskus tarpeen lisätä suojadiodeita estämään kondensaattoreita purkautumasta matalavirtapisteiden kautta regulaattoriin /10/. Vaikkakin purkaus on lyhyt, riittää purkauksen energia vahingoittamaan regulaattorin osia /5/. Induktanssista johtuva purkaus lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$U_L = -L \frac{dl}{dt} \quad (14)$$

, jossa

$U = \text{jännite}$

$L = \text{induktanssi}$

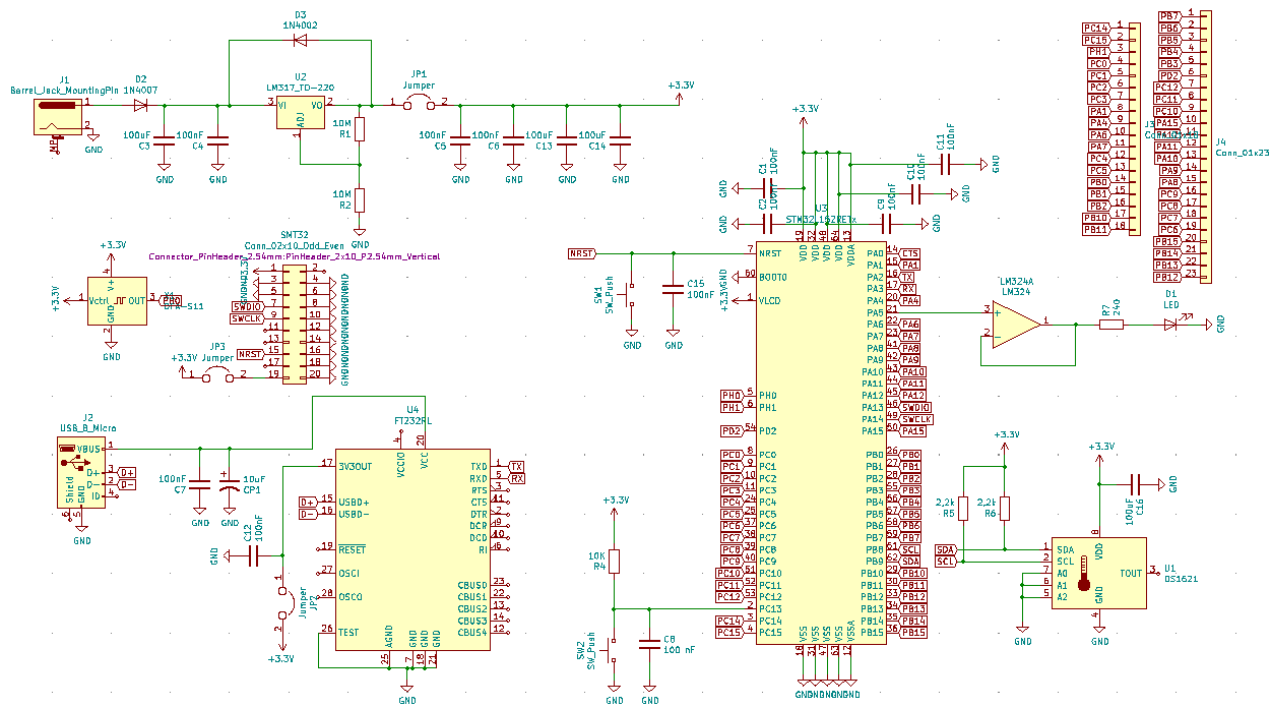
Mitä suurempi virran muutosnopeus on, sitä suurempi jännite induktanssissa syntyy.

Piirikortille on asetettu myös kaksi nappia. Ensimmäinen nappi on mikro-ohjaimen nollausnappi, joka on kytketty mikro-ohjaimen NRST-nastan (pin 7). Toinen nappi on kytketty mikro-ohjaimen I/O-nastan PC13 (pin 2), joka voidaan ohjelmoida käyttäjän toimesta.

Kun piirikortille tulevat komponentit tiedettiin, lähdettiin suunnittelemaan emolevyn piirikaaviota.

3.3.2 Schematic-suunnittelu

Emolevyn suunnittelu jatkui piirikaavion piirtämisellä (**Kuva 9**). Piirikaaviot, sekä layout-piirroksot tehtiin KiCad-ohjelmistolla. Tämä ohjelmisto valittiin, koska KiCad-ohjelmisto on ilmainen, kun taas opetuksessa käytetty PADS-ohjelmisto on maksullinen. KiCad-ohjelmiston komponenttikirjastot ovat myös erittäin laajat, jonka avulla jokainen projektissa käytettävä komponentti löydettiin ilman isompia ongelmia.

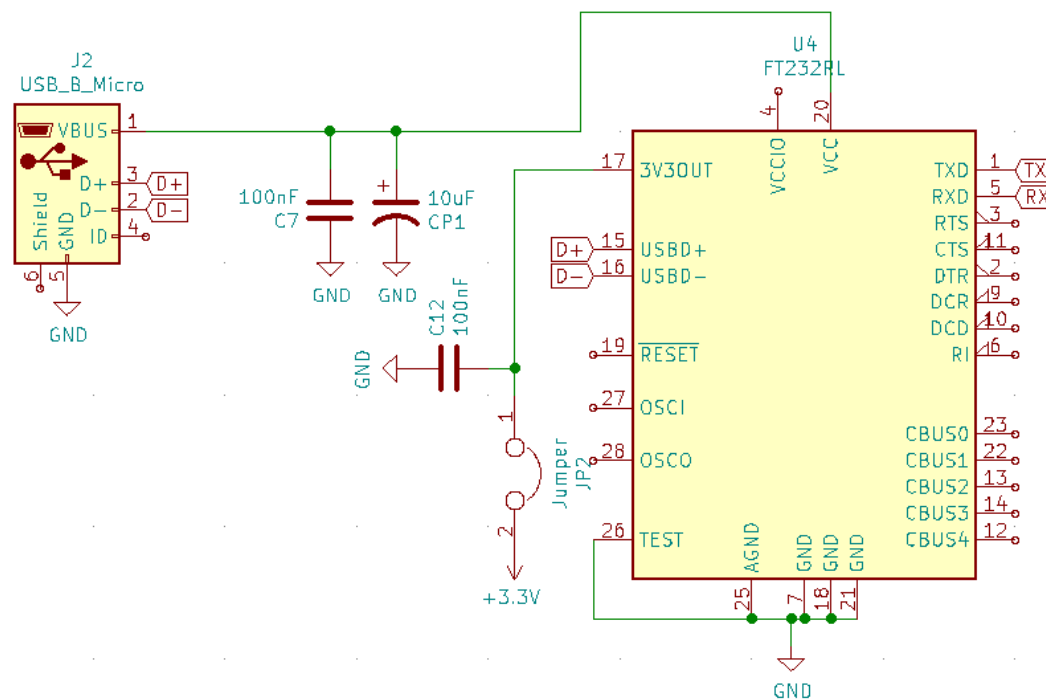


Kuva 9. Piirikaavio, emolevy.

Emolevyyntä tulevat komponentit etsittiin KiCad:in komponenttikirjastosta ja asetettiin tyhjälle piirikaaviopohjalle. Kun kaikki komponentit olivat löydetty, aloitettiin niiden kytkentä toisiinsa. Komponenttien kytkentäkaavioita oli mahdollisuus löytää niiden datalehdistä. Esimerkiksi LM317 regulaattorin D3-suojadiodin kytkentä löytyi sen datalehdessä /5/. Piirikaavio voidaan jakaa

lohkoihin, jossa piirin toiminnallisuudet voidaan eritellä. Kaikki I/O-nastat joita ei tässä työssä käytetty, laitettiin holkkinaistoihin, jotta niitä voitaisiin tarvittaessa hyödyntää.

Kuvassa 11 nähdään lohko, jossa 12V DC:n jännite muutetaan regulaattorin avulla +3,3V jännitteeksi. Tämä jännite kytketään jumperille joka on normaalitilassa kiinni, mutta otetaan pois jos käytetään toissijaista +3,3V jännitelähdettä. Samanlaiset jumperit ovat myös kiinni toisissa +3,3V lähteissä, mutta ovat normaalitilassa auki.



Kuva 10. Kytkeä micro-USB:n, FT232RL:n ja mikro-ohjaimen välillä.

Kun piirikaavio oli valmis ja työn tilaaja oli sen hyväksynyt, alkoi työ olemaan loppuillaan, ja suunnitteluosuudesta oli jäljellä enää layoutin piirtäminen.

3.3.3 Layout-suunnittelu

KiCad antaa tuntemilleen komponenteille jalanjäljen (eng. footprint) valmiiksi, mutta mahdollisten tuntemattomien komponenttien jalanjäljet, täytyy käyttäjän asettaa erikseen. Tässä työssä jouduttiin muuttamaan jalanjälkeä kuvassa 9 nähtävälle mikro-ohjaimelle. KiCad tunnistaa STM32L152LRET6-mikro-ohjaimen ja tavallisesti antaisi mikro-ohjaimelle LQFP64-jalanjäljen, mutta koska työssä käytettiin adapterilevyä, vaihdettiin mikro-ohjaimen jalanjälki DIP64-holkkiin. Jalanjäljet ovat layout-pohjaan tulevat komponenttien kuvat, jotka mallintavat oikeiden komponenttien kokoa.

Layout-työkalussa luodaan mallinnus oikeasta piirikortista. Piirikaavion komponentit ja kytkennät tuotiin layout-työkalun avulla reitittämättöminä layout-työalustalle.

Tätä komponenttien ja kytkentöjen sekaisin olevaa näkymää kutsutaan rotanpesäksi (eng. ratsnest), jota lähdettiin oikomaan. Liitteessä 4 voidaan nähdä kuva projektin rotanpesästä. Komponentteja voitiin liikutella vapaasti ja ne asetettiin työalustalle piirikaavion lohkojen mukaan. Asettelussa piti ottaa huomioon se, että komponenttien tulevat reitit eivät ylittäisi toisiaan. Kun komponentit oltiin saatu paikoilleen, voitiin niitä alkaa reitittämään toisiinsa. Reitityksessä käytettiin 0.3 millimetrin reittileveyttä (eng. track width). Komponenttien reittejä voitiin laittaa joko levyn ylä- tai alapuolelta. Liitteessä 3 voidaan nähdä piirikortin valmiit reititykset ilman kuparointia.

Kaikkien komponenttien reititysten jälkeen emolevyn molemmin puolin tehtiin kuparointi, joka kytkettiin GND-tasoon. Kuparoinnissa käytettiin mahdollisimman suurta eristeväliä, mutta komponenttien pienen koon vuoksi, eristeväli jäi pieneksi. Eristeväli vaikuttaa levyn häiriösietoisuuteen.

4 YHTEENVETO

Työn loputtua saatiin valmiiksi piirikaaviokuvat, layout-kuvat ja valmis adapterilevy. Emolevyn ensimmäinen iteraatio jää tämän pohdinnan ulkopuolelle, koska piirikortin tilaamiseen meni sen verran kauan.

Adapterilevylle itsessään olisi voinut laittaa ohituskondensaattoreita, koska ne tulevat välttämättä käyttäjännitteen ja maatason välille. Ja mitä lähemmäs mikro-ohjainta ne laitetaan, sen parempi. Jos ohituskondensaattorit olisivat adapterilevyllä, niin sitä lähemmäksi ei enää pääsisi.

Emolevyn ensimmäisen iteraation reititys olisi voinut onnistua paremmin, jos siihen olisi ollut lisää aikaresursseja. Toista iteraatiota myöskään aikaresurssien täyttymisen seurauksena pystytty tekemään. Toiseen iteraatioon tulisi SMD komponentteja ja reititykset voisi tehdä uudelleen.

Jatkokehitysmahdollisuuksia emolevylle olisi esimerkiksi lisää ominaisuuksia, kuten lisää sensoreita, nappeja, LEDejä. Nelijalkainen RGB LED ja ohjaus siihen voisi tuoda myös loppukäyttäjälle uusia mahdollisuuksia.

Opin paljon piirilevysuunnittelusta ja myös sen teoriasta. Työ oli mielenkiintoinen ja oman työllistymiseni kannalta merkityksellinen, koska aion jatkaa elektroniikkasuunnittelun parissa myös työelämässä.

LÄHTEET

/1/ STM32L125RET6 datalehti, Viitattu 13.05.2021

<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l152re.pdf>

/2/ Valmiiksi ostettava adapterilevy, Viitattu 13.05.2021

<https://www.roth-elektronik.com/en/produkte/detail/artnr/RE471/category/Multiadapters>

/3/ DS1621 lämpötila-anturin datalehti, Viitattu 13.05.2021

<http://www.farnell.com/datasheets/1911529.pdf>

/4/ Operaatiovahvistimen ja LEDin välinen toiminta, Viitattu 13.05.2021

<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-basics-behind-constant-current-led-drive-circuitry/#:~:text=For%20those%20who%20like%20to,to%20the%20noninverting%20input%20terminal>

/5/ LM317 regulaattorin datalehti, Viitattu 13.05.2021

https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf?ts=1620645096938&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

/6/ LM324 operaatiovahvistimen datalehti, Viitattu 13.05.2021

<https://www.ti.com/lit/ds/snosc16d/snosc16d.pdf>

/7/ DC virtaliittimen datalehti, Viitattu 13.05.2021

<https://www.cuidevices.com/product/resource/pj-102a.pdf>

/8/ Baker, B. 2004, Bypass capacitors: no black magic here, Viitattu 26.05.2021

<https://www.edn.com/bypass-capacitors-no-black-magic-here/>

/9/ F232RL datalehti, Viitattu 13.05.2021

http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf

/10/ 1N4002 ja 1N4007 diodien datalehti, Viitattu 13.05.2021

<https://www.vishay.com/docs/88503/1n4001.pdf>

/11/ ST-LINK/V2 ohjelmointilaitteen datalehti, Viitattu 13.05.2021

https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00026748-stlinkv2-incircuit-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stmicroelectronics.pdf

/12/ Pull up resistor / Pull down resistor, Viitattu 20.05.2021

<https://eepower.com/resistor-guide/resistor-applications/pull-up-resistor-pull-down-resistor/#>

/13/ Horowitz, P. & Hill, W. 2015. The Art of Electronics Third Edition. Yhdistynyt kuningaskunta. Cambridge University Press.

/14/ 8MHz Oskillaattorin datalehti, Viitattu 15.05.2021

<http://www.farnell.com/datasheets/2551800.pdf>

/15/ RC-latauspiirin teoriaa, Viitattu 26.05.2021

https://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_1.html

/16/ USB to UART teoriaa, Viitattu 15.05.2021

<https://theorycircuit.com/usb-to-uart-circuit/>

/17/ Johnson H. 2005, Ground fill, Viitattu 15.05.2021

<https://www.edn.com/ground-fill/>

/18/ Gunasekaran B. 2020, SWD vs JTAG: Similarities & Differences Explained..!!, Viitattu 15.05.2021

<https://embeddedinventor.com/swd-vs-jtag-differences-explained/>

/19/ Hutasu.net, 2017, Bypass kondensaattori, Viitattu 20.05.2021

<https://www.hutasu.net/elektroniikka/teoriaa/bypass-kondensaattori/>

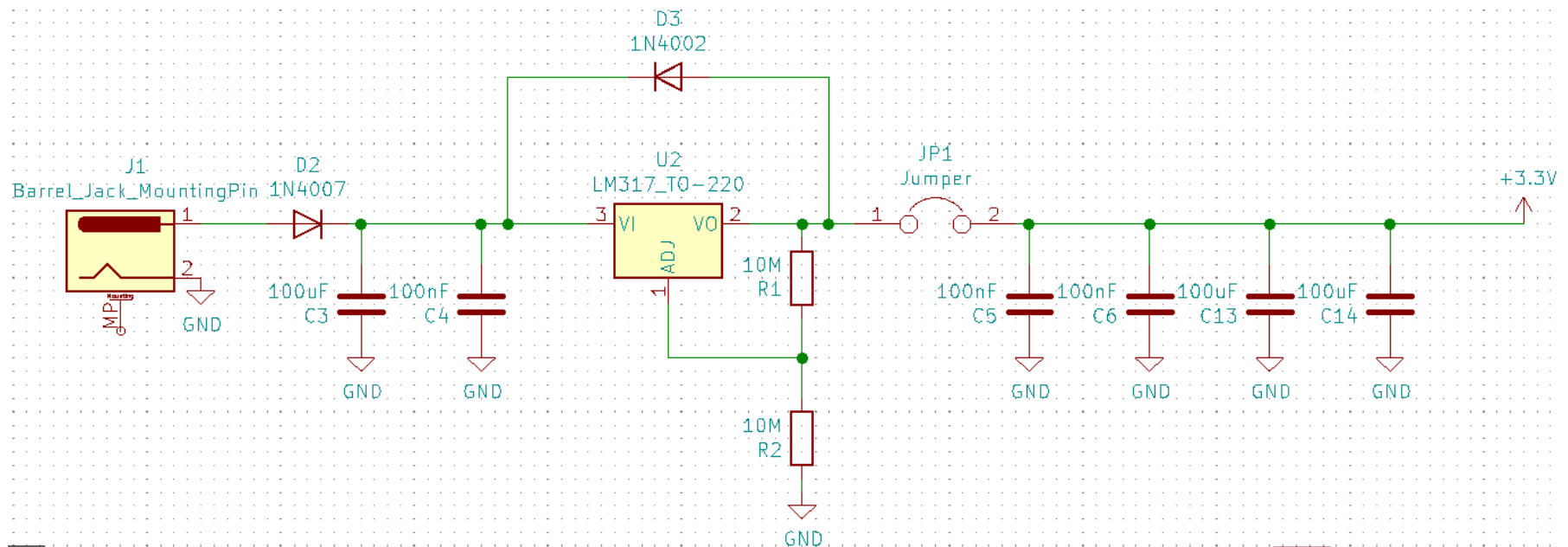
/20/ Mikro-ohjaimen hinta, Farnell, Viitattu 20.05.2021

<https://fi.farnell.com/stmicroelectronics/stm32l152ret6/mcu-32bit-cortex-m3-32mhz-lqfp/dp/2469628?ost=stm32l152ret>

LIITTEET

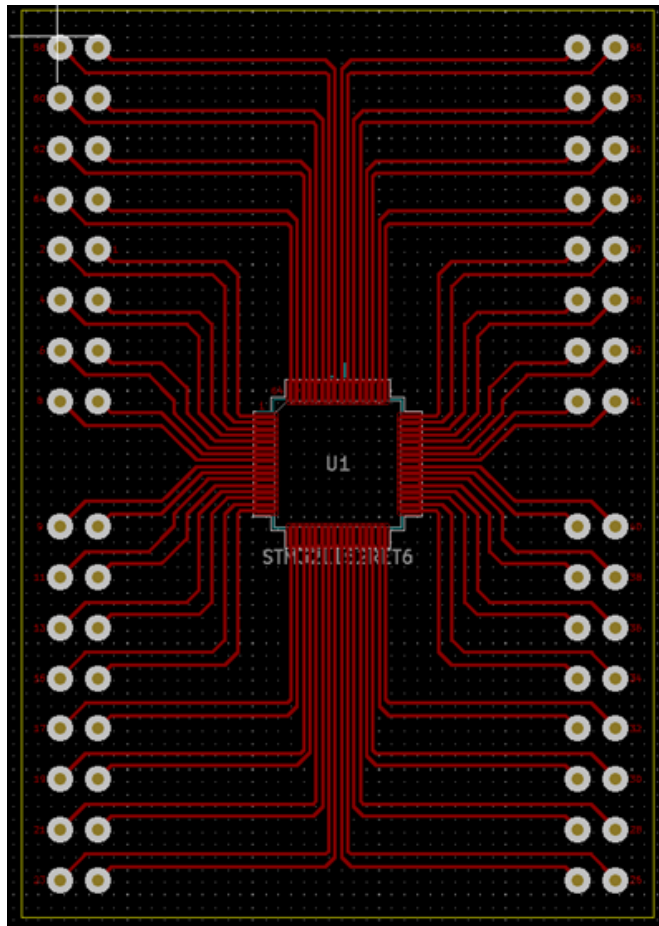
LIITE 1

Kuva 11. Kytkenä +12V DC jännitteestä +3,3V käyttöjännitteeksi.



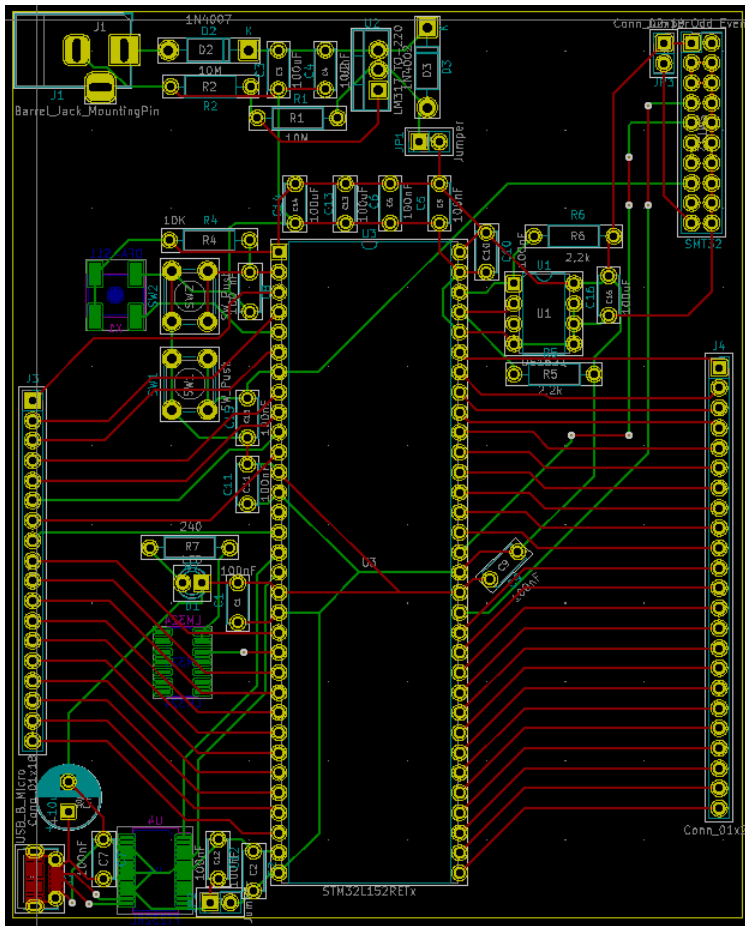
LIITE 2

Kuva 12. Adapterilevyn ensimmäinen iteraatio ilman standardimallia.



LIITE 3

Kuva 13. Layout, Emolevy.



LIITE 4

Kuva 14. Rotanpesä, Emolevy.

