

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
Infotehnoloogia teaduskond
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

Joan Lääne

Koduakvaariumi jälgimissüsteem

Magistritöö

IEE70LT

Juhendaja: Argo Kasemaa,
PhD, lektor

Tallinn 2015

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud. Kinnitan, et antud töö koostamisel on kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvametele jmt viidatud.

Kuupäev: 11.06.2015

Autor: Joan Lääne

.....

/allkiri/

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema: Koduakvaariumi jälgimissüsteem

Teema päritolu: Teema on valitud lähtudes oma huvidest.

Lõputöö eesmärgid: Ehitada akvaariumile süsteem, mis mõõdaks erinevaid vee parameetreid ja lihtsustaks kalade pidamist ning ehitada spetsiaalne energiasäästlik valgustussüsteem, mille juhtimine toimuks automaatselt vastavalt keskkonna valgustasemele

Oodatavad tulemused: Disainida ja realiseerida jälgimissüsteem koduakvaariumi jaoks, mis lihtsustaks ja teeks kalade pidamist atraktiivsemaks.

Lahendatavad küsimused: Valgustuse elektriskeemi ja trükkplaadi projekteerimine, mikrokontrolleril põhineva juhtmooduli elektriskeemi ja trükkplaadi projekteerimine, tarkvara koostamine, erinevate vee parameetrite jälgimine reaajas.

Kuupäev: 29.04.2015

Üliõpilane:
/allkiri/

Juhendaja:
/allkiri/

Resümee

Kalade ja akvaariumipidamine on väga populaarne. Et kalad oleksid elujõulised ja akvaarium puhas, on vaja pidevalt jälgida mitmed akvaariumiga seostuvad parameetreid.

Käesoleva magistritöö käigus disainiti koduakvaariumi jälgimissüsteem, mis on eeskätt suunatud just kodukasutajale. Süsteem on võimeline lisaks põhiliste vee parameetrite mõõtmisele nagu vee temperatuur ja pH, reguleerima ka LED-põhist valgustust vastavalt keskkonna valgustasemele ja kellaajale. Lisaks on võimalik seadistada kasutajasõbraliku menüü abil näiteks valgustuse tööaega ning uurida salvestatud vee temperatuuri ja pH väärtusi.

Antud akvaariumisüsteem põhineb energiasäästlikul STM32F0 ARM Cortex M0 48MHz mikrokontrolleril. Kahetoimeline süsteem tagab seadme töökindluse. Akutoitel on seadme tööiga kuni 58h, kusjuures mikrokontrolleris säilib õige kellaeg kuni 4 päeva tänu tagavara energiaallikale.

Süsteemi jaoks disainiti vajalikud elektriskeemid ning projekteeriti LED valgustuse trükkplaat ja põhimooduli trükkplaat. Süsteemi jaoks arendati ka tarkvara kasutades mitmeid olemasolevaid teke. Kogu süsteem on lihtsalt paigutatav akvaariumikaanele ning töötab veatult.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 92 leheküljel, 8 peatükki, 48 joonist ja 4 tabelit.

Märksõnad: akvaariumisüsteem, STM32F0, ARM Cortex M0, mikrokontroller, LED, valgustus, jälgimissüsteem, pH, temperatuur

Abstract

Fishkeeping is quite popular these days. In order to keep the fish tank clean and fish healthy, many water parameters need to be monitored daily.

The aim of this master's thesis was to design an aquarium monitoring system intended for home use. In addition to monitoring simple water parameters such as temperature and alkalinity, the system also controls LED lighting based on the environment light levels and time. Simple menu-based user interface enables user to configure LED lighting work hours, set the current time and look up stored water parameters up to one day.

The core of the aquarium system is an energy efficient STM32F0 ARM Cortex M0 48MHz microcontroller. Dual power supply system guarantees system reliability. The Li-Ion battery lasts up to 58h, but the backup power supply for the microcontroller keeps the time correct up to 4 days.

The system consists of two separate electrical schematics and PCBs, the LED module and the main control module. The software was developed using different libraries. In conclusion, the system can easily be installed on top of an aquarium lid and works flawlessly.

The thesis is in Estonian and contains 92 pages of text, 8 chapters, 48 figures and 4 tables.

Keywords: aquarium system, STM32F0, ARM Cortex M0, microcontroller, LED, lighting, monitoring system, alkalinity, temperature

Jooniste loetelu

Joonis 1.1. Puratek Insight akvaariumilahenduse struktuurskeem [1]	11
Joonis 1.2. Seneye Home [3]	12
Joonis 1.3. Lämmastikutsükkel akvaariumis	16
Joonis 2.1. Akvaariumisüsteemi struktuurskeem	18
Joonis 2.2. Cortex-M0 mikroprotsessori struktuurdiagramm [9]	19
Joonis 2.3. STM32F0 Discovery arendusplaat [10]	21
Joonis 2.4 5500K fluorestsentslambi spekter [11]	22
Joonis 2.5 Klorofüllide neelduvusspekter [12]	23
Joonis 2.6 Impulsslaidmodulatsioon	25
Joonis 2.7 Luxeon Rebel LED valgusspekter [12]	27
Joonis 2.8 pH-elektroodi ehitus [13]	28
Joonis 2.9 Nernsti võrrand	28
Joonis 2.10 Dallas DS18B20 temperatuurisensori ühendusdiagramm välise toiteallikaga [22]	33
Joonis 2.11 Hitachi 16x2 LCD ekraan [autori pilt]	34
Joonis 3.1 Luxeon Rebel LED valgusspekter (3000K ja 5000K) [12]	36
Joonis 3.2 AP8801 tüüp prakendus skeem [24]	36
Joonis 3.3 Luxeon Rebel LED jootejalg koos thermal viadega [12]	37
Joonis 3.4 Lülitussageduse sõltuvus induktori väärtusest [24]	38
Joonis 3.5 Akvaariumivalgustuse elektriskeem	39
Joonis 3.6 Akvaariumi kahetoitelise toiteploki plokk skeem	41
Joonis 3.7 Pingeregulaatori LM340 ja kaitselülituse elektriskeem	42
Joonis 3.8 Akulaadija MCP73832T elektriskeem	44
Joonis 3.9 Pingeregulaatori BU33TD3WG elektriskeem	45
Joonis 3.10 Pinget tõstva (Boost) pingemuunduri põhimõtte skeem	45
Joonis 3.11 5V pingemuunduri elektriskeem	47
Joonis 3.12 Superkondensaator kui mikrokontrolleri tagavara energiaallikas	48
Joonis 3.13 Originaal pH-mõõteskeem koos CO ₂ tüürskeemiga [36]	49
Joonis 3.14 Pingeregulaatori LP4951C elektriskeem	50
Joonis 3.15 pH-juhtskeemi 7V virtuaalne maa	51
Joonis 3.16 pH-anduri 17kordne võimendusaste	53
Joonis 3.17 pH-juhtskeemi inverteeriv lõpplülitus	53
Joonis 3.18 STM32F0 toiteühenduste ülevaade [9]	55
Joonis 3.19 Programmeerimisühendus STLINK/V2 ja SWD vahel	57
Joonis 3.20 LCD ühendus skeem mikrokontrolleriga	58
Joonis 3.21 Lüliti fantoomvajutuse filter	58
Joonis 3.22 Fototakisti pingejaguri lülituses	59
Joonis 4.1 pH juhtskeemi tõusukallaku kalibreerimine potentsiomeetri R3 abil	61
Joonis 4.2 pH juhtskeemi kompensatsiooni (nihkepinge) kalibreerimine potentsiomeetri R4 abil	62
Joonis 4.3 5V pingemuunduri LTSpice simulatsiooniskeem	63
Joonis 4.4 Pingemuunduri väljundpinge ja induktori voolu sõltuvus induktori suuruselt täiteteguri 30% korral	64
Joonis 4.5 Pingemuunduri väljundpinge ja induktori voolu sõltuvus täitetegurist induktori väärtuse 100µH korral	65
Joonis 5.1 Akvaariumivalgustuse LED-ide paigutus	68
Joonis 5.2 LED-ide vahelise kauguse leidmine	69
Joonis 5.3 LED valgusti trükkplaadi 3D mudel	69
Joonis 5.4 Põhimooduli skeemi alamskeemide paigutus	69
Joonis 5.5 Põhimooduli trükkplaadi 3D mudel. Paremal koos ekraaniga	71
Joonis 5.6 Akvaariumi 3D mudel koos kaane ja juhtmooduliga	72
Joonis 6.1 Akvaariumisüsteemi programmi tööalgoritm	74

Sisukord

Sissejuhatus.....	9
1. Probleemi ülevaade	10
1.1 Olemasolevad lahendused	10
1.2 Vee parameetrid.....	13
1.2.1 Vee temperatuur.....	13
1.2.2 Vesiniku ionide kontsentratsioon ehk pH.....	13
1.2.3 Vee karedus.....	14
1.2.4 Ammoniaak, nitritid, nitraadid ja lämmastikutsükel.....	15
2. Funktsionaalne ülevaade ja süsteemi disain	17
2.1 Struktuurskeem	17
2.2 ARM Cortex M0 mikrokontroller STM32F0.....	18
2.3 Akvaariumivalgustus.....	22
2.4 Vee pH mõõtmine.....	27
2.5 Lämmastikuühendite kaudne mõõtmine	29
2.6 Akvaariumivee filter	31
2.7 Temperatuuri mõõtmine	32
2.8 Kasutajaliides	33
3. Elektriskeemid.....	35
3.1 Akvaariumi valgustuse elektriskeem	35
3.2 Akvaariumi juhtmooduli elektriskeem	40
3.2.1 Toiteploki elektriskeem	40
3.2.2 pH-sensori juhtskeem	48
3.2.3 Mikrokontroller STM32F0	54
4. Simulatsioonid.....	61
4.1 pH-anduri juhtskeemi simulatsioon	61
4.2 5V pingemuunduri simulatsioon	63
5. Trükkplaatide ja akvaariumi kaane projekteerimine	66
5.1 Üldised nõuded trükkplaadile.....	66
5.2 LED valgustuse trükkplaadi disain	67
5.3 Põhimooduli trükkplaadi disain	69
5.4 Akvaariumi kaane projekteerimine ja realiseerimine	71
6. Tarkvara disain	73

6.1	Programmi algoritm.....	73
7.	Edasiarendamise võimalused.....	76
8.	Majanduslik ülevaade	78
	Kokkuvõte.....	80
	Viidatud allikad.....	81
	Lisad.....	85
	Lisa 1. Vees lahustunud NH ₃ osakaal kogu ammoniaagist.....	85
	Lisa 2. Elektriskeemid	86
	Lisa 3. Mikrokontrolleri STM32F051xx ülevaade	88
	Lisa 4. Trükkplaadid	89
	Lisa 5. Akvaariumi jälgimissüsteemi realisatsioon	90
	Lisa 6. Komponentide nimekiri.....	91

Sissejuhatus

Koduakvaariumid ja kalade pidamine on tänapäeval väga populaarne. Akvaarium loob ruumis meeldiva atmosfääri ning pakub silmailu. Puhas ja hooldatud akvaarium on nii hea elukoht kaladele kui ka kena dekoratsioon tuppa. Ilus akvaarium võib olla ka rahustav alternatiiv televiisorile.

Kahjuks vajab aga akvaariumi korrashoidmine pidevat hoolitsemist ja jälgimist, et tagada kaladele head elamistingimused ning pikk eluiga. Sarnaselt teiste lemmikloomadega vajavad kalad söötmist, akvaariumivett tuleb vahetada paari nädala järel ning sõltuvalt akvaariumi suurusest vajab paari kuu möödudes kogu akvaarium puhastust. Akvaariumi hooldamine pole keeruline, kui on üks elukoht ning on võimalik pühendada mõned minutid kaladele. Siiski tänapäeva kiire tööruutiin võib viia paariks päevaks või nädalaks kodust eemale ning siis võib olla keeruline leida kedagi, kes oleks nõus ja oskaks sel perioodil kalade eest hoolitseda.

Antud probleemi aitaks lahendada akvaariumi automatiseerimine, mis seisneb akvaariumi erinevate vee parameetrite jälgimisel ning kalade toitmisel ilma inimese sekkumata. Tänapäeval on olemas mitmed kommertslahendused loomaaedadele ja poodidele, kus on aga hoopis teistsugused tingimised. Tihtipeale on seal tegemist suuremate akvaariumitega kui kodus, mis eeldab ka kallimaid ja keerukamaid seadmeid.

Algajal akvaariumihuvilisel võib olla alguses keeruline orienteeruda õigete parameetritega seadmete valikul. Eksisteerib erinevaid söötmissaadmeid, valgussüsteeme, veekvaliteedi kontrollseadmeid. Tulemuseks võib saada keeruka süsteemi, mis ei pruugi täpselt sobida antud akvaariumile ning selle kasutamine võib juhtuda hinnatust palju kallimaks.

Antud lõputöö eesmärgiks on disainida ja ehitada lihtne, võimalikult soodne ja energiasäästlik automaatne akvaariumi jälgimissüsteem kodukasutajatele, mille peamiseks ülesandeks vee parameetrite ja kvaliteedi hindamine ning energiasäästlik valgustussüsteem, mille reguleerimine toimiks automaatselt vastavalt toa valgustasemele. Kogu süsteem peab olema kergelt paigaldatav ning töökindel.

1. Probleemi ülevaade

Koduse akvaariumipidamine on väga populaarne, aga selle ülesseadmine ja hooldamine võib olla keerukas ning aeganõudev. Tüüpiline akvaariumisüsteem nõuab mitmeid lisaseadmed, nagu näiteks veefilter, soojendi, termomeeter ja valgustus. Lisaks veel tuleb kalu igapäevaselt toita ning akvaariumivett vahetada, kui selle keemiline koostis muutub eluohtlikuks kaladele nende elutegevuse tõttu. See tähendab, et tuleb jälgida erinevaid vee parameetreid nagu pH, soolsus, karedus, nitraadid ning nitritid ja nende halvenemise korral tuleb tegutseda kiiresti.

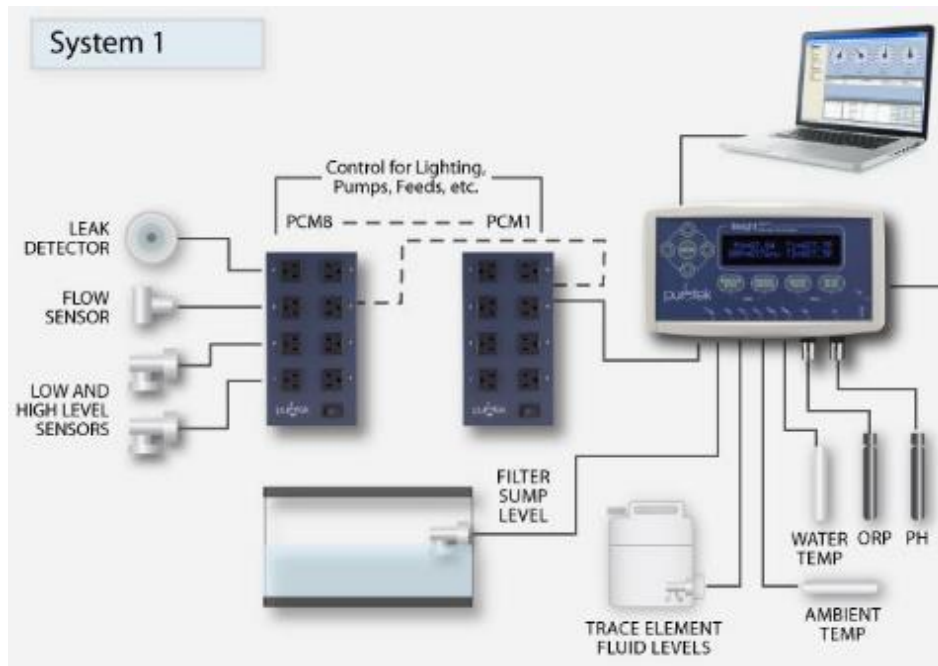
Tänapäeval on üha populaarsemad nutikad asjad, ehk seadmed, mis on automatiseeritud ning teevad selle tulemusel inimese elu kergemaks või siis annavad rohkem vaba aega tegeleda millegi meelepärasemaga. Siinkohal oleks võimalik ka akvaariumipidajate elu kergendada, tehes autonoomse jälgimissüsteemi, mis hooldaks kalu, kui akvarist on eemal. Selline süsteem peaks automaatselt söötma kalu teatud ajavahemike tagant, kontrolliks vee kvaliteeti ning annaks märku, kui vesi vajab vahetust, juhiks akvaariumi valgustust vastavalt kellaajale ja keskkonna valgusele, reguleeriks vee temperatuuri ning vee taset akvaariumis ja teavitaks sellest akvaristi. Lisaks eelnevale peaks kogu süsteem olema kasutajasõbralik, lihtne paigaldada, energiasäästlik ning võimeline töötama sõltumatult võrgupinge olemasolust.

1.1 Olemasolevad lahendused

Idee automatiseeritud akvaariumisüsteemist pole täiesti uudne. Tänapäeval on olemas erinevad firmad, mis tegelevad just akvaariumi automatiseerimise lahenduste arendamisega, kuid need asuvad välismaal, enamjaolt Ameerika Ühendriikides. Näiteks võib tuua firmad Puratek ja Seneye.

Puratek on loonud toote *Insight 24/7 Monitor/Controller*, mis jälgib akvaariumi parameetreid ööpäevaringselt ning teavitab kasutajat häire korral emailiga või helisignaaliga. Süsteem võimaldab jälgida vee temperatuuri ja kvaliteeti, pH-d, õhutemperatuuri, seadmete voolutarvet. Puratek Insight võimaldab ka automaatset veevahetust, mitme lisaseadmete juhtimist (nt. filtrid, automaatsöötjad), veetaseme jälgimist ning isegi ka lainete tekitamist. Kogu süsteem on arvutiga ühilduv USB juhtme või juhtmevaba interneti (WLAN) kaudu, kus

on võimalik kauglugeda sensorite andmeid üle võrgu. Antud süsteemi lihtsustatud plokk skeem on näha joonisel 1.1. [1]



Joonis 1.1. Puratek Insight akvaariumilahenduse struktuurskeem [1]

Süsteem koosneb peamoodulist, kuhu on võimalik ühendada erinevaid sensoreid ja teisi lisaseadmeid. Peamoodul võimaldab juhtida lisaseadmeid vastavalt sensoritelt kogutud andmetele reaajas. Kogu süsteem on modulaarne, ehk antud süsteeme võib olla mitu, kui on vaja juhtida mitu akvaariumi. Andmelogisid on võimalik vaadata arvuti abil USB juhtmega või siis üle WLAN-i. Sarnaselt üle võrgu toimub ka kõikide moodulite haldamine. Kogu selline lahendus on aga suhteliselt kallis. Komplekti hind sõltub soovitud lisavõimalustest ning jääb \$539 – \$999 (430€ - 800€) vahemikku [2].

Seneye pakub tunduvalt odavamalt ja lihtsamat lahendust, mis on eelkõige suunatud kodukasutajatele. *Seneye Home* maksab ainult 99,98€ ning see võimaldab jälgida vee temperatuuri, pH-d, vees lahustunud ammoniaaki, valgustaset ning akvaariumi veetaset [3]. Seneye Home on kujutatud joonisel 1.2.



Joonis 1.2. Seneye Home [3]

Antud seade ühildub arvutiga USB kaudu, mis on ühtlasi ka seadme toiteallikaks. See aga eeldab arvuti või vastava adapteri olemasolu akvaariumi läheduses. Adapteri kasutamisel salvestatakse 35 päeva näidud mällu ning arvuti ühendamisel salvestatakse need arvutisse. Akvaariumivee parameetreid on võimalik jälgida kaasas oleva tarkvaraga või siis nutitelefoni rakendusega. Probleemi korral annab seade märku SMS-i või siis indikaatorlühedega [3].

Võrreldes Purateki ja Seneye lahendusi, on näha, et tegemist on eri sihtgrupile mõeldud seadmetega. Puratek on laiemate võimalustega ning professionaalsem lahendus, mis juhib kogu akvaariumis toimivat. See modulaarne lahendus on ideaalne siis, kui on palju suuremõõtmelisi akvaariume, mis vajavad põhjalikku automatiseerimist ja kontrolli nagu näiteks loomaaias. Seneye on aga kasutajasõbralikum ja säästlikum lahendus just kodukasutajale, mis jälgib kõiki olulisi vee parameetreid ning võimaldab infot jälgida kas nutitelefoni rakendusega või arvuti abil.

Antud lõputöö eesmärgiks on aga disainida akvaariumilahendus, mis võimaldaks kodukasutajatel akvaariumipidamist lihtsustada. Seade peaks olema lihtne paigaldada nagu Seneye seade aga samas ka vajadusel laiendatav sarnaselt Pureteki seadmele. Kindlasti peaks kogu süsteem olema energiasäästlik ning taskukohane just eelkõige kodukasutajatele.

Uuriti ka, mis teeb professionaalse akvaariumilahenduse nii kalliks. Iseenesest mõistetav on see, et disainimiseks ja testimiseks on kulutatud palju aega ja ressursse, mis lisab sellele väärtust. Teiseks, seadme töökindlus ja ohutus on väga tähtis, kuna tegemist on vee, elektroonikaga ning elusorganismidega. Siiski selgus, et ühed kallimad komponendid on näiteks erinevad elektroodid (pH, temperatuur, nitraadid), mis võivad maksta \$30 - \$70 (24€

- 56€) [4]. Seega üks võimalus, kuidas saaks seadme hinda alandada, on võimalusel ise disainida vastavad sensorid ja elektroodid või vähemalt nende juhtskeemid.

1.2 Vee parameetrid

Kalade elamiskeskkonnaks on vesi ning selle parameetreid tuleb hoolikalt jälgida, et luua kaladele ohutu ja tervislik elukeskkond. Erinevatel kaladel on eri nõudmised vee suhtes. Kui vee parameetrid ei vasta kalade tingimustele, võivad kalad selle tulemusena haigestuda. Tähtsamad näitajad, mida tuleks akvaariumis pidevalt jälgida on vee temperatuur, pH, vee karedus ning lämmastikuühendite kontsentratsioon [5].

1.2.1 Vee temperatuur

Stabiilne vee temperatuur on väga tähtis kalade heaolu säilitamiseks ning seega on oluline jälgida akvaariumi veetemperatuuri ning vajadusel soojendada vett. Temperatuuri kõikumine võib põhjustada kalades stressi. Kõige sobivam temperatuurivahemik, mida eelistavad suurem osa kalasid on 25°C ... 27°C, kuigi see võib olla liigiti erinev. Näiteks gupid on väga leplikud ning võivad elada ka 10°C ... 29°C vees [6].

Vee temperatuur sõltub väliskeskkonna temperatuurist, ehk toatemperatuurist. Kaladele ei mõju hästi kiire vee temperatuuri muutus ning see põhjustab ka teisi muutusi vee koostises. Näiteks vee temperatuuri suurenedes kiireneb kalade ainevahetus, mis omakorda suurendab nende hapnikuvajadust. Samas aga soojemas vees on vähem lahustunud hapnikku, seega võib tekkida hapnikupuuduse olukord, kui vett ei rikastata hapnikuga. Vee temperatuuri stabiliseerimiseks võib kasutada vee soojendit või jahutit [5].

Igas akvaariumis peaks olema termomeeter vee temperatuuri jälgimiseks. Selleks sobib kõige tavalisem analoogtermomeeter, digitaalne termomeeter või kleepsutermomeeter, mis kleebitakse akvaariumi välisküljele ning see muudab värvi vastavalt temperatuuri muutusele.

1.2.2 Vesiniku ionide kontsentratsioon ehk pH

Järgmine vee parameeter, mida tuleb jälgida on vee pH, ehk vesiniku ionide kontsentratsioon vees. Tavalisel kraaniveel on neutraalne pH 7, sellest väiksema pH-ga

lahused on happelised ja suuremad aluselised. Akvaariumivee pH võib aja jooksul muutuda toidujääkide kõdunemise ja kalade väljaheidete tõttu, millest tekivad erinevad lämmastikühendid nagu ja ammoniaak ja ammoonium ionid. Akvaariumivee pH võib aga omakorda mõjutada vees leiduva ammoniaagi NH_3 ja ammoonium ionide NH_4^+ hulka. Puhtal kujul ammoniaak on kaladele mürgisem kui ammoonium ionid, kuid mõlemad on ohtlikud kaladele. Aluselisem vesi sisaldab rohkem puhast ammoniaaki, samas kui happelisemas vees on ülekaalus ammoonium ionid. Näiteks gupidele on ideaalne pH vahemik 6,8 ... 7,8 [6].

Vee pH-d tuleb akvaariumis jälgida, kuna ammoniaak muutub pH tõustes kaladele mürgisemaks. Samas aga happelisema vee korral toimub iseeneslik lämmastikuühendit tootva bakteri vähenemine. Kuigi paljud akvaariumikalad kannatavad väikest pH muutust, siis tuleks hoida vee pH stabiilsena seda pidevalt kontrollides ning vajadusel vett vahetades. Vastasel juhul võib kaladel tekkida stress ning nad võivad haigestuda [6].

1.2.3 Vee karedus

Vee karedus iseloomustab erinevate mineraalide nagu näiteks kaltsiumi ja magneesiumi sisaldust vees. Mida rohkem on vees lahustunud mineraale, seda karedamaks nimetatakse vett. Kraanivesi sisaldab erinevaid mineraale, nagu näiteks magneesium ja kaltsium, mis on lahustunud vette torudest. Selle tulemusena on vaja kraanivett enne kalade akvaariumisse valamist töödelda lisanditega, mis pehmendavad vett.

Vee karedust kirjeldatakse erinevate parameetritega nagu näiteks GH, ehk üldine karedus (ingl k *General hardness*), DH, ehk karedus kraadides (ingl k *Degrees of hardness*), KH, ehk karbonaatne karedus (ingl k *Carbonate hardness*) või siis PPM-des (*parts per million*). Lihtsuse eesmärgil on võimalik vee kareduse leidmiseks kasutada allpool olevat tabelit 1.1 [5].

Tabel 1.1 Vee karedusparameetrid

DH	PPM	Vee karedus
0 – 3	0 - 54	pehme
3 – 6	54 – 108	suhteliselt pehme
6 – 12	108 – 216	suhteliselt kare
12 – 18	216 – 324	kare
18 – 30	324 – 540	väga kare

Üldine karedus (GH) sõltub kivimikihtidest, mida vesi läbib. Mida kivisemalt alalt on vesi pärit, seda rohkem on seal lahustunud mineraale ning seda suurem on vee karedus. Seevastu sooladelt, ojadest, jõgedest ja järvedest pärit vesi on mineraalivaesem, ehk pehmem. Tulles tagasi kalade juurde, siis tavaliselt on märgitud kalade elamistingimustes vee karedus DH või PPM-des, kusjuures $1 \text{ PPM}^1 = 0,056 \text{ DH}$ [5].

Karbonaatkaredus (KH) iseloomustab vee pH muutumise takistusvõimet, ehk kui palju happelisi ühendeid võib lahusesse lisada, enne kui selle pH muutub. Akvaariumis tekitavad nitraadid lämmastikhapet, mis alandab vee pH-d, kui veel pole võimet seda neutraliseerida. Üldiselt loetakse, et KH ei tohiks langeda alla 4,5, vastasel juhul võib pH tasakaalust välja minna, mis võib põhjustada ohtu kaladele [5].

1.2.4 Ammoniaak, nitritid, nitraadid ja lämmastikutsükel

Ammoniaak on väga mürgine aine kaladele juba väikeses koguses. Ammoniaagi mürgitus põhjustab kalades stressi ja nõrgendab nende tervist, suurendades haigestumise tõenäosust ning suremust. See kahjustab nende lõpuseid ja pärsib normaalset hingamist. Ammoniaaki tuleks kontrollida vähemalt kord kuus või tihemini, kui on kahtlust, et kõik pole nii nagu tavaliselt (Näiteks ei taha kalad süüa või ei uju nii energiliselt). Probleemi põhjuseks võib olla just suurenenud ammoniaagi kogus vees.

Ammoniaaki mõõdetakse PPM-des ning see peaks olema väiksem kui on võimalik tuvastada, ehk 0ppm. Vastasel korral tuleb kasutada ammoniaagi leevendamiseks mõeldud aineid, mis muundavad selle vähem mürgisemaks ühenditeks. Ammoniaagi suurenemine võib olla põhjustatud puhastamata filtrist või siis, kui akvaarium on ülerahvastatud [5].

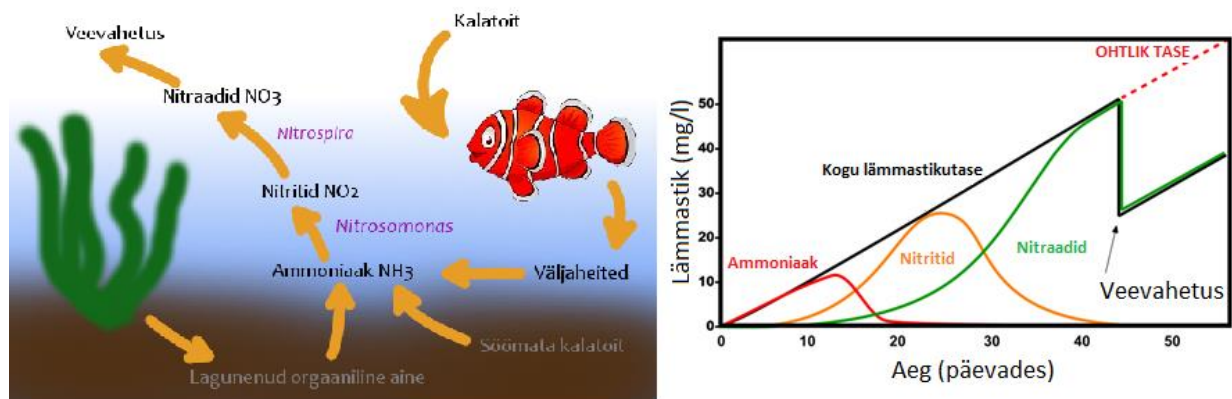
Nitritid tekivad, kui ammooniumi ioon NH_4 muundub bakterite abil vees nitritiks NO_2 . Sarnaselt ammoniaagiga on ka nitritid väga mürgised ning võivad põhjustada kalades stressi. See aga põhjustab omakorda kalades hingamisraskuseid ja immuunsüsteemi nõrgenemist ning erinevad haigusi. Ka nitriteid tuleks kontrollida akvaariumis kord kuus ning ideaalne näit peaks olema 0ppm [5].

Nitraadid tekivad, kui kasulikud bakterid töötlevad nitritid NO_2 ümber nitraatideks NO_3 . Nitraadid on tunduvalt vähem mürgisemad kui nitritid ja ammoniaak, kuid suuremates kogustes põhjustavad need samuti kaladele ohtu. Suurem nitraatide hulk võib olla

¹ PPM – *Parts per Million*

põhjustatud liigsetest kalade ja taimede jäänustest akvaariumis. Ka vetikad põhjustavad nitraatide suurenemist. Nitraatide suurenemisel hakkavad vetikad üha rohkem vohama, mille tulemusena muutub vesi häguseks. Sellepärast tulebki testida ka nitraate, kuigi väikestes kogustes (40ppm) on need kaladele ohutud [5].

Ammoniaak, nitritid ja nitraadid moodustavad ringluse, mida nimetatakse lämmastikutsükliks, mis on näidatud joonisel 1.3.



Joonis 1.3. Lämmastikutsükkel akvaariumis

Kalad ei saa elada ilma bakterita akvaariumis. Enne kalade paigutamist akvaariumisse tuleb akvaariumis läbi teha nn lämmastikutsükkel, mis garanteerib vajalikke bakterite olemasolu kogu akvaariumis. Tsükkel saab alguse kalatoidust või siis tavalises vees leiduvatest kasulikest bakteritest (väheses koguses). Kalade jätmed tekitavad mürgist ammoniaaki, sellepärast on tsükli esimene samm *nitrosomonas* bakterikoloonia suurendamine, mis suudaks lagundada kaladest tekkinud jätmed nitrititeks. Järgmiseks sammuks on uue bakterikoloonia *nitrospira* tekkimine, mis muundab nitritid ohutumaks nitraatideks. Mõlemad bakterikolooniad vajavad elutegevuseks hapnikku. Aeg-ajalt tuleb vahetada akvaariumis vett, et saada bakterikolooniad kontrolli alla, mis parandab vee kvaliteeti [5]. Joonisel 1.3 näidatud graafikul on näha kogu lämmastikuhulga ja lämmastikuühendite muutumist aja jooksul uues akvaariumis, mida kutsutakse ka akvaariumi sissetöötamiseks. Akvaariumi sissetöötamine võib kesta kuni 2 kuud ning selle ajal ei ole soovitatav kalu akvaariumisse panna, kuna kalade eluks vajalikud bakterid ei ole veel välja kujunenud.

2. Funktsionaalne ülevaade ja süsteemi disain

Vastavalt ülesande püstitusele peab projekteeritav akvaariumilahendus olema kasutajasõbralik, energiasäästlik ning lihtne paigaldada. Antud lõputöö raames arendatakse lahendus pidades silmas eelkõige kodukasutajat. See tähendab, et ei mõõdetata kõiki eelnevalt mainitud veeparameetreid otseselt. See võimaldab vähendada vajaminevate sensorite ja elektrodide arvu ning sedasi tuleb ka lõpplahendus soodsam ja lihtsam.

Vee parameetritest mõõdetakse otseselt ainult vee temperatuuri ja pH-d. Nende kaudu on võimalik kaudselt hinnata vees lahustunud mitteioniseeritud lämmastikühendite kontsentratsiooni, mõõtes testribaga kogu lahustunud ammoniaaki.

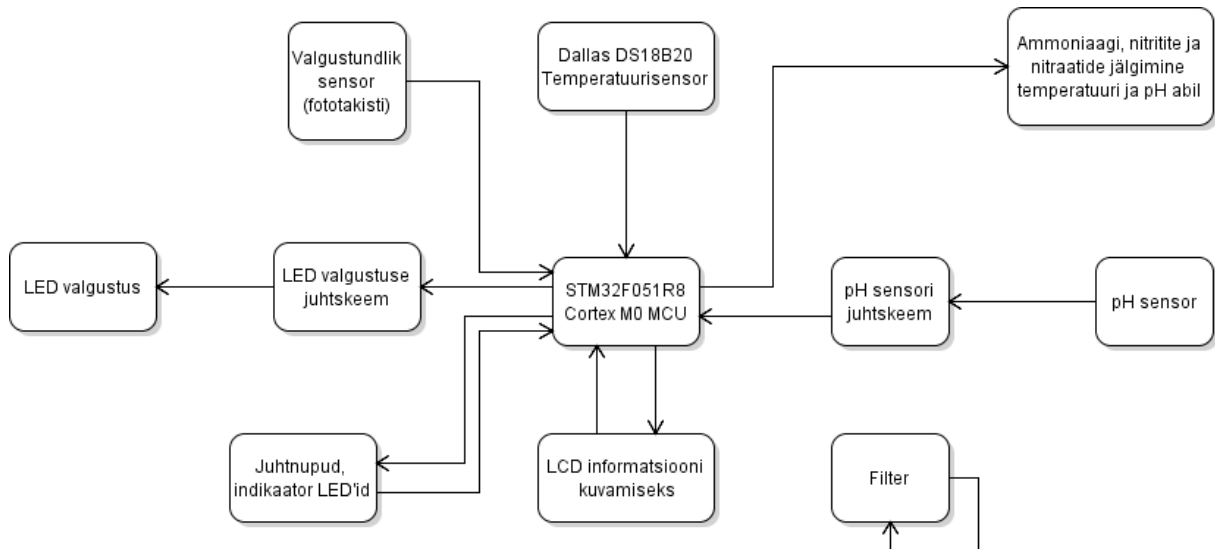
Kuigi vee parameetritest on tähtsal kohal ka vee kareduse ja hapnikusisalduse jälgimine, siis need seadmed on väga kallid ning antud lõputöö raames otsustati need uurimisest välja jätta.

Akvaariumis on väga tähtsal kohal kindlasti ka valgustus. Õige valgustus toob akvaariumi esile ning muudab selle esteetiliselt meeldivaks. Kuigi kõikidele kaladele pole valgustus väga oluline, siis tuleb arvestada, et elustaimed vajavad fotosünteesiks päevavalgust. Kuna aga akvaariumile on vajalik kaas, siis see piirab akvaariumisse langeva valguse hulka ning seega on vajalik tehisvalgusallikas. Selleks kasutatakse valgusdioode, mida on võimalik reguleerida valgussensori abil vastavalt keskkonna valgusele ning ööseks üldse välja lülitada.

Viimaseks juhib kogu süsteemi tööd mikrokontroller, mis kuvab teavet akvaariumi veeparameetrite kohta LCD ekraanil. Kasutajale antakse märku probleemi esinemisel ekraanil ja/või indikaator LED-ide abil.

2.1 Struktuurskeem

Kogu süsteem peab üheaegselt jälgima paljusid parameetreid nagu näiteks veetemperatuur, pH, keskkonna valgustus ning samal ajal juhtima ka mitmeid lisaseadmeid nagu LED-valgustust ja LCD ekraani. Selge on see, et kogu süsteemi juhtimiseks on vaja mikroprotsessorit, mis suudaks töödelda sensoritest saadud andmeid ning kuvada neid ekraanil. Joonisel 2.1 on toodud akvaariumisüsteemi struktuursüsteem.



Joonis 2.1. Akvaariumisüsteemi struktuurskeem

Kesksel kohal on STM32F0 mikrokontroller, mis juhib kogu süsteemi tööd. pH sensori juhtimiseks on vaja juhtskeemi, mis loeb andmeid sensorilt ja saadab need edasi mikroprotsessorile. Vee temperatuuri mõõtmiseks kasutatakse Dallas DS18B20 integraalskeeme, mis lihtsustavad temperatuuri mõõtmist ning toetavad OneWire ühendusviisi. Ammoniaaki, nitrititeid ja nitraate hinnatakse kaudselt vee temperatuuri ja pH abil, kuna eraldiseisvad sensorid teeksid kogu süsteemi väga kalliks. Akvaariumi valguseks kasutatakse võimsaid LED-e, mille juhtimiseks on vaja teha juhtskeem. Valgustuse automatiseerimiseks kasutatakse fotosensorit, mis reguleerib valguse intensiivsust vastavalt keskkonna valgustasemele ning vastavalt kellaajale toimub valgustuse sisse- ja väljalülitamine. Veefilter on autonoomne seade ja töötab kogu aeg, ehk see ei vaja juhtimist.

2.2 ARM Cortex M0 mikrokontroller STM32F0

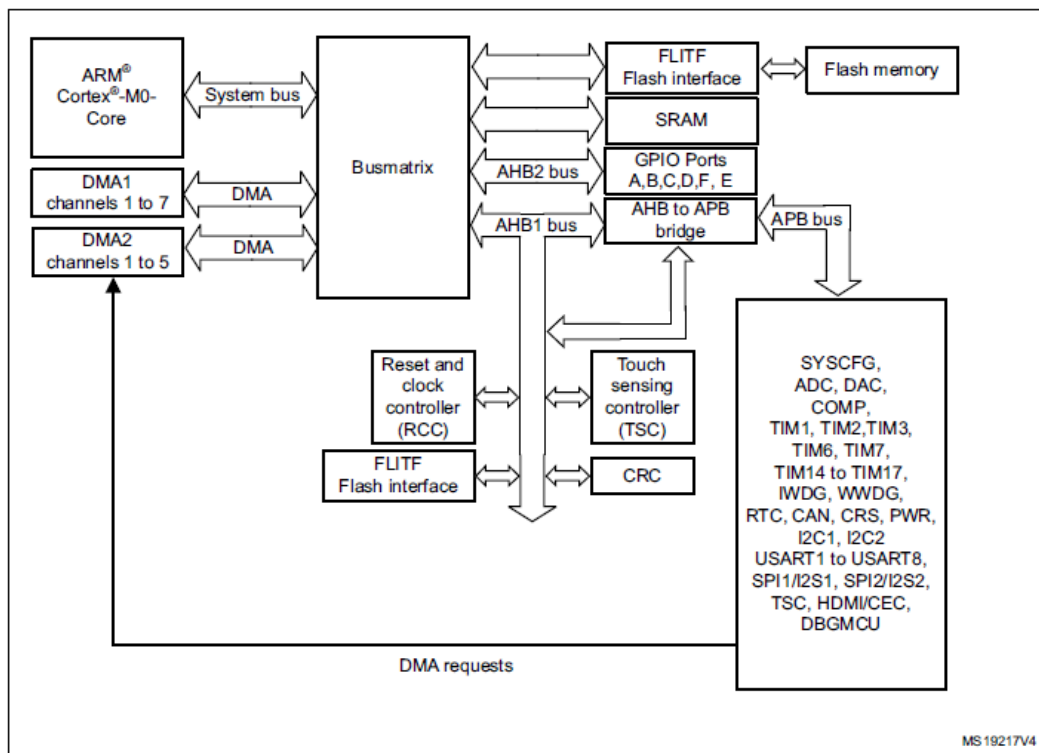
Mikrokontrolleri ülesandeks on juhtida kogu süsteemi. Kogu süsteemi töövõime, efektiivsus ja energiatarve sõltub mikrokontrolleri valikust. Kui mõned aastad tagasi olid populaarsed 5V toitepingel töötavad seadmed, siis hetkel on saadaval palju energiasäästlikumad ARM mikrokontrollerid, mille toitepinge on 3,3V. Neid kasutatakse tänapäeval ka nutitelefonides ja teistes seadmetes, kus on tähtis kiirus ja energiasäästlikkus. Seega otsustati antud projektis kasutada ARM mikrokontrollerit.

ARM mikroprotsessorid põhinevad RISC arhitektuuril, s.o vähendatud käsustikuga arvuti (Reduced Instruction Set Computer). Väiksem käskude arv tähendab, et protsessori töö

põhineb universaalsetel instruksioonidel, mille täideviimiseks on vaja vähem transistore. Väiksem transistoride arv annabki märgatava energiakokkuhoiu.

ARM Cortex protsessorid jagunevad funktsionaalsuse järgi Cortex-A, Cortex-R ja Cortex-M seeriaks. Cortex-A seeria on loodud eelkõige nutitelefonide ja tahvelarvutite jaoks, kus on vaja suurt arvutusjõudlust. Cortex-A seeria protsessoreid on saadaval nii ühe- kui ka mitmetuumalistena, 32 ja 64 bitistena. Cortex-R seeria on mõeldud eelkõige reaalaaja sardsüsteemidele, kus on tähtis väike energiatarve ja lai ühilduvus erinevate teiste seadmetega. Viimaseks Cortex-M seeria protsessorid on disainitud mikrokontrollerite rakenduste jaoks, kus on vajalikud deterministlikud katkestused, minimaalne energiatarve vähendatud loogikavärvate arvuga [7].

Kuna antud projekt vajab energiasäästlikku mikrokontrollerit, siis selleks valiti Cortex-M0 tuumaga mikrokontroller. Cortex-M0 seeria mikrokontrolleri käsustik koosneb ainult 56-st käsust, mis lihtsustab ka tarkvara arendamist. Kasutatakse Thumb käsustikku, mis annab 32 bitise efektiivsuse. Antud kontrolleri energiatarve on ainult 12,5µW/MHz. Cortex-M0 toetab ka JTAG ja SWD (Serial Wire Debug), mis hõlbustab koodi arendamist [8]. Antud kontrolleri struktuurdiagramm on joonisel 2.2 .



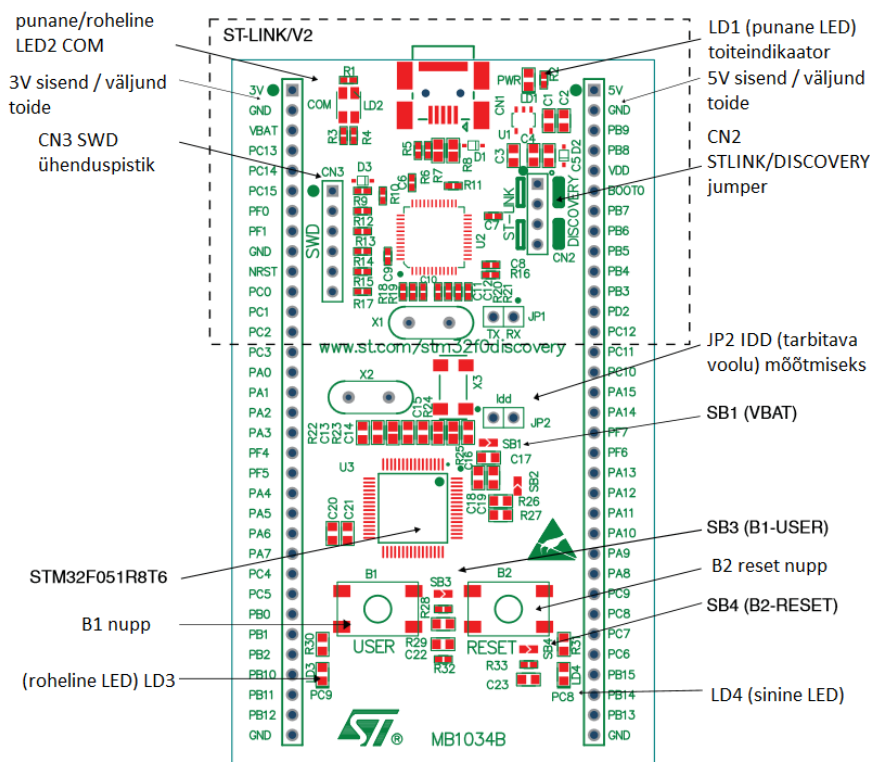
Joonis 2.2. Cortex-M0 mikroprotsessori struktuurdiagramm [9]

Cortex-M0 tuuma ja lisaseadmete vaheline suhtlus toimub läbi liinimaatriksi (*Busmatrix*). See abstraktsioonikiht annab ligipääsu ka DMA'le (*Direct Memory Access*), mis omakorda võimaldab juhtida erinevaid kontrolleri registreid nagu GPIO pordid, ADC, DAC, taimerid, SPI, I²C jne [9].

Cortex-M0 on üks energiasäästlikumaid ARM protsessoreid. See on võimalik tänu sellele, et vaikumisi on kõik lisaseadmed väljalülitatud. Vajaduse tekkimisel tuleb iga lisaseade enne aktiveerida. See tähendab, et kasutajal on võimalik valida vastavalt käsil olevale rakendusele, milliseid lisaseadmeid vaja on. See omakorda vähendab energiakulu.

Peale mikrokontrolleri valikut tuli leida ka vastav arendusplaat, millel oleks võimalik praktiliselt antud projekti arendada. Arendusplaate pakuvad paljud firmad nagu näiteks STMicroelectronics, NXP ja Atmel. Kõige parem hinna ja võimaluste suhet pakkus STMicroelectronics'i mikroprotsessor STM32F051R8 ja STM32F0 Discovery arendusplaat (Joonis 2.3). Valiku peamiseks põhjuseks võib pidada kõige paremini arusaadavat dokumentatsiooni ning näidete olemasolu antud platvormile, mis kiirendas tarkvara arendamist. Allpool on toodud ka arendusplaadi tähtsamad spetsifikatsioonid [10]:

- STM32F051R8 mikrokontroller (64KB Flash, 8KB RAM)
- 8 – 48MHz taktsagedus
- 11 taimerit
- 12 bit DAC, ADC
- RTC
- Sisseehitatud programmeerija ST-LINK/V2 koos SWD silujaga
- Toiteallikas 5V USB või väline 3V / 5V
- 2 LED'i ja 2 nuppu
- Arendusplaadil on ligipääs kõikidele väljaviikudele (54 vaba GPIO'd)



Joonis 2.3. STM32F0 Discovery arendusplaat [10]

STM32F0 Discovery arendusplaadi võib jagada vastavalt funktsioonidele kaheks: ST-LINK/V2 siluja osa ja STM32F0 mikrokontrolleri osa.

ST-LINK/V2 ülesanne on võimaldada STM32F0-le koodi allalaadimist ja silumist. Selleks ühendatakse arendusplaat mini-USB abil arvutiga. ST-LINK/V2 koosneb suurema jõudlusega eelprogrammeeritud STM32F1 (Cortex-M1) protsessorist. Lisaks on plaadil ka SWD ühenduspistik (CN3), mille kaudu on võimalik ST-LINK/V2 abil programmeerida välist Cortex-M seeria protsessorit. Selleks tuleb eelnevalt eemaldada CN2 jumperid, mis võimaldavad valida, kas toimub välise seadme või STM32F0'i programmeerimine [10].

Arendusplaadi alumises osas on peamiselt STM32F0 protsessor, mille sisend-/väljundklemmid on toodud kergeks juurepääsuks plaadi äärtele. Lisaks on ka üks kasutajanupp (BT1) ja reset-nupp (B2) ning kaks LED'i. Arendusplaati on võimalik mitmeti täiendada vastavalt vajadustele. Näiteks on jäetud mitmed vabad jootekohad, mis on mõeldud kvartsresonaatorite lisamiseks, või siis erinevate lisaseadmete seadistamiseks. Viimaseks on võimalik mõõta ka kogu plaadi volutarvet eemaldades jumperi JP2. Ühesõnaga on STMicroelectronics'i STM32F0 Discovery arendusplaat väga laiade võimalustega ning seepärast otsustatigi võtta see antud akvaariumi jälgimissüsteemi arendamiseks.

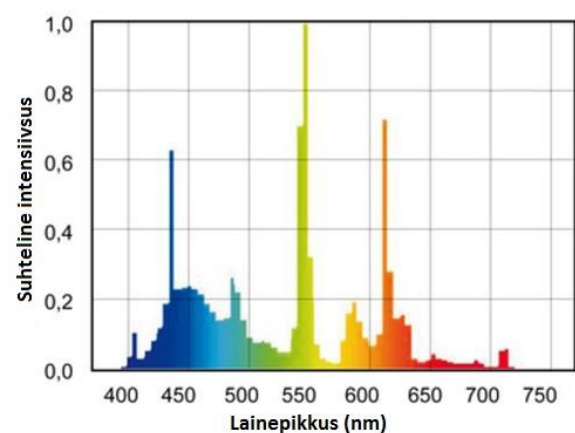
2.3 Akvaariumivalgustus

Valgustus on väga tähtis aspekt, kuna see määrab ära, kuidas akvaarium hakkab välja nägema. Korralik valgustus toob akvaariumis olevad kalad ja taimed paremini esile ning hoiab ära ka liigse vetikate vohamise ja haiguste leviku. Kuna tänapäeval on valgusallikate valik väga suur, siis tuleb uurida erinevaid võimalusi ning võrrelda parameetreid nagu valgusspekter, kelvini värvitemperatuur, valgustõhusus (ingl k *efficacy*) ja võimsus. LED – valgustites on tähtsamad parameetrid PAR, PUR ja CRI. Kui fluorestsentslampide kasutamisel piisas üldisest reeglist, et liitri vee kohta 1W võimsusega valgusti [11], siis LED-ide puhul kipub see reegel olema väga ebatäpne, ning tuleb uurida ka teisi eelnimetatud parameetreid, et saada põhjalikum ülevaade.

Esiteks tuleks selgitada eelmainitud mõisteid ja lühendid lahti, et edukalt võrrelda erinevaid valguslahendusi.

Valgusallika värvustemperatuuri hindamiseks kasutatakse kelvini mõõteskaalat, mille alusel saab valgusallikaid liigitada külmadeks ja soojadeks. „Külmaks“ valguseks nimetatakse valgusallikaid, mille temperatuur on suurem kui 5500K. Külmad valgusallikad kiirgavad sinakas-rohelist valgust, ehk lühema lainepikkusega valgust. „Soojad“ valgusallikad seevastu kiirgavad punakas-oranži valgust, mis jääb pigem valgusspektri tagaossa, ehk valgus on pikema lainepikkusega. Soojade valgusallikate temperatuur on väiksem kui 5500K. Näiteks võib tuua, et küünlaleegi valgus on 1900K, päevavalgus 3500K – 6500K. Kuna taimed fotosünteesivad kõige paremini just päevavalguse käes, sest klorofüll neelab valgust 300nm - 700nm, siis akvaariumivalgustuse jaoks oleks ideaalne valgus kuni 6400K. Sellise valguse käes kasvavad taimed kõige paremini [11], [5].

Vaadates valgusallikate valgusspektreid, mis iseloomustavad valguse lainepikkust, siis tuleb arvestada, et taimed vajavad elutegevuseks teatud lainepikkusega valgust. Reeglina peegeldavad taimed tagasi roheline ja kollane valgus (500nm – 600nm), ehk valgusallika valimisel tuleb silmas pidada, et võimalikult vähe kasutataks seda valgust. Vaadates näiteks 5500K fluorestsentslampi valgusspektrit (Joonis 2.4) , siis on näha, et see



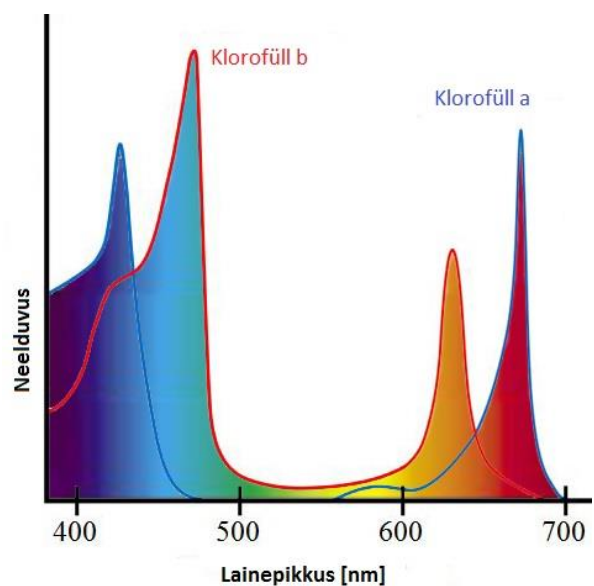
Joonis 2.4 5500K fluorestsentslampi spekter [11]

kiirgab palju 550nm valgust, mis ei neeldu taimedes. Kuigi on esindatud 450nm lainepikkus, siis võib öelda, et antud fluorestsentslamp ei ole kõige parem valik akvaariumivalgustuseks [11], [5].

Tihti aetakse segamini ka valgustõhusus (ingl k *efficacy*) ja efektiivsus (ingl k *efficiency*). Valgusallika efektiivsus näitab, kui palju energiat allikas tarbib. See ei kirjelda, palju tarbitavast energiast muundatakse valguseks. Seevastu valgustõhusus (ühik: lm/W) on rahvusvaheline ühik, mis iseloomustab kui palju nähtavat valgust kiirgab valgusallikas. Kahjuks ei saa ainult valgustõhususe põhjal erinevaid valgusallikaid omavahel võrrelda, kuna see ei kirjelda kui suure osa kiiratavast valgusest on tegelikult taimedele kasulik. Lisaks sellele tuleb vaadata ka PAR ja PUR parameetreid [11], [5].

PAR² kirjeldab kiiratava valguse tüüpi. See määrab ära valguse, mis on vajalik fotosünteesiks taimedes. See on spektrivahemik 400 – 700nm, mis on vajalik taimede ja vetikate elutegevuseks. PAR-i ühikuks on $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ning selle kaudseks hindamiseks võib kasutada valguse temperatuuri või lux-i hinnangut, kuid täpseks mõõtmiseks tuleb kasutada spetsiaalset kvantvalgusmeetrit. UVA kiirgusest kuni 550nm vahemikus sisaldub klorofüllide neeldumisspekter. Silmas tuleb pidada ka seda, et see sisaldab rohelisi lainepikkuseid (500nm – 525nm), mida rohelised taimed peegeldavad, ehk mis on kasutu valgus nende elutegevusele. Olukorra teeb veelgi keerulisemaks see, et on kaks erinevat klorofüllit a ja b, mis neelavad valgust erinevatel lainepikkustel (Joonis 2.5).

A-tüüpi klorofüllit leidub kõikides kõrgema kasvuga taimedes ja punases ja rohelises vetikates. See neelab kõige paremini valgus vahemikus 400 - 450nm ja 650 - 700nm. B-tüüpi klorofüllit esineb ainult madala kasvuga taimedes ja rohelistes taimedes. Selle ülesanne on koguda klorofüllipigmenti, mis annab edasi valgusergastuse a-tüüpi klorofüllile. B-tüüpi klorofüll neelab valgust kõige paremini vahemikkudes 450 - 500nm ja 600 - 650nm.



Joonis 2.5 Klorofüllide neelduvusspekter [12]

² PAR – Fotosünteesiliselt aktiivne kiirgus. (ingl k – *Photosynthetically Active Radiation*)

PUR³ iseloomustab kiirguse tüüpi, mida taimed kasutavad realselt fotosünteesiks, ehk akvaristika seisukohast kirjeldab see kõige paremini valgustust. PUR-i hindamiseks kasutatakse valgusspektrit. Tänapäeva tehnoloogia võimaldab hinnata valgusspektrit üpris täpselt. Võttes arvesse eelmainitud kasuliku spektri teabe, on võimalik leida valgusallikaid, mis kiirgavad just enam selles spektris, mis on taimedele kasulik. Selle tulemusena võib väiksema võimsusega valgusallikas olla efektiivsem, kui suurema võimsusega, kuna see kiirgab just spektris, mida taimed kasutavad elutegevuseks. See võimaldab piirata ka akvaariumis levivaid baktereid. Näiteks sinivetikad, lillakas bakter ja heliobakter kasutavad elutegevuseks just spektriosa, mida tavalised taimed ei neela (rohekas-kollane). Kui piirata antud valgusspektrit, siis on võimalik ka vältida antud kahjulike vetikate levikut akvaariumis [11].

Viimaseks parameetrik on CRI⁴, mis on lihtsalt värviindeks. See iseloomustab kuidas näevad värvid välja eri valgusallikate puhul, võrreldes matemaatiliselt kuidas teatud valgusallikas nihutab kaheksa pastellivärvi asukohta CIE värvusdiagrammil teatud taustvalgusallika suhtes, millel on sama värvustemperatuur. Öeldakse, et CRI on 100, kui valguse peegeldamise käigus valgelt pinnalt selle värv ei muutu. Rahvusvaheliselt on kokkulepitud, et hõõglambi CRI on 100. Akvaristika seisukohast ei ole CRI parameeter nii tähtis, kuna see kirjeldab ainult, kuidas esemed mingis valguses välja näevad [11].

Kokkuvõtteks tuleb akvaariumivalgustuse valimisel vaadata kõige enam PAR ja PUR parameetreid, valgustemperatuuri ning valgustõhusust. Akvaariumitaimed vajavad kõige enam sinakat ja punakat valgust fotosünteesimiseks. Rohelise-kollase valguse vähendamine aitab piirata vetikate vohamist.

Kõige tüüpilisemad valgusallikad, mida on kasutatud juba aastaid akvaariumivalgustites, on fluorestsentslambid. Tänapäeval on nende lampide kasutamine vähenenud LED valgustuse populariseerimisega. Fluorestsentslampides tekib nähtav valgus kui elektrivooluga ergastatakse gaasilises olekus elavhõbedat, mille tõttu tekivad UV-kiirgus paneb helendama fosforiga kaetud toru.

Fluorestsentslampidel on oma standard, mis määrab toru pikkuse ja läbimõõdu. Akvaristikas kasutatakse peamiselt T12, T8, T5 ning kõige uuemaid T2 tüüpi lampe. Üldiselt tarbivad kõik fluorestsentslambid palju energiat ning muudavad sellest ainult osa kasulikuks valguseks. Energiakadu tekib peamiselt pingemuunduris ja elektroodides, mis eraldub

³ PUR – Fotosünteetiliselt kasulik kiirgus. (ingl k *Photosynthetically Usable Radiation*)

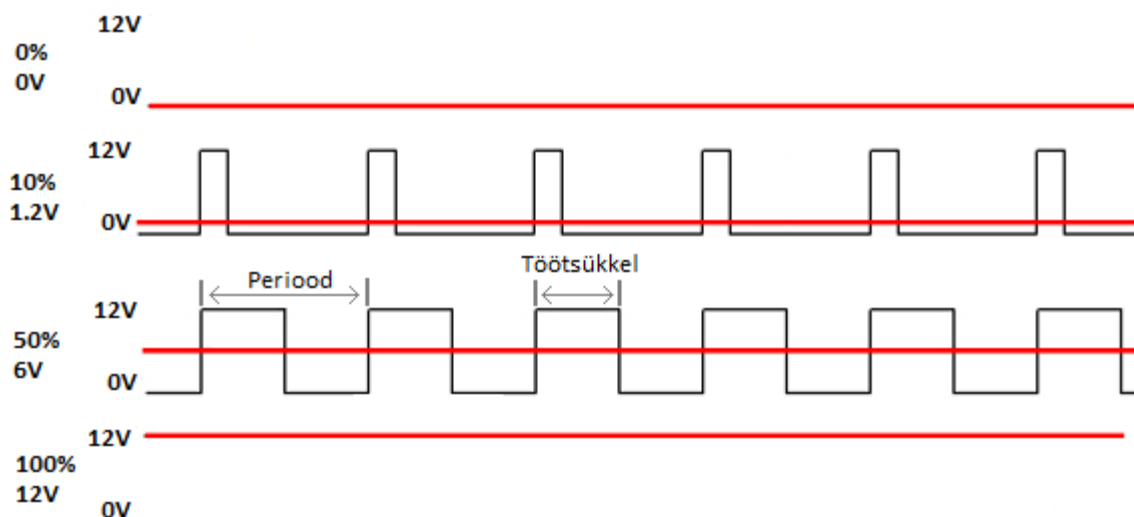
⁴ CRI – Värvindeks. (ingl k *Color Rendering Index*)

soojusena. Kõige uuemate lampide T2 valgustõhusus on 73 lm/W. Siiski pole see võrreldav LED-idega [11].

Tänapäeva valguslahendused on kõige enam LED-põhised. Valgusdiodide kiire areng on suurendanud nende kasutusala indikaatoritest tänavavalgustiteni. Tänu kõrgele efektiivsusele, tööeale (ligi 50 000h) ja võimalusele toota just teatud spektriga diode on need vallutanud kogu turu.

Kuna LED-idel on suunatud valgusvihk, siis kogu nende efektiivne valgus levib ühes suunas ning vajadusel on võimalik seda suunata, et saada huvitavaid efekte. See tähendab, et LED-idel on ka väiksemad kaod. Akvaariumivalgustuse puhul on võimalik kombineerida erinevaid LED-e, et leida ideaalne spekter, mis üheaegselt on kasulik taimedele ja annab kogu akvaariumile loomuliku ilme.

LED-ide kasutamine võimaldab ka reguleerida valguse intensiivsust, mis võimaldab hoida kokku energiat. Näiteks kui päeval paistab päike, siis võib tehisvalguse hulka vähendada või siis üldse välja lülitada, samas kui vihmase ja pilves ilmaga võib reguleerida valguse intensiivsust tugevamaks. Sellist LED-ide valgushulga reguleerimist nimetatakse ka hämardamiseks või dimmimiseks (ingl k *dimming*). Dimmimist on võimalik teostada impulsslaiusmodulatsiooni ehk PWM-i abil, mis on näha joonisel 2.6.



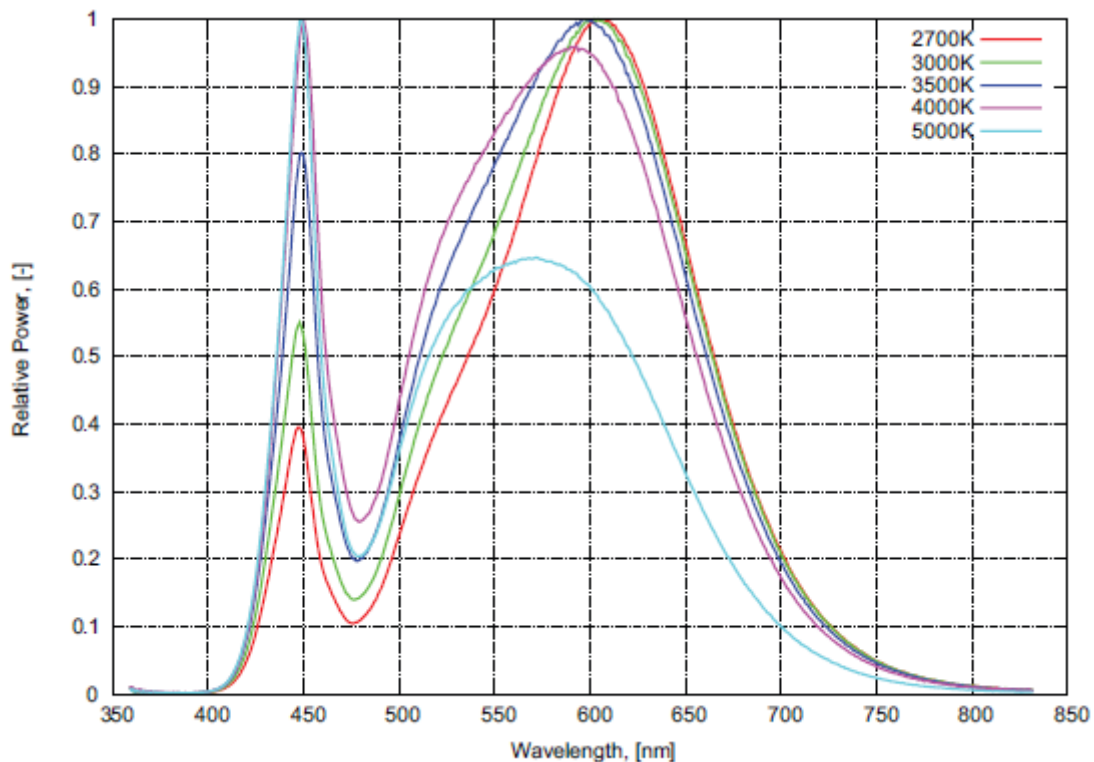
Joonis 2.6 Impulsslaiusmodulatsioon

Impulsslaiusmodulatsiooni tööpõhimõte on selles, et LED-i toiteks on ristküliksignaal, millel on fikseeritud periood. Impulsi laiusega reguleeritakse LED-ide keskmist toitepinget (Joonisel 2.6 punasega tähistatud). Teiste sõnadega lülitatakse LED-id kõrgel sagedusel (alates 1kHz) sisse-välja, mille tulemusena langeb LED-i peale üks osa pingest, mida iseloomustab

töötsükkel (ingl k *Duty Cycle*). Kui töötsükkel on 100%, siis langeb LED-ile kogu toiteallika pinge. Kui aga näiteks töötsükkel on 10%, siis LED-i kiiratud energia on ainult 10% võimalikust energiast. PWM-i kasutamine on energiasäästlik, sest lülitamisel on väiksem energiakadu kui pideval töötamisel. Kui lüliti on suletud, siis kogu energia kandub üle tarbijale ning kui lüliti on avatud, ei tarbi see voolu, mis tähendab, et võimsuskadu puudub.

Võttes arvesse kõik LED-i eelised, siis otsustati antud lõputöö akvaariumivalgustuseks disainida ka LED põhine valgustussüsteem. LED-ide valikul lähtuti sellest, et tegemist on tavalise akvaariumiga, milles soovitakse kasvatada elustaimi ja kalu. See tähendab, et tuleb silmas pidada valgusspektrit, mida taimed kasutavad fotosünteesiks. Eelnevalt selgus, et selleks ideaalne vahemik on 400 – 500nm ja 600 – 700nm. See tähendab, et tuleks vältida roheline ja kollase lainepikkuse kasutamist.

LED-ide tootjaid on tänapäeval väga palju. Tuntumad võimsate valgustus-LED-ide tootjad on Cree, Samsung, Philips LumiLeds ja Bridgelux. Kõige parema hinna ja kvaliteedi suhtega jäi silma Philips LumiLeds. Teiste firmade pakutavad lahendused olid kas antud projekti jaoks liiga kulukad või siis ei leitud sobiva spektri ja mõõtmetega LED-e. Kindel on see, et hiljem tuleb teha valgustuse jaoks eraldi trükkplaat, seega on võimalik kombineerida erinevate omadustega LED-e. Philipsi LumiLeds tooteseeria on väga lai ning alustuseks otsustati uurida Luxeon Rebel Plus LED-e, mis on olemas 2700K – 5000K variantides. Tüüpiline pingelang on 3V ning nominaalne vool 350mA, piisava jahutuse korral võib voolu suurendada kuni 1A. Värvindeks (CRI) on 80, mis tähendab, et valgus ei moonuta värve. Tähelepanu tuleks kindlasti pöörata valgusspektrile (Joonis 2.7), mis sõltub LED-i valguse temperatuurist. Soojema valguse puhul on maksimaalne energia tipp 600nm piires [12].



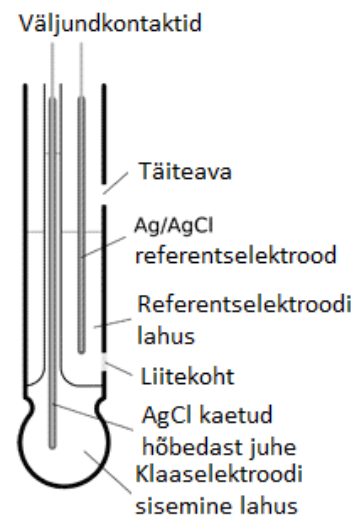
Joonis 2.7 Luxeon Rebel LED valgusspekter [12]

Külmema valguse puhul on energiamaksimum aga väiksema lainepikkuse 450nm juures. Kuna fotosünteesiks on vajalik valgus peab sisaldama mõlema lainepikkusega valgust, ei piisa ainult ühe valgustemperatuuriga LED-i valikust. Kui valida näiteks ainult 3000K valgusallikad, siis võib puudu jääda lühema lainepikkusega sinakast valgusest. Samamoodi külma valguse eelistamisel (5000K) võib jääda väheseks 600nm valgusest. Seega oleks mõistlik ära kasutada LED-ide kasulikku omadust ja segada kokku eri soojusega valgusallikaid. 3000K ja 5000K täiendavad üksteist täiuslikult ning kui valida sooja ja külma valguse suhteks 2:1, siis tulemuseks on täpselt selline valgustus nagu vaja, maksimeerides kasulikku valguse hulka, mida taimed neelavad.

2.4 Vee pH mõõtmine

Vee pH jälgimine on väga oluline, et hoida kalad terved ja tugevad. Vee pH näitab vesiniku ionide kontsentratsiooni, ehk kui happeline või aluseline on vesi. Neutraalseks pH-ks loetakse lahust, mille pH on 7, mille suurenedes on lahus aluseline ja vähenedes happeline. Akvaariumivee pH jälgimine on tähtis, kuna see mõjutab kalade tervist. pH suurenedes muutuvad lämmastikuühendid mürgiseks ning võivad põhjustada kaladel terviseprobleeme.

pH-d mõõdetakse pH-elektroodiga (Joonis 2.8), mis käitub kui kõrge impedantsiga pingesallikas. pH-elektrood koosneb klaasist silindrist, mille otsas on õhukesest klaasist kera. Elektroodi sees on kaks hõbedast kontakti, üks nendest on referents pH-ga vedelikus ja teine ulatub kera sees olevasse lahusesse. Elektroodi spetsiaalne klaas sisaldab leeliselise metalli ioone ning need reageerivad vesiniku ionidega lahuses, mis tekitab potentsiaalide vahe. Seda kirjeldab täpsemalt Nernsti võrrand, mis annab potentsiaalide vahe kaudu lahuse pH väljaspool klaasi. Kuna mõõdetav signaal on kõrge impedantsiga, on selle mõõtmiseks vaja spetsiaalset pH-mõõtjat, mis muudab selle kõrgeoomilise signaali madalaoomiliseks ning võimendab seda piisavalt, et see oleks mõõdetav [13], [14],[15].

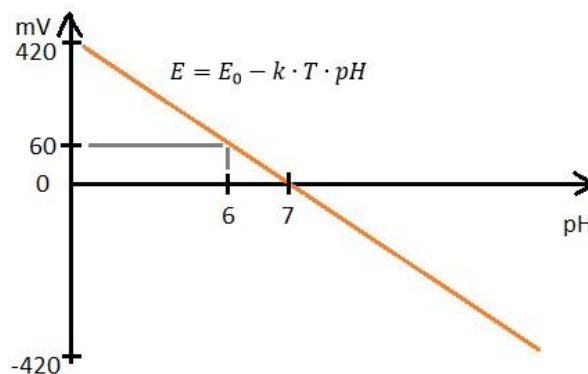


Joonis 2.8 pH-elektroodi ehitus [13]

Nernsti võrrand avaldub kujul:

$$E = E_0 - k \cdot T \cdot pH$$

Antud valemis on E elektroodi väljundpinge, E_0 – sensori spetsiifiline konstant, k – Boltzmanni konstant, T – lahuse temperatuur kelvinites ning pH on lahuse pH. Nernsti võrrandi graafik on näha joonisel 2.9:



Joonis 2.9 Nernsti võrrand

Nernsti võrrand võimaldab teisendada potentsiaalide vahe arusaadavaks pH-näiduks. pH vahemikule 0 – 14 vastab potentsiaalide vahemik 420mV kuni -420mV, kusjuures iga pH ühiku kohta vastab potentsiaalimuut 60mV. Kalibreeritud pH-elektrood annab neutraalse pH (7) korral potentsiaalide vahe 0mV. pH vähenedes suureneb potentsiaalide vahe ning

sarnaselt pH suurenedes muutub potentsiaalide vahe negatiivsemaks. Elektroodi kalibreerimiseks kasutatakse reeglina kalibreerimisvedelikke pH 7,0 ja pH 4,0 [15].

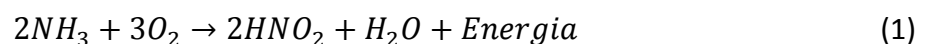
Lisaks pH-elektroodile on olemas ka pH mõõteseadmed, kuid nende hinnavahe jääb 100€ - 600€ vahele [16], [17]. Lisaks pH-le on võimalik nende seadmetega mõõta ka temperatuuri, vee juhtivust ja andmeid logida, mis muidugi sobiks hästi akvaariumi tarbeks, kuid kahjuks ei tasuks see antud projekti juures ära, kuna lisaseadmed võtavad rohkem ruumi ning need ei ole mõeldud pidevaks mõõtmiseks.

Kuna pH mõõteseadmed on suhteliselt kallid, siis antud projekti jaoks ehitatakse ise võimendiskeem, mis muudab sensorist tuleva kõrge impedantsiga signaali loetavaks mikrokontrolleri analoog-digitaal muundurile. pH-elektroodiks valiti Extech Instruments standardne 12 x 160 mm elektrood BNC ühenduspistikuga.

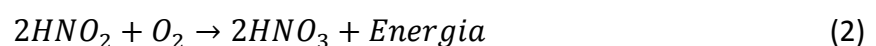
2.5 Lämmastikuühendite kaudne mõõtmine

Lisaks temperatuurile ja pH-le tuleb vee parameetritest kindlasti jälgida ka erinevate lämmastikuühendite kogust vees, nimelt ammoniaaki, nitriteid ja nitraate, mis tekivad bakterite loomuliku elutegevuse tagajärjel. Akvaariumis toimub pidev lämmastikuühendite muundumine ehk lämmastikutsükel, mida kirjeldati eelmises peatükis (Joonis 1.3).

Lämmastikutsükel algab ammoniaagist (NH_3), mis tekib kalade söömata jäänud toidust ja kalade väljaheidetest. Osa ammoniaaki satub vette ka kalade lõpuste kaudu. Tänu *Nitrosomonas* bakteritele toimub reaktsioon (1), mille käigus muundavad need ammoniaagi nitrititeks (NO_2^-) tarbides ise eralduvat energiat [18].



Vees aga laguneb lämmastikhape HNO_2 vesiniku ja nitriti ionideks H^+ ja NO_2^- . Nitritid ei ohusta kalasid, kuna reeglina ei tõuse selle kontsentratsioon ohtlikule tasemele, sest tekivad uued bakterid nimega *Nitrospira*, mis muudavad nitritid ohututeks nitraatideks (NO_3^-) alloleva võrrandi (2) järgi [18].



Nitraadid ei ole toksilised ning ei ohusta otseselt kalade tervist. Veelgi enam, need on vajalikud kalade ja taimede normaalseks elutegevuseks. Siiski aja jooksul hakkab nitraatide hulk akvaariumis suurenema, mille tõttu võivad hakata akvaariumis kasvama vetikad. Vaatamata sellele, et taimed aitavad nitraate teatud määral tasakaalus hoida tarbides neid oma elutegevuseks, on vajalikud ka aeg-ajalt osalised veevahetused, mis vähendavad nitraatide (ja ammoniaagi) hulka vees [18].

Kõige ohtlikum lämmastikuühend kaladele on vees lahustunud ammoniaak, täpsemalt ioniseerimata ammoniaak ehk NH_3 . Looduses esineb ammoniaak värvitu, lõhnatu ja maitsetu gaasina. Vees lahustub ammoniaak kaheks komponendiks: ioniseeritud ammoniaagiks (NH_4^+) ja ioniseerimata ammoniaagiks (UIA)⁵ NH_3 , kusjuures lahustuvus sõltub vee temperatuurist ja happelisusest (pH-st). Kaladele on eelkõige mürgine just ioniseerimata ammoniaak, alates 0,01mg/l kohta mõjub juba kaladele väga halvasti ning kontsentratsioon 2mg/l kohta juba reeglina mageveekaladele surmav. On olemas mereveekaladid ja krabisid, kes taluvad ka ammoniaagi taset üle 2mg/l. Ideaaljuhul peab olema ammoniaagi näit 0mg/l. Suurenenud ammoniaagi hulk viitab sellele, et akvaarium kui ökosüsteem ei ole tasakaalus ning vajab inimese sekkumist [19], [20].

Ammoniaaki akvaariumis on võimalik mõõta gaasi spektromeetriga. Kahjuks pole aga see kodustes tingimustes praktiline, kuna seade ise on väga kallis ning mõõtmisprotseduur on keeruline. Ammoniaagi taset koduakvaariumis mõõdetakse tavaliselt paberist testriba abil, mis annab aga tulemuseks mitte ioniseerimata ammoniaagi, vaid kogu ammoniaagi hulga, ehk TAN⁶. UIA moodustab aga TAN-ist teatud osa, mille saab välja arvutada [19].

Ioniseerimata ammoniaagi hulk sõltub vee temperatuurist ja pH-st. pH suurenedes muutub ammoniaak kaladele ohtlikumaks. Näiteks kui pH suureneb ühe võrra, tähendab see UIA kümnekordset suurenemist. Ka temperatuuri tõusmisega muutub UIA ohtlikumaks, kuna kõrgem temperatuur tähendab, et aine osakesed liiguvad kiiremini ringi [19].

Ioniseerimata ammoniaaki saab kaudselt mõõta, selleks on vaja teada vee temperatuuri, pH-d ning lisaks veel kogu ammoniaagi kogust vees (TAN). UIA osa f on arvutatav valemi (3) järgi.

$$f = \frac{1}{10^{(pK_a - pH)} + 1} \quad (3)$$

⁵ Ingl k. UIA – *Un-ionized Ammonia*

⁶ Ingl k. TAN – *Total Ammonia Nitrogen*

Antud valemis on pKa dissotsiatsiooni konstant, mis sõltub temperatuurist T (kelvinites):

$$pKa = 0,0901821 + \frac{2729,92}{T}.$$

Ioniseerimata ammoniaagi osa f näitab kui suure osa moodustab see kogu ammoniaagist, seega tuleb UIA leidmiseks korrutada f mõõdetud TAN-iga. Tulemuseks on ioniseerimata ammoniaagi hulk vees ühikutes mg/l. Nagu eelnevalt mainitud, siis kogused alates 0,01mg/l on kaladele ohtlikud. Lisas 1 on toodud tabel, mis näitab ioniseerimata ammoniaagi osa f sõltuvust erinevatel temperatuuridel ja pH-del [19].

Antud lõputöö raames otsustati ammoniaagi hulka kaudselt hinnata. See tähendab, et otseselt ammoniaagi mõõtmiseks sensorit ei kasutata. Kuigi sellised sensorid on olemas, siis need on väga kallid ning kodukasutaja jaoks ka ebapraktilised. Ioniseerimata ammoniaagi hulka akvaariumis aitab määrata UIA osakaal, mis arvutatakse välja pH ja temperatuuri kaudu. Kogu ammoniaagi (TAN) hulga määramiseks on tavakasutajal soodsam ja lihtsam kasutada testriba, mis on piisava täpsusega. Teades TAN-i ja UIA osakaalu on kasutajal lihtne arvutada ioniseerimata ammoniaagi hulk vees ning vajadusel tegutseda vastavalt.

2.6 Akvaariumivee filter

Kuigi akvaariumis aitavad hoida bioloogilist tasakaalu ka taimed, siis ilma filtrita on väga keeruline vett puhtana hoida. Akvaariumifiltrit võib pidada ka kui akvaariumi südameks. Selle ülesanne on puhastada vett erinevatest jääkainetest, lisada vette hapniku ning hoolitseda vee ringluse eest, mis hoiab ka veetemperatuuri ühtlasena. Filter peab töötama ööpäevaringselt, välja arvatud kui vahetatakse akvaariumis vett või tehakse muid hooldustöid.

Akvaariumivee filtrid jagunevad peamiselt kolmeks: mehaanilised, keemilised ja bioloogilised. Osa filtreid sisaldavad kõiki kolme komponenti ning on võimelised vett puhastama kõigil kolmel etapil. Mehaanilise filtri ülesanne on eemalda veest hõljuvad osakesed. Keemiline filter eemaldab veest mitmed lahustunud ained. Tüüpilised keemilised filtrid on näiteks süsiniku baasil. Keemilisi filtreid peab tihedalt vahetama, kuna nad lähevad kiiresti umbe, võimalik on ka see, et seal hakkavad elama bakterikolooniad, mis lagundavad lämmastikuühendeid nagu bioloogilises filtris. Bioloogilises filtris elavad kasulikud bakterid, mis muudavad ammoniaagi ja nitraadi ohutuks nitritiks. Kuna bakteritele on vaja hapnikurikast

elukeskkonda, siis on vee hapnikuga rikastamine väga oluline. Tähtis on ka asjaolu, et bioloogilist filtrit ei tohi kraaniveega pesta, vaid tuleb loputada akvaariumis oleva veega. Kraanivesi tapab ära kõik kasulikud bakterid ning filter muutub kasutuks [21].

Filtreid võib jaotada ka akvaariumisisesteks ja akvaariumivälisteks filtriteks. Akvaariumi sees olevad filtrid on reeglina mõeldud väiksematele akvaariumidele (kuni 200L). Akvaariumivälised filtrid on mitmeetapilised ning kogukad. See tähendab, et need peavad olema akvaariumi kõrval. Nende eelis on see, et neid on võimalik peita akvaariumi taha või kappi ja sedasi ei riku need üldist akvaariumiümbrust ära [21].

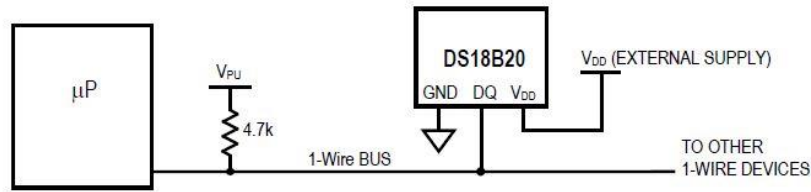
Tuntumad filtrite tootjad on Eheim, JBL ning Aquanova. Antud akvaariumi jaoks valiti Eheimi Pickup 45 sisefilter, mis on mõeldud kuni 45L akvaariumile. Filter töötab otse vooluvõrgust ning on autonoomne ega vaja juhtimist mikrokontrolleri poolt.

2.7 Temperatuuri mõõtmine

Akvaariumivee temperatuur on oluline parameeter, mis on vajalik kalade hoolitsemiseks. Erinevad kalad vajavad erineva temperatuuriga vett. Lisaks sellele on temperatuuri mõõtmine vajalik ammoniaagihulga määramiseks.

Temperatuuri võib mõõta erinevate sensoritega, kuid kõik ei ole praktilised ja piisava täpsusega akvaariumi jaoks. Tuntumad on näiteks tavaline termomeeter ja ribakleeps või siis elektroonika vallast termopaar, termistor või digitaalne IC sensor. Kuna antud süsteemi kesksel kohal on mikrokontroller, siis loogiline valik on digitaalse liidesega sensor. Muidugi oleks võimalik kasutada ka termopaari või termistori, kuid need ei sobi ka peamiselt vähese täpsuse pärast. Reeglina on nende täpsus +/- 1°C kraadi, mis ei ole piisav akvaariumi jaoks.

Temperatuuri mõõtmiseks valiti Dallase (Maxim) DS18B20 sensor. Sensor annab temperatuuri digitaalse signaalina. See võimaldab mõõta temperatuuri 12bitise täpsusega, s.t 0,0625 °C sammudega. Mõõtevahemik on -55°C ... +125°C, mõõtetäpsusega +/- 0,5°C vahemikus -10°C ... +50°C. Selle üks unikaalne omadus on ka OneWire liidese olemasolu, mis võimaldab ühendada ühe mikrokontrolleri sisendi külge mitu temperatuurisensorit, vähendades sedasi vajaminevate mikrokontrollerite sisendite arvu (Joonis 2.10) [22].



Joonis 2.10 Dallas DS18B20 temperatuurisensori ühendusdiagramm välise toiteallikaga [22]

Lisaks sellele võib sensor töötada niinimetatud „parasiittoite režiimis“. See tähendab, et DS18B20-ga suhtlemiseks pole isegi vaja välist toiteallikat, kui see peaks teatud rakenduses kriitiline aspekt olema. Toidet saab sensor siis andmeliini, ehk DQ väljaviigu pealt. Antud juhul otsustati kasutada sensorit koos välise toitega, mis säästab ühe väljatransistori [22].

2.8 Kasutajaliides

Iga seade peab mingil määral ka kasutajale tagasisidet andma ja samas võimaldama kasutajale navigeerimist programmi töös. Kõige universaalsem võimalus on graafiline tagasiside, ehk siis displei või ekraan. Ekraani abil on võimalus kasutajale kuvada informatsiooni tähtmärkide või siis kujutiste kujul. See on väga lihtne viis kuvada suurt hulka informatsiooni korruga või siis teatud struktureeritud kujul. Teine võimalus illustreerida programmis toimuvat on kasutada indikaatoreid, reeglina valgusdioode. Indikaatorid võivad näiteks vilkudes märku anda, kui on vaja kiiresti kasutaja sekkumist mingi parameetri muutumisel ohtlikule tasemele.

Kuna antud akvaariumilahendus võimaldab jälgida ja kuvada korruga suhteliselt palju informatsiooni, siis on mõistlik kasutada informatsiooni kuvamiseks displeid, täpsemalt vedelkristall (LCD) tähtnumbrilist displeid.

Tänapäeval on displeide valik väga lai, alates mustvalgetest vedelkristall ekraanidest kuni värviliste LED ekraanideni. Valik sõltub projekti keerukusest, vajamineva ekraani suuruselt (kuvatava informatsiooni hulgast) ning liidesest mikrokontrolleriga. Siiski ühed populaarsemad hobiprojektides kasutatavad LCD ekraanid põhinevad Hitachi HD44780 kontrollerial. Need tähtnumbrilised ekraanid on saadaval eri suurustega, alates 8 tähemärki 1 real kuni 40 tähemärki 4 real. Antud projekti funktsioone ja vajadusi arvestades valiti ekraaniks 16x2 tähemärgiga sinise taustvalgusega LCD, mis on joonisel 2.11.



Joonis 2.11 Hitachi 16x2 LCD ekraan [autori pilt]

Hitachi HD44780 on väga mitmekülgne kontrolleri, samas on selle ühendamise mikrokontrolleriga väga lihtne ning ei vaja liiga palju väljaviike. Korraga suudab üks HD44780 kuvada ühe või kaks 8-märgilist rida sümboleid. Sümboli suurus sõltub LCD-st, kas 5 x 8 pikslit või 5 x 10 pikslit. Siiski ei vaja 16-märgilise ja kaherealise LCD jaoks kaks kontrolleri, vaid ainult 40-väljundiga laiendusliidest. HD44780 koosneb peamiselt kahest 8-bitisest registrist: instruksiooniregister (IR) ja andmeregister (DR). IR ülesanne on juhtida LCD tööd ning dekodeerida mikrokontrollerist saadetavaid käskusid. Lisaks on IR-is salvestatud ka mitmed käsud nagu kursori liigutamine, ekraani tühjendamine ja ka graafikaandmestiku mälupeade aadressid (CGRAM ⁷ ja DDRAM ⁸). Andmeregistris (DR) seevastu toimub andmete puhverdamine. See tähendab, et seal hoitakse DDRAM-i või CGRAM-i loetavaid või kirjutatavaid andmeid [23].

Ekraani suureks eeliseks on võimalus luua tarkvaras menüü süsteem. See tähendab, et kasutajal on võimalik valida, mis informatsiooni ta antud ajahetkel soovib näha. Nuppude abil on võimalik menüüs navigeerida ning seadistada ka näiteks kellaega või siis kuvada mälu salvestatud hiljutiste parameetrite väärtusi. Kogu toimingute tegemiseks peaks paigaldama minimaalselt kaks juhunuppu: ühe funktsioon on menüüs valiku tegemine, ehk analoogselt arvutile klavv „Enter“ ning teise nupu saaks muuta parameetri väärtusi või siis liikuda menüüs edasi, analoogselt nooleklahvidele arvutil.

⁷ CGRAM – *Character Generator RAM* – Sisaldab kõiki sümboleid ning lisaks veel on võimalus kasutaja poolt programmeerida neil sümboleid.

⁸ DDRAM – *Display Data RAM* – Sisaldab ekraani 8-bitiseid kohaaadresse, kuhu kirjutatakse andmeid ekraanile kuvamiseks.

3. Elektriskeemid

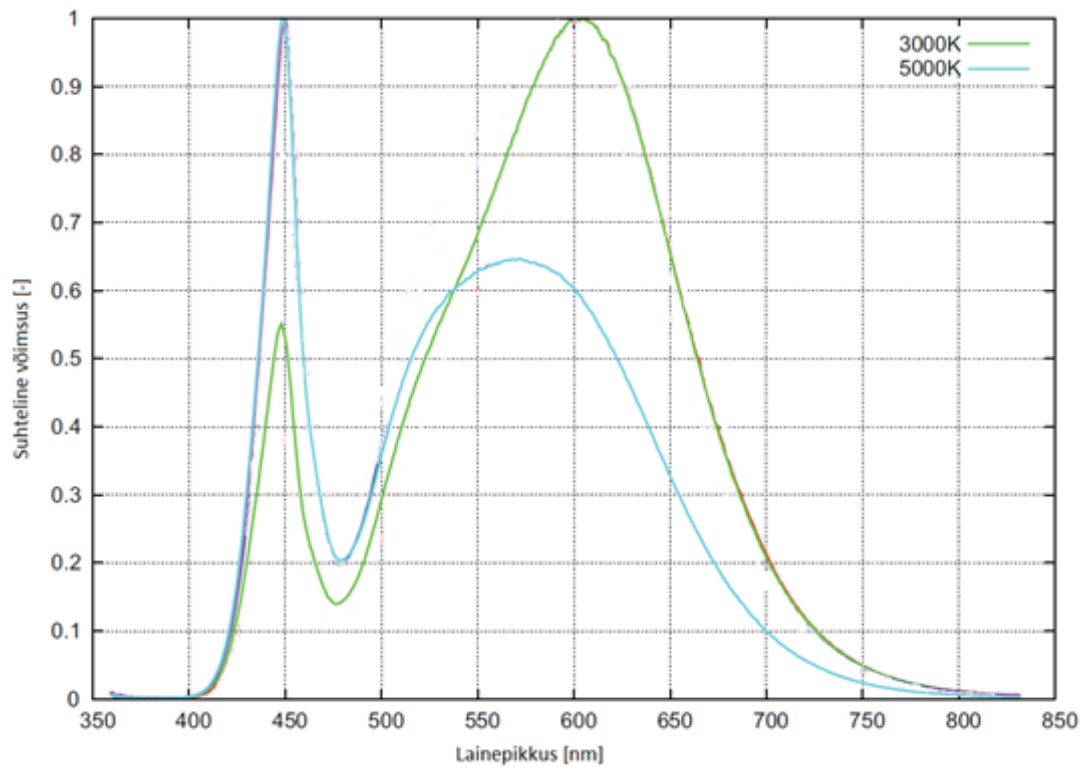
Antud peatükis koostatakse akvaariumilahenduse elektriskeemid ning tehakse vajalikud arvutused. Komponentide valik põhineb peamiselt eelnevalt määratletud parameetritel. Füüsiliselt tehakse kaks erinevat trükkplaati: üks LED valgustuse jaoks ning teine trükkplaat toitemooduli, pH sensori ning mikrokontrolleri jaoks, millele edaspidi viidatakse ka kui põhimoodulile. Põhimooduli elektriskeem on jaotatud vastavalt funktsioonidele kolmeks: toitemoodul, pH sensori skeem (analoogskeem) ja mikrokontrolleri skeem koos lisadega (digitaalskeem). Sellest jaotusest lähtutakse ka hiljem antud trükkplaadi disainimisel.

3.1 Akvaariumi valgustuse elektriskeem

Akvaariumi valgustuse elektriskeemi ülesanne on muundada toitepinge stabiilseks toitevooluks ning võimaldada mikrokontrolleri abil valguse reguleerimist. Elektriskeemi disainimisel võeti aluseks valitud LED-ide parameetrid. Vastavalt andmelehele on Luxeon Rebel LED-id konstantse voolutarbega seadmed, tarbides tüüpiliselt voolu 350mA – 700mA, mis tähendab, et on vaja disainida konstante vooluallikas. Kuna tegemist on võimsate LED-idega⁹, siis on vajalik ka korralik jahutus. Jahutuse probleemi aitab lahendada thermal viade paigutus, mis juhib soojust läbi trükkplaadi alumisele vasekihile. Piisava jahutuse korral taluvad Rebel LED-id kuni 1A voolu ja tarbitav võimsus kuni 3W [12].

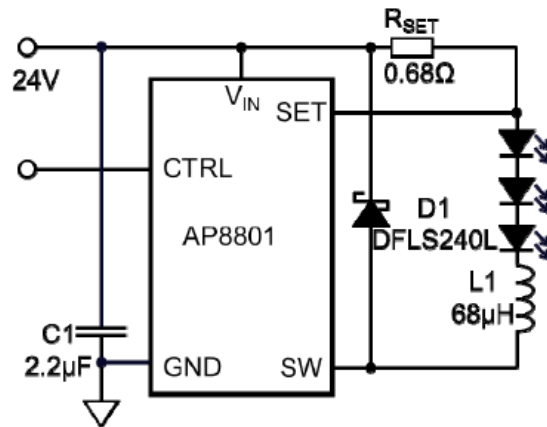
Konstantse vooluallika disainimisel lähtuti valitud LED-ide parameetritest, peamiselt vajalikust voolutarbest. Kuna LED-ide nominaal voolutarve on 350mA – 700mA ja liiga suurt valgusvõimsust ühe diodi kohta pole ka vaja, siis otsustati kasutada alalisvooluregulaatorit Diodes AP8801, mis suudab anda kuni 500mA toitevoolu. Siiski kuna tegemist on akvaariumilahendusega, pole vajalik LED-e liiga suure vooluga juhtida. Vastavalt teises peatükis leitud parameetritele, kasutatakse akvaariumivalgustuse jaoks 3000K ja 5000K LED-e, mille valgustõhusus minimaalse 350mA juures on vastavalt 98lm/W ja 110lm/W. Antud kombinatsioon annab tulemuseks kõige parema valgusspektri (Joonis 3.1), mis sobib taimede kasvuks ja samas tõstab akvaariumis olevad kalad esile [12],[24].

⁹ Tüüpiline pingelang on 2,76V 350mA voolu korral, seega tarbitav võimsus kuni 1W.



Joonis 3.1 Luxeon Rebel LED valgusspekter (3000K ja 5000K) [12]

Elektriskeemi disainis lähtuti AP8801 andmelehes esitatud tüüpskeemist, mis on toodud joonisel 3.2.



Joonis 3.2 AP8801 tüüprakendus skeem [24]

AP8801 on lülitava iseloomuga (ingl k *Switching*) alalisvoolu muundur, mis võimaldab juhtida kuni 13 jadaühenduses LED-i, genereerides ühtlast toitevoolu. Lai sisendpinge vahemik (8V – 48V) võimaldab seda kasutada erinevates lülitustes. Stabiilne vooluallikas on vajalik, kuna see tagab ühtlase voolu LED-ide ahelas, mis tähendab, et valgusdiodide suhteline

heledus on sarnane ja vool on LED-ide vahel ühtlaselt jaotatud. Antud kivi võimaldab kõrgeid lülitussagedusi kuni 700kHz, mis vähendab vajamineva induktori mõõtmeid [24].

Akvaariumivalgustuse toitepingeks on 12V, kusjuures ühe diodi pingelang on 2,76V. Kuna LED-id on jadaühenduses, siis kogu pingelang on $2,76V \cdot 3 = 8,28V$.

LED-e läbiv vool (I_{LED}) on määratud välise takisti R_{set} abil järgmise valemi kaudu:

$$I_{LED} = \frac{V_{THD}}{R_{SET}},$$

kus V_{THD} on pinge V_{in} ja SET viikude vahel. V_{THD} on teatud lävipinge, mille nominaalne suurus on 200mV [24]. Kuna on teada, et LED-ide nominaalvooluks valiti antud lahenduse puhul 350mA, siis on võimalik arvutada välja voolupiirav takisti R_{SET} :

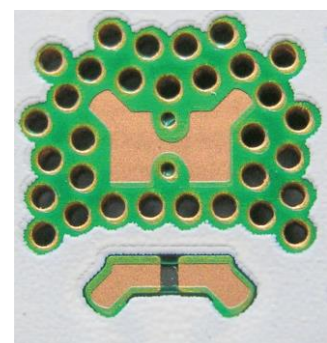
$$R_{SET} = \frac{V_{THD}}{I_{LED}} = \frac{200mV}{350mA} \approx 0,571\Omega.$$

Kuna leitud väärtusega takistit pole saadaval, siis tuleb võtta R_{SET} väärtuseks 0,5 Ω . Arvutatakse uus LED-e läbiv vool:

$$I_{LED} = \frac{200mV}{0,5\Omega} = 400mA.$$

Kuigi saadud vool on suurem oodatud suurusest, on see siiski LED-ide nominaalvoolu vahemikus. Suurema LED-i läbiva voolu korral on valgus intensiivsem.

Kindlasti tuleb arvestada ka sellega, et eralduv võimsus antud ahelas võib muutuda kriitiliseks ning seda peab arvestama trükkplaadi disainimisel ja komponentide valikul. Teades LED-ide läbivat voolu ja nominaal pingelangu (2,77V), saab LED-i poolt tarbitavaks võimsuseks $P = 2,77V \cdot 400mA \approx 1,1W$. Kuna Rebel LED-id on suhteliselt suure efektiivsusega, siis suurem osa tarbitavast võimsusest läheb valguseks. Efektiivsust tõstab veelgi see, kui kasutada toiteks impulsslaiusmodulatsiooniga (PWM)

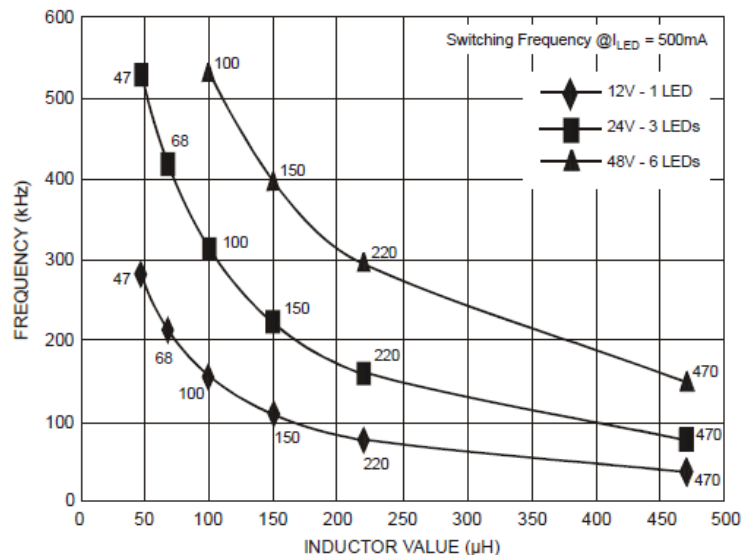


Joonis 3.3 Luxeon Rebel LED jootejalg koos thermal viadega [12]

signaali. Sel juhul ei tarbita pidevat voolu, vaid vooluimpulsse, mis säästavad ka energiat. Siiski esineb ka soojuskadu, mille hajutamiseks võib kasutada kas alumiiniumtrükkplaati või siis tavalist kahepoolset FR4 trükkplaati koos viadega plaadi alumisele vasekihile, mis hajutavad

tekinud soojust. Soovitatud viade paigutus, mis annab soojustakistuseks 7K/W, on antud ka LED-ide andmelehel ning on näidatud joonisel 3.3 [12].

Järgmiseks kriitiliseks komponendiks, millele tuleb tähelepanu pöörata, on kasutatav induktor. Induktoriga on määratud pingemuunduri lülitussagedus.



Joonis 3.4 Lülitussageduse sõltuvus induktori väärtusest [24]

Madalamal lülitussagedusel on mitmeid eeliseid, näiteks täpsem ja stabiilsem väljundvool, väiksemad lülitusest tingitud energiakaod ning suurem lävipinge (ingl k *Dropout Voltage*). Kõrgema lülitussageduse eelised on väiksemate parameetritega ja mõõtmetega komponendid ning kiirem reaktsiooniaeg. Mida väiksema väärtusega on induktor, seda suuremal sagedusel toimub lülitus, et hoida pinge vajalikul tasemel. Väiksema induktiivsusega induktori eelis on selle väiksemad füüsilised mõõtmed, mis säästab trükkplaadi pindala. Võttes arvesse eelnevat ning arvestades ka AP8801 andmelehes esitatud graafikut (Joonis 3.4), otsustati valida induktori väärtuseks 100µH, mis vastavalt eelnevale graafikule tähendab 150kHz lülitussagedus 12V toitepingel. See tagab stabiilse toitevoolu LED-idele, mis omakorda tähendab häiringutevaba akvaariumivalgustust [24], [25].

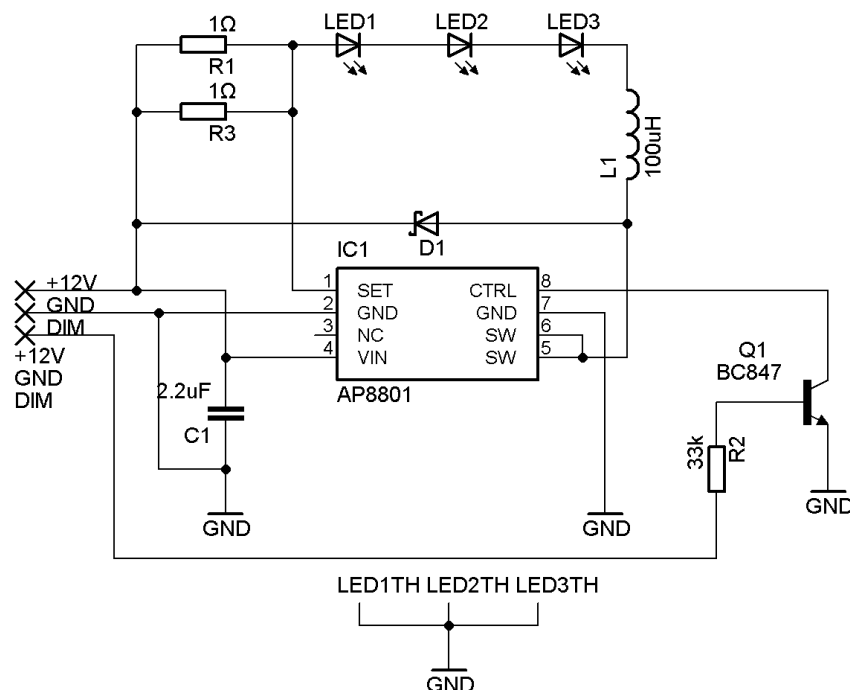
Kuna akvaariumivalgustuse intensiivsust on vaja reguleerida vastavalt keskkonna valgustusele, saab kasutada ka AP8801 omadust LED-ide voolu reguleerida väljaviigu CTRL abil. Selleks on kolm võimalust: lineaarne reguleerimine alalispingega, kasutada avatud kollektoriga transistori ja PWM signaali või otsene sidestus mikrokontrolleriga, kasutades PWM-i [24].

Lineaarse reguleerimise puhul peab olema väljaviik CTRL suurema potentsiaaliga kui 0,2V, muidu on AP8801 ooterežiimil ning voolugenerereerimist ei toimu. Potentsiaali korral 0,3V ... 2,5V reguleerib väljundvoolu vahemikus 25% - 200% [24].

Kuna antud projekti sisaldab mikrokontrollerit, siis on iseenesest mõistetav kasutada PWM-i valguse reguleerimiseks, kuna signaali täiteteguri muutmine on väga lihtne. PWM-i sidestamiseks AP8801 kiviga tuleb lisada NPN transistor, mis juhib seesmist madala potentsiaaliga takistit. Transistori kasutamine võimaldab ka PWM-i amplituudi juhtimist.

Viimasteks mittekriitilisteks komponentideks on sidestuskondensaator ja schottky diod. Schottky diodi eeliseks on väike päripingelang (0,3V) ning kiire taastumisvõime, mistõttu on antud juhul selle kasutamine õigustatud. Filterkondensaator on vajalik sisendpinge silumiseks ning selle parameetrid sõltuvad sisendpingest. Reeglina piisab 2,2 μ F keraamilisest kondensaatorist, mida ka antud juhul kasutatakse. Kui aga on tegemist suuremate pingetega kui 40V, tuleb kasutada 4,7 μ F kondensaatorit [24].

Akvaariumivalgustuse elektriskeem ja põhiskeem ühendatakse omavahel pistikuga. Valgustuse skeemi vajalikud sisend-väljund viigud on 12V toide, maajuhe (GND) ning PWM signaal (DIM), millega juhitakse LED-ide valgusintensiivsust. Akvaariumivalgustuse elektriskeemi tehti tarkvaraga Eagle ning see on näidatud joonisel 3.5.



Joonis 3.5 Akvaariumivalgustuse elektriskeem

3.2 Akvaariumi juhtmooduli elektriskeem

Akvaariumi juhtmoodul on kogu süsteemi juhtiv osa koos mikrokontrolleri, sensori liidestega, toiteploki ja kasutajaliidesega. Selle ülesanne on koguda sensoritelt andmeid, neid töödelda ning anda kasutajale teavet akvaariumi seisundi kohta kas ekraanil või indikaator LED-ide abil ning reguleerida ka valgustust vastavalt ajale ja keskkonnavalgustusele. Kuna akvaariumimooduli elektriskeem on suhteliselt mahukas, on see jaotatud kolmeks alamskeemiks: toiteploki elektriskeem, pH-sensori juhtskeemi ja mikrokontrolleri elektriskeem koos sisend-väljund seadmetega. Terviklik juhtmooduli elektriskeem on lisas 2.

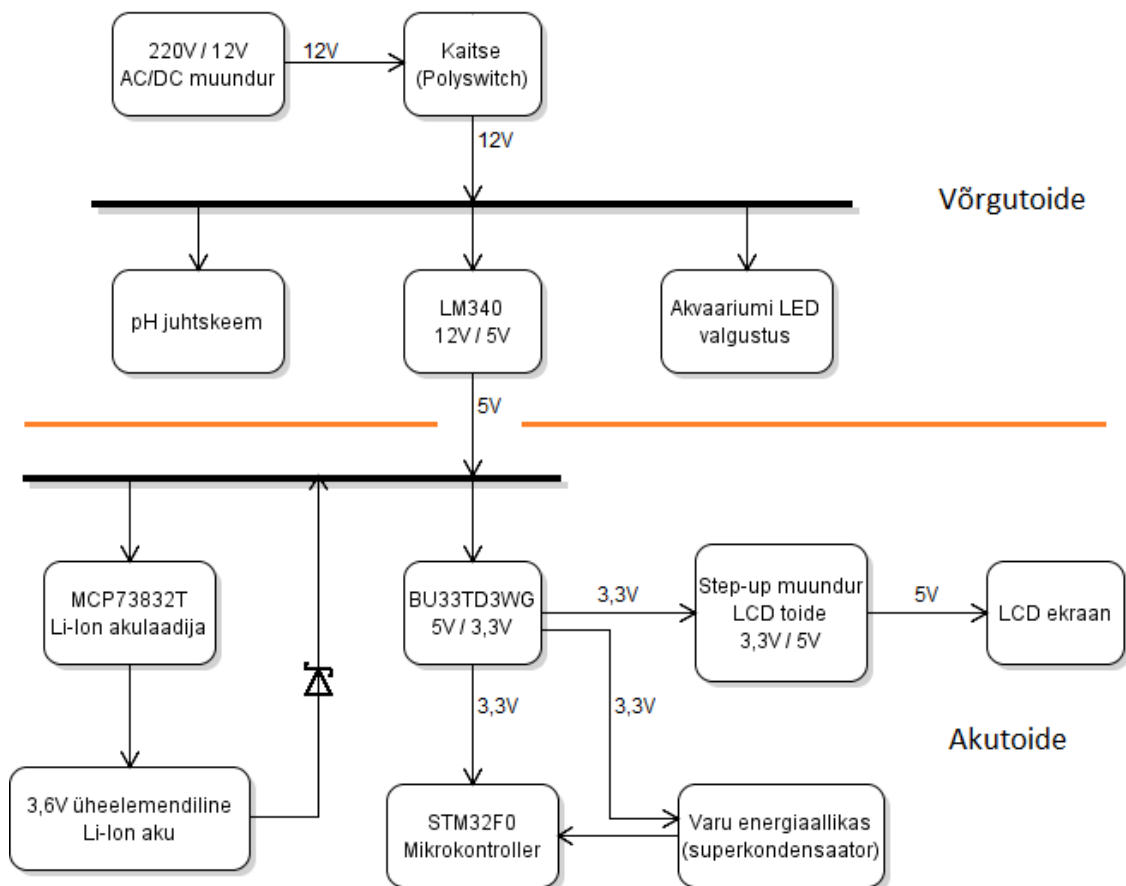
3.2.1 Toiteploki elektriskeem

Korralik toide on iga süsteemi jaoks väga tähtis. Sellest sõltub kogu süsteemi stabiilsus. Kuna tegemist on akvaariumiga, siis peab arvestama asjaoluga, et õhuniiskus mängib suurt rolli ning peab kindlasti arvestama kaitsemehhanismi lisamisega. Toiteploki disainimisel lähtuti probleemist, et erinevad seadmed vajavad erinevaid toitepingeid. Näiteks LED valgustus ja pH-sensori juhtskeem töötavad 12V pingega, samas kui ARM mikrokontroller vajab ainult 3,3V suurust toitepinget. Seega tuleb arvestada pingemuundamisastmete lisamisega.

Esiteks tuli lahendada toiteallika probleem. Alguses sooviti teha kogu süsteem akutoitel. S.t et kodust eemal olles ei peaks muretsema võrgupingel töötava seadme pärast. Kiire arvutus näitas siiski, et see ei ole kõige praktilisem antud olukorras. Kõige enam tarbivad voolu LED-id, milleks on 400mA. Lisaks võib veel arvestada 100mA pH-sensori, mikrokontrolleri ja teiste seadmete peale, ehk seega on kogu voolutarve ca 500mA, mis tähendab, et ühe ööpäeva jaoks oleks vaja $500mA \cdot 24h = 12Ah$ mahtuvusega akut. See pole aga antud projekti suhtes mõistlik lahendus.

Kuna ainult akutoide ei ole antud juhul otstarbekas, otsustati disainida süsteem, mis suudaks töötada nii võrgutoitega kui ka akutoitega. Akutoite eesmärk võimaldada toidet süsteemile ka siis, kui võrgutoide puudub mingil põhjusel. Samas kaitseb see ka ootamatute elektrikatkestuse eest, mis võiksid segada süsteemi tööd. Alloleval joonisel 3.6 on toodud kahetoitelise toiteploki lihtsustatud plokkskeem. Järgmistes lõikudes on täpsemalt kirjeldatud iga ploki disainiga seotud probleeme ja lahendusi.

Kogu süsteemi toiteallikaks on 220V / 12V adapter, millele järgneb taastuva iseloomuga kaitse koos suppressor (TVS¹⁰) diodiga. Suppressor diodi ülesandeks on kaitsta skeemi ootamatute kõrgepingeliste elektriimpulsside eest. TVS diod piirab ära voolu, kui sellel olev potentsiaal ületab läbilöögi piiri. SMAJ15A TVS-il on rakendumispinge vahemikus 16,7V ... 18,5V, taludes lühiajaliselt seejuures kuni 16A voolu [26]. Järgmiseks jaguneb 12V toitepinge kolme tarbija vahel: pH-sensori juhtskeem, 5V pingemuundur LM340 ning LED valgustus. Kahetoitelise süsteemi miinuseks on aga see, et võrgutoite puudumisel ei tööta pH-sensor ja LED valgustus.



Joonis 3.6 Akvaariumi kahetoitelise toiteploki plokkskeem

Esimeses pingemuundusastmes otsustati kasutada klassikalist 5V lineaarset pingeregulaatorit LM340. LM340 kasutamise lihtsus ja vähete lisakomponentide vajadus on selle valimise peamiseks põhjusteks. Vastavalt andmelehele on selle maksimaalne väljundvool kuni 1A, mis antud rakenduseks on piisav. Skeemi lisati sisend ja väljund sidestuskondenssaatorid väärtustega vastavalt 0,47 μ F ja 0,1 μ F. Kuna tegemist on lineaarse

¹⁰ TVS – Transient Voltage Suppressor

pingeregulaatoriga, siis tuleb arvestada ka kiibis eralduva võimsusega, mis läheb soojuseks. Arvutatakse eralduv võimsus, kui 12V adapteri reguleerimata pinge on halvimal juhul (U_{in}) on 14V, väljundpinge (U_{out}) 5V ja hinnanguliseks tarbitavaks vooluks 0,3A.

$$P_D = (U_{in} - U_{out}) \cdot I = (14V - 5V) \cdot 0,3A = 2,7W$$

Seega tuleb regulaatoril hajutada halvimal juhul 2,7W soojust. Kui aga arvestada, et sisendpinge langeb koormuse olemasolul ning tarbitav vool on ka väiksem, siis:

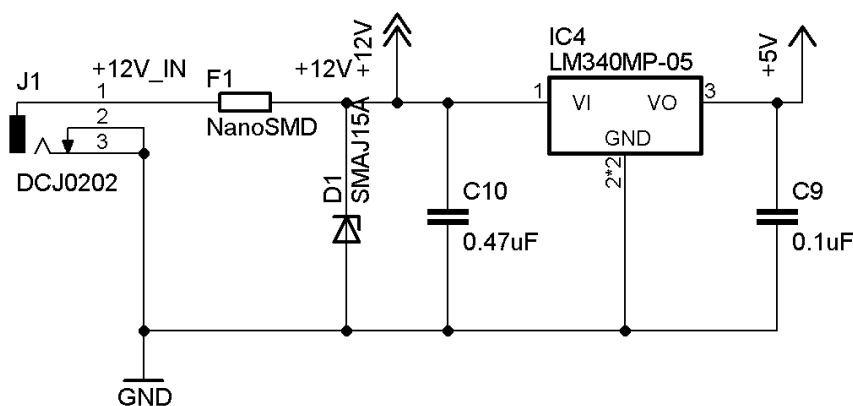
$$P_D = (12V - 5V) \cdot 0,1A = 0,7W.$$

Seega tuleb arvestada, et regulaatoril eralduv võimsus on 1W – 2,7W. Kuna aga trükkplaadi disainimisel soovitakse kasutada võimalikult palju pindmontaažkomponente, siis vastavalt andmelehele selgub, et SOT-223 korpus suudab hajutada toatemperatuuril kuni 1,5W [27].

Maksimaalse võimsuse hajuvuse uurimiseks võib uurida ka soojusjuhtivust. Soojusjuhtivuse arvutamiseks tuleb arvestada maksimaalse LM340 maksimaalse kontakttemperatuuriga ($T_{JMAX} = 150^\circ\text{C}$), keskkonna temperatuuriga ($T_A = 25^\circ\text{C}$) ning SOT-223 korpuse jahutusvõimsusega ($\theta_{JA} = 174^\circ\text{C/W}$) [27]. Seega hinnanguline maksimaalne eralduv võimsus on:

$$P_{DMAX} = \frac{T_{JMAX} - T_A}{\theta_{JA}} = \frac{150^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{174^\circ\text{C/W}} \approx 0,72W.$$

Kuna tegemist on piiripealse juhtumiga ja teoreetiliselt poleks jahutuse lisamine vajalik, siis reaalsuses tuleb arvestada, et hiljem tuleb lisada väike radiaator. Joonisel 3.7 on koostatud kaitselülituse ja pingeregulaatori LM340 elektriskeem.



Joonis 3.7 Pingeregulaatori LM340 ja kaitselülituse elektriskeem

Järgmiseks jaguneb pingemuunduri LM340 5V väljundpinge kahe tarbija vahel: akulaadija ja 3,3V pingemuundur. Võrgupinge olemasolul toimub vajadusel Li-Ion aku laadimine. Samal hetkel on aku isoleeritud võrgupingest schottky dioodi abil. Võrgupinge puudumisel peatub aku laadimine ning süsteem lülitub ümber akutoitele.

Siinkohal tuleb disainida akulaadija skeem. Lähtepunktiks on üheelemendiline 2200mAh mahtuvusega liitium ioon (Li-Ion) aku, mille nominaalpinge on 3,6V, kusjuures kui aku on täis, siis võib see pinge küündida kuni 4,2V-ni. Akulaadija integraalskeemi põhiliseks kriteeriumiks oli, et laadimine toimuks 5V pingega ning et skeem ise oleks lihtne ja energiasäästlik, s.t tarbiks võimalikult vähe voolu, kui aku ei vaja laadimist. Selleks valiti Microchip-i integraalskeem MCP73832T. Antud kiibi peamised parameetrid sobivad antud rakenduse jaoks väga hästi: toitepinge vahemik on 3,75V ... 6V ja voolutarve tühijooksul ainult 5µA (laadimise ajal 510µA - 1500µA). Elektriskeemi disaini aluseks võeti andmelehes [28] olev tüüpikrakenduskeem ning kohandati seda antud rakenduste vajadustele vastavalt. Aku laadimisvool määratakse eelnevalt takisti R_{prog} abil. Maksimaalne laadimisvool võib olla kuni 500mA, millele vastab $R_{prog} = 2k\Omega$. Takisti suurendamisel on võimalik laadimisvoolu I_{reg} piirata järgneva seose abil:

$$I_{reg} = \frac{1V}{R_{prog}}$$

Suurema laadimisvoolu korral toimub laadimine kiiremini, aga võib väheneda aku eluiga. Samas liiga väikese voolu korral võib laadimine võtta liiga palju aega. Arvestada tuleb ka sellega, et aku mahtuvus on 2200mAh. Kuna antud rakenduses on akutoide pigem tagavara energiaallikas, siis pole aku kiir-laadimine prioriteetne. Kui võtta R_{prog} suuruseks 22kΩ, siis laadimisvooluks kujuneb:

$$I_{reg} = \frac{1V}{22k\Omega} \approx 45mA.$$

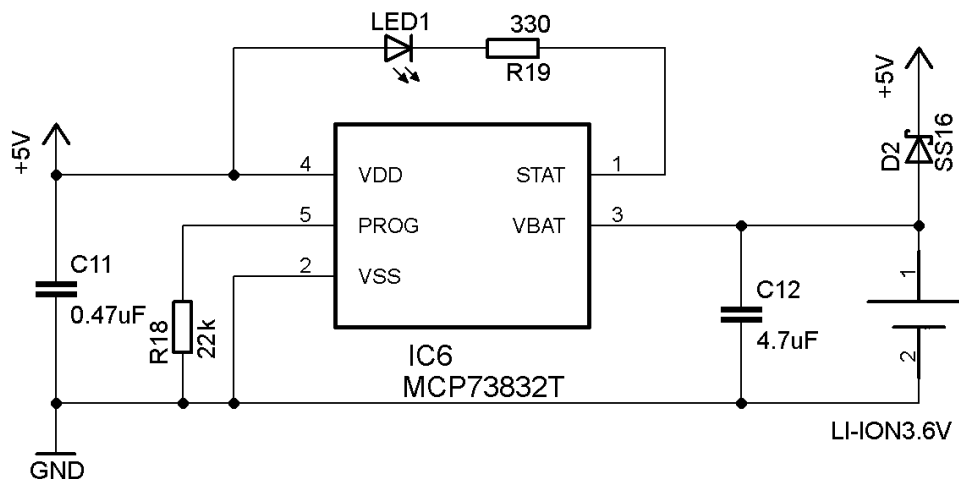
See tähendab, et 2200mAh aku täislaadimiseks kuluks $2200mAh : 45mA \approx 49h$. Reaalsuses aga kulub selleks kindlasti vähem aega, kuna Li-Ion akut ei tohi täiesti tühjaks laadida. Seega kui oletada, et aku on 50% tühi, laetakse see täis ligikaudu 24h. Kui aku saab täis, lülitub laadija automaatselt suikeolekusse ja voolutarve väheneb kuni 5µA-ni [28].

MCP73832T-le on võimalik lisada ka indikaator LED, mis näitab kui toimub aku laadimine. Kui aku on täis ja laadimist ei toimu või kui aku on puudu, siis on STAT väljaviik

kõrge impedantsiga (HI-Z) olekus, mis tähendab, et kui ühendada LED toitepinge ja STAT vahele, siis LED ei tarbi voolu ja on kustu. Laadimise ajal on aga STAT madala potentsiaaliga ja indikaator LED annab märku laadimisest [28].

Kuna laadija on nii sisendi kui ka väljundi poolt sama potentsiaali all, siis on vajalik lisada veel pinge suuna määramiseks peale akut schottky diood, mis tagab, et ei teki olukord kus aku pingestatakse toitepingega.

Viimaseks tasub uurida ka laadija tarvitavat võimsust ja vajaliku jahutuse organiseerimist. Eraldub soojus sõltub toitepingest (V_{dd}), miinimum laadimispinge lävest (U_{min}) ning laadimisvoolust (I_{reg}). Energiahajuvus (P_D) on määratud järgmiselt: $P_D = (V_{dd} - U_{min}) \cdot I_{REG}$. Arvestades eelnevalt valitud komponente, siis halvimal juhul on energiahajuvus võrdne $P_D = (5V - 2,7V) \cdot 45mA \approx 0,10W$, seega piisab jahutuseks trükkplaadi pinnast, kui on tegemist SOT23-5 korpusega [28]. Antud akulaadija täielik elektriskeem on joonisel 3.8.



Joonis 3.8 Akulaadija MCP73832T elektriskeem

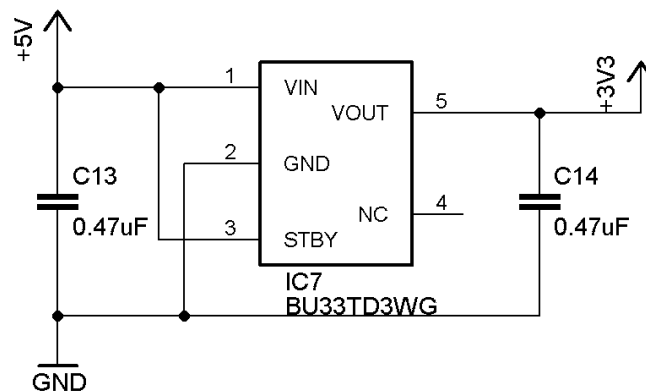
Toiteploki disainimise järgmiseks sammuks oli organiseerida mikrokontrollerile vajalik 3,3V toitepinge. Selleks valiti CMOS LDO pingeregulaator BU33TD3WG, mis on oma olemuselt fikseeritud väljundpingega lineaarne madala lävipingega (LDO¹¹) regulaator ning ei vaja peale sidestuskondensaatorite teisi lisakomponente. Antud juhul on vajalik just LDO regulaator, kuna on vaja stabiliseerida aku pinget. See tagab, et mikrokontrolleri toitepinge ei langeks alla miinimumi, isegi kui aku pinge on väiksem kui 3,3V. BU33TD3WG lävipinge on 220mV, kusjuures maksimaalne väljundvool on 200mA, mis on küllaga rohkem kui ARM mikrokontroller tarbib. Lihtne on leida ka BU33TD3WG maksimaalne energiahajuvus, et

¹¹ LDO – ingl k *Low Dropout*.

veenduda, et kiip ei kuumeneks üle. Arvutus toimub sama valemi abil nagu leiti LM340-ne energiahajuvus:

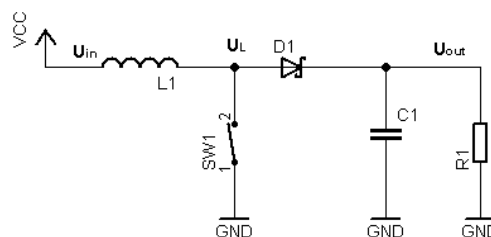
$$P_D = (V_{dd} - U_{out}) \cdot I_{max} = (5V - 3,3V) \cdot 200mA = 340mW.$$

Kuna 340mW on väiksem kui BU33TD3WG andmelehes esitatud maksimaalne energiahajuvus 540mW, siis lisajahutuse disainimine pole vajalik [29]. Allpool on lihtne 3,3V pingeregulaatori elektriskeem.



Joonis 3.9 Pingeregulaatori BU33TD3WG elektriskeem

Järgmiseks tuleb aga saada LCD jaoks 5V toitepinge. Selleks on vaja muundada 3,3V tagasi 5V, mis reeglina ei ole eelistatav süsteemi disainis, kuna ülesmuundamisega esinevad energiakaod. Antud lisamuundamise aste on põhjendatav sellega, et ekraan peab funktsioneerima ka akutoitel, kuna kuvab teavet akvaariumi seisundi kohta. Kasutajaliidese säilitamise eesmärgil on antud LCD toiteühendus hädavajalik.



Joonis 3.10 Pinget tõstva (Boost) pingemuunduri põhimõtte skeem

Et lihtsustada kogu seadet ja vähendada kulusid ning integraalskeemi kasutamist, oleks mõistlik ise disainida pinget tõstev pingemuundur. Lihtsaim pingemuundur on joonisel 3.10. Väljundpinge U_{out} tõstmiseks on vaja induktorit L1, kus toimub elektrienergia salvestamine magnetväljana, kui lüliti SW1 on suletud. Diod D1 takistab kondensaatori C1 tühjakslaadimist läbi SW1. Kuna tegemist on alalispingega, suureneb induktori vool lineaarselt. Kui aga lüliti

avada, toimub induktoris salvestunud energia ülekandumine väljundisse, kuna induktoris voolab endiselt vool (magnetvälja kokkukukkumise tõttu) läbi D1 väljundkondensaatorisse C1. Kui lüliti SW1 jälle sulgeda, kordub kõik uuesti ning sedasi näeb tarbija R1 kõrgemat väljundpinget. Tasub mainida ka, et voolu voolamiseks läbi diodi D1, peab olema pinge U_L suurema potentsiaaliga kui U_{out} [30], [31], [32].

Antud juhul saab kasutada impulsssignaali genereerimiseks mikrokontrolleri PWM väljundit. Induktori suurus sõltub genereeritava signaali sagedusest ning täitetegurist, mis omakorda mõjutab pulsatsiooni. Pulsatsiooni arvutamiseks on vaja leida signaali vahelduva komponendi (A_1) ja alaliskomponendi (A_0) jagatis. Kuna PWM signaal koosneb impulsside jadast, siis on võimalik leida antud signaali komponendid allolevate valemite järgi [33]:

$$A_0 = A \cdot D,$$

$$A_n = \frac{2A}{n\pi} \sin(n\pi D).$$

Valemistes tähistatud: A – signaali amplituud, D – täitetegur. Seega pulsatsiooni on võimalik leida järgmiselt:

$$\frac{A_1}{A_0} = \frac{\frac{2A}{\pi} \sin(\pi D)}{A \cdot D} = \frac{2A \cdot \sin(\pi D)}{\pi D}.$$

Seega sõltub pulsatsioon ainult signaali täitetegurist D . Mida suurem on täitetegur, seda väiksem on pulsatsiooni suurus. Kui aga täitetegur on 1, siis on pulsatsioon minimaalne (puudub) ning signaalis on ülekaalus ainult alaliskomponent.

Pingemuunduri efektiivsus sõltub väga palju induktori ja täiteteguri valikust. Induktori väärtuse leidmiseks tuleb uurida transistori läbivat voolu. Kui toimub transistori sisse lülitamine, siis seda läbiv maksimaalne vool on $i_{pk} = \frac{(U_{in} - U_T) \cdot T_{on}}{L} + i_p$, kus U_{in} on sisendpinge, U_T on transistoril tekkiv pingelang, T_{on} on aeg, mil transistori on avatud ning L on induktori väärtus. Transistori väljalülitamisel aga on minimaalne vool võrdne $i_0 = i_{pk} - \frac{(U_{out} - U_{in} + U_D) \cdot T_{off}}{L}$, kus U_D on diodil tekkiv pingelang ja T_{off} ajavahemik, mil transistori on väljalülitatud. Võrdsustades eelnevad võrrandid ja avaldades väljundpinge U_{out} , tuleb välja, et väljundpinge sõltub ainult täitetegurist D : $U_{out} = \frac{U_{in}}{1-D}$. Antud valemis $1 - D \equiv \frac{T_{off}}{T}$, mis on

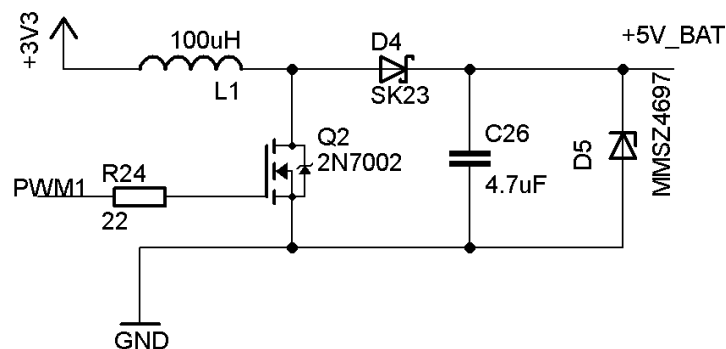
impulsi mitteaktiivne osa. Eelnevate valemite abil on võimalik arvutada ligikaudne induktori väärtus järgmiselt [32]:

$$L = \frac{(U_{out} - U_{in} + U_D)(1 - D)}{i_{min} \cdot f}$$

Kus i_{min} on minimaalne koormusvool ja f lülitussagedus. Induktori valimisel on oluline ka jälgida, et pingemuundur töötaks pidevas režiimis, mis tähendab, et induktor ei tohi tsükli ajal täiesti tühjaks laaduda, kuna induktori laadimine võtab aega ja transistori täitegur suureneb, mis omakorda vähendab väljundpinget U_{out} . See põhjustab väljundpinge ebastabiilsust, mis on tuntud nähtus pinget suurendavatele muunduritele. Teades, et $U_{in} = 3,3V$, $U_{out} = 5V$, $U_D = 0,3V$, kuna kadude minimeerimiseks tuleks valida kiire taastumisega Schottky diod, eeldatav täitegur $D = 30\%$, lülitussagedus $500kHz$ ja LCD tarbib keskmiselt voolu $10mA$ ¹² siis induktori väärtuseks kujuneb:

$$L = \frac{(U_{out} - U_{in} + U_D)(1 - D)}{i_{min} \cdot f} = \frac{(5V - 3,3V + 0,3V)(1 - 0,3)}{0,02mA \cdot 500kHz} \approx 140\mu H.$$

Seega induktori suuruseks kujunes $100\mu H$ ja lülitiks valiti n-mosfet transistor, mille juhtimiseks kasutatakse mikrokontrolleri PWM signaali. Transistori paisuvoolu piiramiseks lisati ka 22Ω takisti. Pinge stabiliseerimiseks lisati ka zener diod, mis töötab pingeregulaatori režiimis. Täielik $5V$ pingemuunduri elektriskeem on joonisel 3.11.



Joonis 3.11 5V pingemuunduri elektriskeem

Lisaks akutoitele lisati mikrokontrolleerile veel eraldi tagavara toiteallikas superkondensaatori kujul, mille eesmärk on hoida kella-aeg õige ning säilitada mikrokontrolleeri

¹² Antud voolu väärtus on saadud LCD koormusvoolu mõõtmise kaudu. Arvutuskäigus arvestati siiski kahekordse minimaalse koormusvooluga, et anda süsteemi tööpiirkonnale kindlusruumi.

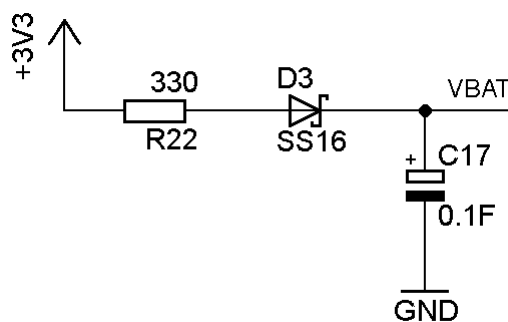
mälu sisu, kui akupinge on liiga madal või kui aku eemaldatakse üldse mingiks ajaks. Superkondensaator võib olla väga suure mahtuvusega (kuni mitu faradit) ning on võimeline energiat talletama väga pikka aega. Teades kondensaatori maksimaalset laadimispinget U_{Cmax} , mikrokontrolleri (STM32F0) minimaalset tööpinget U_{min} , mikrokontrolleri koormusvoolu I_B ooterežiimil ja kondensaatori mahtuvust C , on võimalik arvutada hinnanguline ajavahemik, kui kaua on võimeline mikrokontroller säästurežiimil kriitilisi andmeid säilitama [34], [35].

$$t[h] = \frac{C \cdot (U_{Cmax} - U_{min})}{I_B} : 3600$$

Vastavalt superkondensaatori ja mikrokontrolleri andmelehtedele on antud juhul $U_{Cmax} = 3,3V$, $U_{min} = 1,8V$, $I_B = 400nA$, ning kondensaatori suuruseks võib võtta minimaalse $0,1F$.

$$t = \frac{0,1F(3,3V - 1,8V)}{400nA} : 3600 \approx 104,1h \approx 4p\ 8h$$

Kuna üle nelja ööpäeva on piisav aeg, et vahetada näiteks akut, valiti antud rakendusest lähtudes superkondensaatori suuruseks $0,1F$. Kondensaatori laadimisvoolu piiramiseks lisati veel 330Ω takisti ja schottky diood, mis tagab, et kondensaator oleks isoleeritud toitepinge ahelast ning selle puudumisel ei kanduks kondensaatori laeng toiteahelasse. Mikrokontrolleri tagavara energiaallika elektriskeem on esitatud joonisel 3.12.



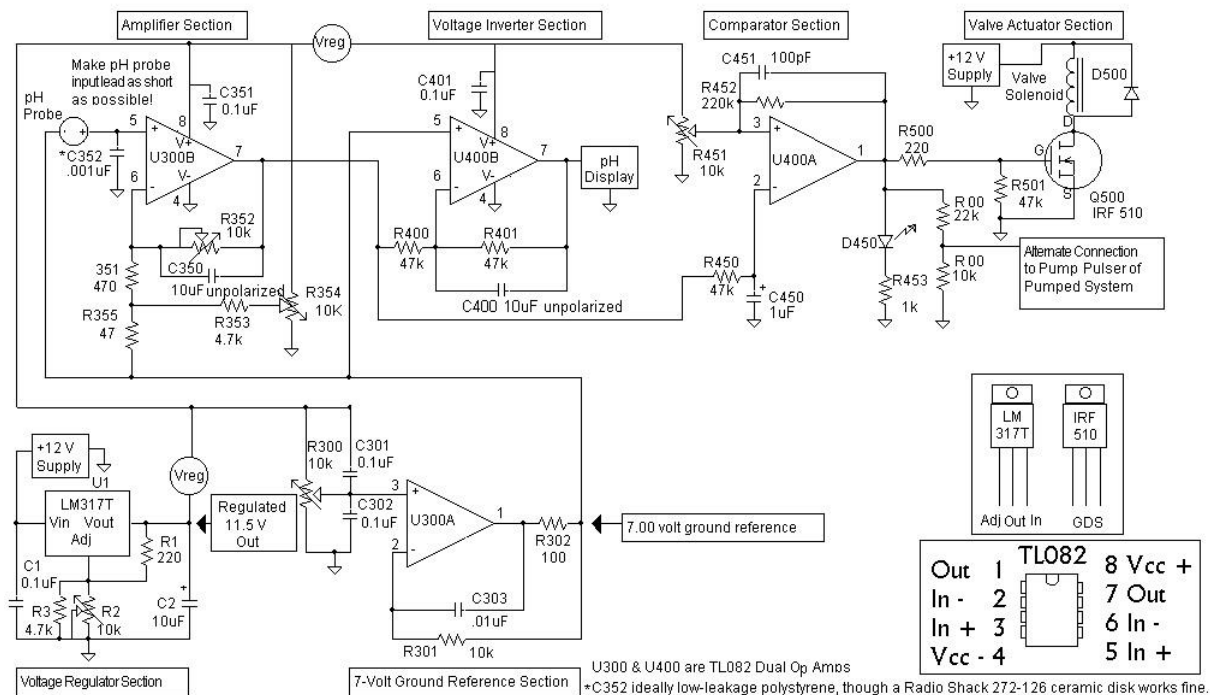
Joonis 3.12 Superkondensaator kui mikrokontrolleri tagavara energiaallikas

3.2.2 pH-sensori juhtskeem

Vee happelisuse ehk pH mõõtmiseks kasutatakse pH elektroodi, aga kahjuks on sensori väljundiks kõrge impendantsiga nõrk alalispinge. pH-sensor käitub kui pingeallikas, mille väljundpinge sõltub lahuse pH-st, muutudes $60mV$ iga pH ühiku kohta vastavalt Nernsti

võrrandile. Kuna aga signaal on nõrk ja suure impedantsiga, ei saa seda otseselt mõõta. Selleks tuleb signaali eelnevalt võimendada. Saadaval on ka valmis pH-mõõtjad, kuid need on väga kallid ning antud juhul tuleb disainida spetsiifilisem skeem, mille väljund oleks loetav mikrokontrolleri analoog-digitaalmuunduriga.

pH-sensori juhtskeemi põhineb mitmeastmelisel signaali võimendamisel ning dimensioneerimisel lihtsalt arusaadavase skaalasse, kus lõppastme väljundis muutub pinge iga pH astme kohta 1V. Juhtskeemi disaini aluseks on võetud pH-mõõte ja süsihappegaasi juhtskeem [36], allikast [37], mida kasutatakse CO₂ reguleerimiseks akvaariumis. Antud skeemi kohandati ja muudeti vastavalt antud projekti eesmärkidele. Kuna tegemist on lihtsa ja väikese koduakvaariumiga, siis autor ei pidanud vajalikuks disainida CO₂ reguleerimissüsteemi ning see jäeti skeemist välja.

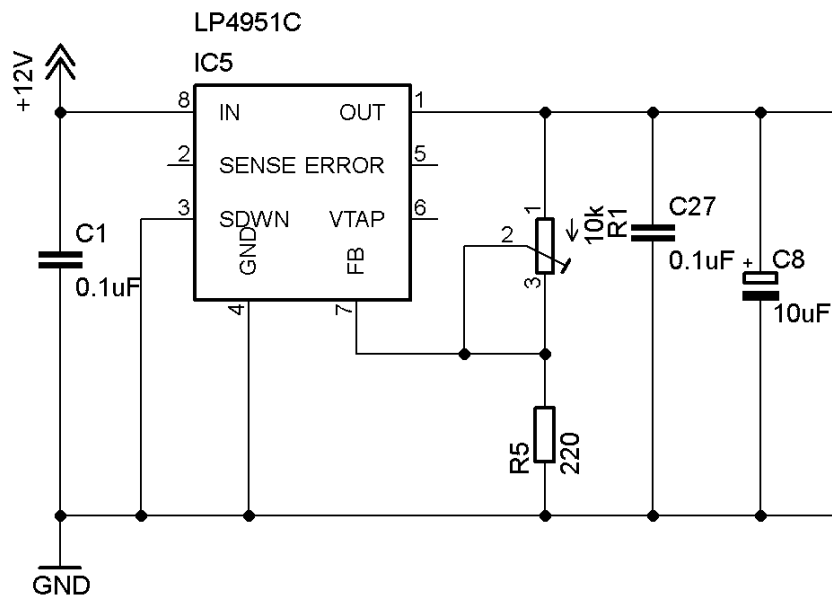


Joonis 3.13 Originaal pH-mõõteskeem koos CO₂ tüürskeemiga [36]

Antud skeemi südameks on JFET operatsioonivõimendid TL082. Skeemi tööpõhimõtte selgitamiseks võib jagada selle neljaks: pingeregulaatori osa, 7V maapotentiaal pH-elektroodi jaoks, põhivõimendi, mis muudab kõrge impedantsiga signaali mõõdetavaks signaaliks 1V pH astme kohta ning viimaks inverteeritakse väljundpinge, et tulemuseks oleks väljundpinge suurenemine pH suurenemisega. Antud skeemi kohandamiseks koduakvaariumi süsteemi jaoks tehakse mõned muudatused. Esiteks eemaldati osa, millega toimub CO₂ reguleerimine ja komparaatori osa ning viimaks leitakse ka, et LM317 pingeregulaatori reguleerimisvahemik

jääb väheseks kui sisendiks on 12V toitepinge. Järgnevalt selgitatakse skeemi tööpõhimõtet täpsemalt ning disainitakse selle alusel sobiv pH-juhtskeem.

Operatsioonivõimendite toiteks on vaja stabiilset toitepinget. Kuigi antud skeemis [36] on kasutatud LM317 regulaatorit täpse 11,5V toitepinge saamiseks potentsiomeetri R2 abil, siis see ei pruugi sobida, kui on suurem koormus 12V adapteri taga, mis tekitab pingelangu. Vastavalt LM317 andmelehele on miinimum regulatsioonipinge $(V_{out}-V_{in})$ 3V [38]. Reeglina on reguleerimata 12V seinadapteri väljundpinge koormuseta olekus kuni 14V, mis tähendab, et $V_{out} - V_{in} = 14V - 11,5V = 2,5V$ ning pingeregulatsioon toimib. Kuna antud projektis pole ainukeseks tarbijaks pH-juhtskeem ning tuleb arvestada ka lisakoormustega (LED valgustus, akulaadimine jt), siis suhteliselt suure tõenäosusega langeb pinge veelgi ning regulatsioon peatub. Selle vältimiseks tuleb LM317 asendada LDO regulaatoriga, mis suudab veel väikesegi sisend-väljundpinge diferentsiaali korral tagada stabiilse väljundpinge. Selleks otsustatakse kasutada LP4951C integraalskeemi, mille minimaalne reguleerimispinge 100mA koormusvoolu puhul on 380mV [39]. Joonisel 3.14 on pH-anduri pingeregulaatori elektriskeem.



Joonis 3.14 Pingeregulaatori LP4951C elektriskeem

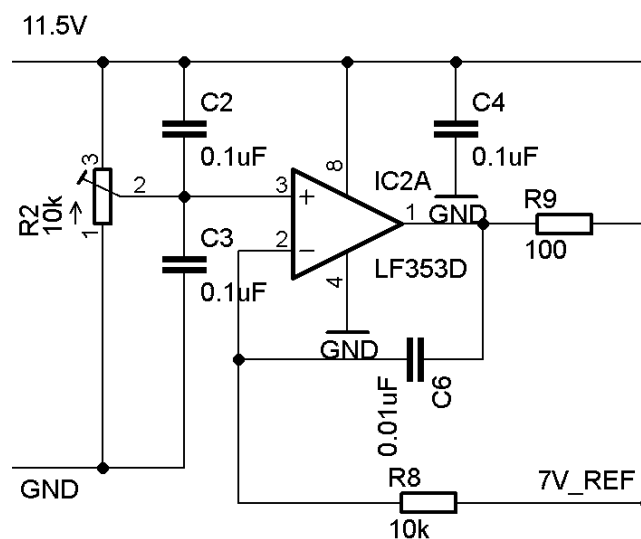
LP4951C väljundpinge on määratud tagasiside ahela abil, täpsemalt takistite R1 ja R5 abil järgmiselt:

$$U_{out} = U_{ref} \cdot \left(\frac{R1}{R5} + 1 \right),$$

kus V_{ref} on stabiilne tugipinge 1,235V ning R1 ja R5 moodustavad pingejaguri. Võttes potentsiomeetri R1 väärtuseks 10k Ω ja R5 väärtuseks 220 Ω , on võimalik seadistada potentsiomeetri abil LP4951C väljundpingeks (V_{out}) täpselt 11,5V. Ligikaudne R1 väärtus on võimalik välja arvutada järgmiselt:

$$R1 = R5 \cdot \left(\frac{U_{out}}{U_{ref}} - 1 \right) = 220\Omega \cdot \left(\frac{11,5V}{1,235V} - 1 \right) \approx 1,8k\Omega.$$

Järgmise sammuna on vaja tekitada virtuaalne maa potentsiaaliga 7V, mis käitub kui pH-anduri nullpunktina. S.t kui pH-andur on neutraalse pH-ga lahuses, on anduri väljundpotentsiaal null, ning skeemi väljundsignaali potentsiaal on võrdne pH väärtusega. 7V tugipinge tekitamiseks kasutatakse pingejagurit potentsiomeetri R2 näol ning operatsioonivõimendi käitub kui puhver pingejärguri lülituses. Operatsioonivõimendi väljund on isoleeritud mahtuvuslikust koormusest 100 Ω takisti R9 abil. Operatsioonivõimendi ümbrusesse on lisatud kondensatorid, et vähendada võimendisse sattuvat müra. Virtuaalse maa elektriskeemi lõik on joonisel 3.15.



Joonis 3.15 pH-juhtskeemi 7V virtuaalne maa

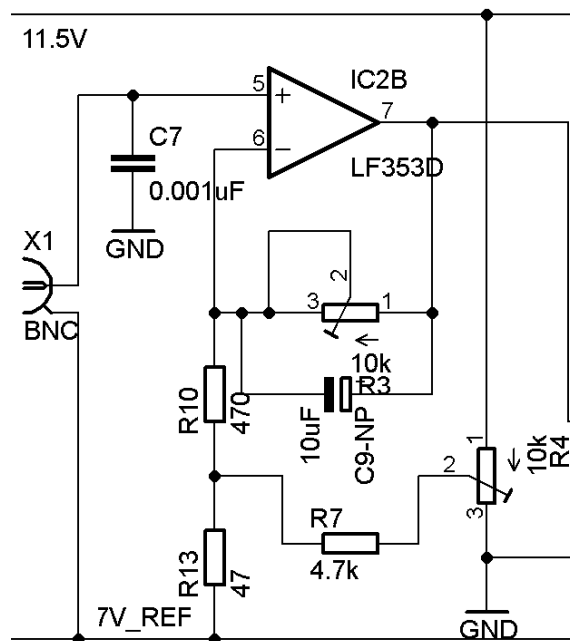
Järgmiseks sammuks on ehitada pH-anduri sisendsignaali võimendamisaste, mis koosneb mitteinverteerivast operatsioonivõimendist. Potentsiomeetri R3 ja takisti R10 abil on võimalik seadistada võimendi ülekandetegur. Ülekandeteguri väärtus tuleneb asjaolust, et soovitakse saada väljundisse pinge, mis on võrdeline pH-ga. Kuna on teada, et pH-anduri potentsiaal muutub iga pH astme kohta 60mV, siis näiteks 1V saamiseks väljundisse tuleb seda

signaali võimendada $A = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1V}{60mV} = 16,67 \approx 17$ korda, mis annabki ülekanaliteguriks 17 [37]. Kuna tegemist on mitteinverteeriva võimendiga, siis on võimalik ülekanalitegurit teades arvutada välja potentsiomeetri R3 ligikaudne väärtus, mis määrab ka pH anduri graafiku tõusu:

$$A = \frac{R3}{R10 + R13} + 1 \Rightarrow R3 = (R10 + R13) \cdot (A - 1) = (470\Omega + 47\Omega) \cdot (17 - 1) \approx 8,2k\Omega.$$

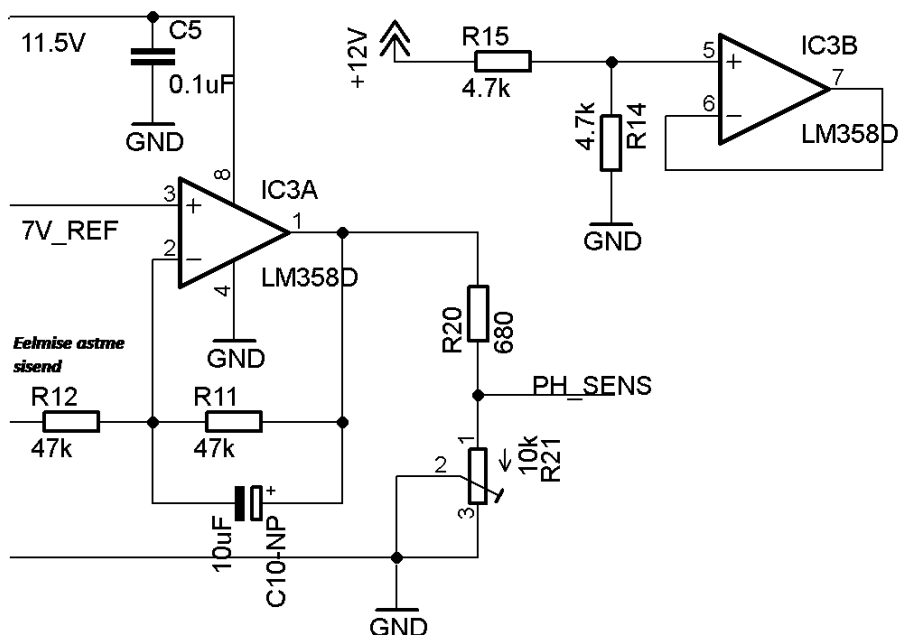
Skeemitehnika vaatepunktist on väga kriitiline ühenduspunkt pH-anduri ja OV sisendi vahel. Kuna pH-andur on kõrge impedantsiga seade, siis tuleks selle sisendkontakt (BNC pesa) paigaldada OV sisendile nii lähedale kui võimalik, vähendamaks elektromagnetühäiringute vastuvõtmist. Lisaks võib lisada veel ühe filterkondensaatori mahtuvusega 1nF, mis moodustab koos pH-anduri väga suure takistusega (ca 1 gigoom) madalpääsfiltri, vähendades veelgi signaali mürataset. Kahjuks aga suurendab see ajakonstanti. Ajakonstant $\tau = RC = 10^9\Omega \cdot 10^{-9}F = 1s$, mis tähendab, et pH muutumisel ühiku võrra kulub ligikaudu 1 sekund, enne kui muutus kajastub väljundis [37].

Potentsiomeeter R4 koos takistitega R10, R13 ja R7 moodustab nullnihkepinge regulaatori, mille abil kompenseeritakse OV nihkevool. Juba 20pA nihkevool võib põhjustada OV väljundis suure pH-anduri sisendtakistuse tõttu märgatava pingelangu $U_{dif} = 20pA \cdot 10G\Omega = 20 \cdot 10^{-12} \cdot 10 \cdot 10^9 = 20mV$, mida omakorda võimendatakse 17 korda, mis tähendab aga pH lugemi 0,34 ühiku suurust viga, kuna 1V väljundis on võrdne 1 pH ühikuga. Eelnevalt kirjeldatud alamskeem on allpool joonisel 3.16.



Joonis 3.16 pH-anduri 17kordne võimendusaste

Korrektse pH lugemi saamiseks tuleb signaali inverteerida, ehk skaala ümber pöörata. Kui enne antud astet suurenes pH lugem pH vähenemisega, siis peale inverteerimist on pH-lugem võrdeline väljundpinge suurusega. Selleks kasutatakse operatsioonivõimendit inverteerivas lülituses ühikulise võimendusteguriga, mis on seadistatud kahe 47kΩ takistiga R12 ja R11. Viimane samm on joonisel 3.17.



Joonis 3.17 pH-juhtskeemi inverteeriv lõpplülitus

Arvestades, et STM32F0 mikrokontrolleri ADC sisendid on 5V tolerantsed, siis oli vajalik lisada veel pingejagur R20 ja R21 näol, mis vähendab signaali 10kordselt. Seega näeb mikrokontrolleri sisend 3 ... 10V signaali asemel 0,3 ... 1V signaali, millele vastab pH 3 ... 10.

Antud skeem suudab mõõta pH-suurusi vahemikus 3 – 10 [37], piiranguks on OV toitepinge. Kuna akvaariumis pole vajadust ekstreemseid suurusi mõõta, siis antud lülitus sobib ideaalselt kodutingimustes kasutamiseks. Kuna üks kahest LM358 OV-st jääb kasutamata, siis ei ole soovitatav seda lihtsalt ühendamata jätta, kuna see võib tekitada häireid. Selle vältimiseks võib aga ühendada OV pingejärguri lülitusse ning mitteinverteeriv sisend panna poole toitepinge alla. Antud lahendust on näha ka joonisel 3.17.

Enne skeemi edukat kasutamist tuleb see kalibreerida, mida tehakse just potentsiomeetrite R1, R2, R3 ja R4 abil. R1 abil seatakse operatsioonivõimendite toiteks täpne 11,5V toitepinge. Järgmiseks tuleb R2 abil seadistada 7V virtuaalse maa potentsiaal, mis määrab ka pH-skaala nullpunkti pH väärtuse 7 juures. Nüüd tuleb pH-andur paigutada testvedelikku, mille pH on teada, selleks tuleks valida näiteks testvedelikud pH-ga 7 ja 4. Kasutades testvedelikku pH-ga 7 ja reguleerides potentsiomeetrit R4 tuleb seadistada nullnihkepinge väärtus ning „nullida“ lugemi väärtus täpselt 7,0. Järgmiseks tuleb pH-andur kasta teise pH-ga vedelikku (näiteks pH=4) ning seadistada pH sirge tõus. Lõpptulemusena peab seadistatud lugem olema täpselt sama väärtusega nagu testvedelik [37].

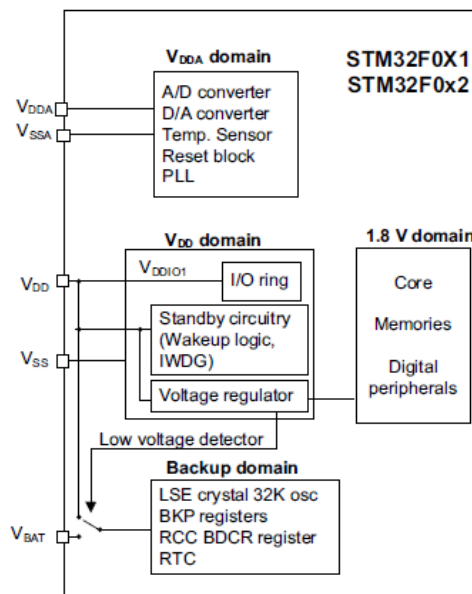
Antud skeem on väga töö- ning häirekindel, mistõttu ei tohiks olla segavaks faktoriks kõrgesageduslikud digitaallülitused või siis välised elektromagnethäired. Skeemi kõige nõrgem punkt on pH-anduri ühenduskontakt OV sisendiga, mistõttu tuleks trükkplaadi disainimisel paigutada need üksteisele võimalikult lähedale. Täielik pH-anduri elektriskeem on lisas 2.

3.2.3 Mikrokontroller STM32F0

Akvaariumisüsteemi kõige tähtsamaks osaks võib pidada kindlasti mikrokontrollet, mille ülesanne on juhtida kogu süsteemi kui tervikut ning koguda, töödelda ning kuvada andmeid kasutajale. STM32F051R8 on 32bitine ARM Cortex-M0 mikrokontrollet, mis põhineb RISC arhitektuuril, mille peamine eelis on väga madal voolutarve, kuid samas võimas arvutusjõudlus. Mõned märkimisväärsed näitajad on selle taktsagedus kuni 48MHz, 64Kb RAM, toitepinge 2,0V – 3,6V, 55 sisend-väljundit, 11 taimerit, DAC, 16 kanaline 12bitiline ADC, reaaliajakell (RTC) ning viimaks mitmed standardsed liidesed nagu I²C, USART ja SPI. ARM

mikrokontrollerid on energiasäästlikumad kui näiteks AVR-i põhised kontrollerid, võimaldades lülitada välja mitte kasutusel olevad liidesed. See aga eeldab, et tuleb läbi mõelda ja konfigureerida vajalikud liidesed tarkvaralahenduses enne põhiprogrammi tööd. Vaatamata sellele, et mikrokontroller on madalapingeline, on 36 sisend-väljundit 5V tolerantset, mis tähendab, et andurite ja teiste seadmete ühendamisel mikrokontrolleri väljaviikudega tuleb veenduda, et pinged ei ületaks lubatud väärtusi [9]. STM32F0 mikrokontrolleri ülevaatlük plokkiagramm on lisan 3.

Selleks, et tagada antud mikrokontrolleri stabiilne funktsioneerimine, on vaja minimaalselt organiseerida korrektsed toite ja maaühendused. STM32F0 mikrokontrolleril on peamiselt kolm paari toiteklemme ning lisaks veel VBAT tagavara toiteallika sisend, mis tagab mikrokontrolleri kriitiliste andmete säilitamise registrites kui eemaldatakse põhitoiteallikas. Mikrokontrolleril on eraldatud analoog (VDDA) ja digitaal (VDD) toiteahelad, mis on vajalik ADC ja DAC muunduri sõltumatu toitepinge saamiseks (Joonis 3.18).



Joonis 3.18 STM32F0 toiteühenduste ülevaade [9]

Kuna digitaalhelates võivad esineda kõrgsageduslikud signaalid, siis analoog ja digitaaltoiteahelate isoleerimine võimaldab vähendada digitaalsignaalidest tulenevaid häireid. Mikrokontrolleri toiteahela disainis on oluline lisada ka sidestuskondensaatorid kõigi toiteklemmide paaridele. Tüüpilised filterkondensaatorid digitaallülituste jaoks on 0,1 μ F. Selleks, et filtreerida erinevatel sagedustel häiringuid on soovitatav lisada erineva mahtuvusega kondensaatorid. Antud juhul on vajalik VDDA toitepaari jaoks 1 μ F ja 0,01 μ F kondensaatorid ning mõlema VDD paari jaoks üks 0,1 μ F kondensaator, millele lisaks veel 4,7 μ F

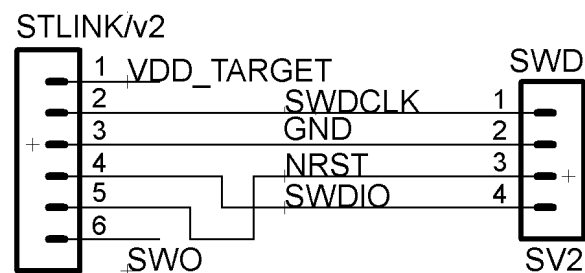
[40]. Tagavara toite VBAT ühendust kirjeldati toiteahela peatükis, kus kasutati tagavara toiteallikaks 0,1F superkondensaatorit.

Valitud mikrokontrolleri teeb paindlikuks ja energiasäästlikuks ka asjaolu, et on võimalik valida kontrolleri töösagedus tarkvarapõhiselt vahemikus 8 ... 48MHz. Taktsignaallikaid on kokku neli: kaks sisemist (HSI ja LSI vastavalt *High-Speed Internal* ja *Low-Speed Internal*) ning kaks välimist allikat (HSE ja LSE), eeldusel, et lisatakse väline kvartsresonaator. Kõiki eelnimetatud taktsignaale on võimalik vastavalt vajadusele aktiveerida. STM32F0 sisseehitatud taktsignaali HSI ja LSI eesmärk on võimaldada piisavalt täpne süsteemitaktsignaali ilma väliste lisakomponentideta. HSI on 8MHz taktsignaali, mis põhineb RC võnkeringil. Koos PLL-iga on võimalik saada kuni 48MHz süsteemi töösagedust, millega juhitakse taimereid, sisendeid-väljundeid jt liideseid. LSI on kuni 40kHz madala energiatarbega signaali, mida on vaja RTC ja Watchdogi jaoks. Kuigi antud taktsignaali generaatorid on sisseehitatud, siis nende puuduseks on ebatäpsus pikas perspektiivis, mis tähendab, et näiteks täpse kellaaja hoidmiseks RTC abil ei saa kasutada LSI-d.

Antud akvaariumisüsteemi loomisel on oluline täpne kellaage, millega juhitakse valgustust, et tekitada kunstlik ööpäeva tsükkel sõltumatult välisest ilmaolust või siis akvaariumipaigutusest toas. Täpse RTC taktsageduse saamiseks tuleb kasutada välist 32,768kHz kvartsresonaatorit, mis annab täpselt 1Hz taktsignaali kellaaja hoidmiseks. LSE kvartsresonaator ühendatakse mikrokontrolleri PC14 ja PC15 sisenditega koos kahe 6,8pF mahtuvusliku koormuskondensaatoriga. Kvartsresonaatoriks otsustati kasutada MC-306, millele tuleb lisada 6pF – 12pF kondensaatorid, täpne suurus sõltub kasutusest. Võttes aluseks STM32F0 Discovery arendusplaadi elektriskeemi, siis otsustati kasutada samade parameetritega kondensaatoreid nagu on seal soovitatud (6,8pF).

Mikrokontrolleri kasutamise teeb universaalseks sellel jooksev tarkvara, mis tuleb arvuti ja programmaatori abil kontrolleri mällu laadida, ehk programmeerida. Selleks on võimalik kasutada samanimelise mikrokontrolleri arendusplaati (STM32F0 Discovery), millel on sisseehitatud programmaator STLINK/V2. Välise mikrokontrolleri programmeerimiseks on vaja minimaalselt ainult kahte signaali (taktsignaali SWCLK ja andmesiooni SWDIO), kuna STM32F0 kasutab populaarse 5-juhtmelise JTAG asemel SWD (*Serial Wire Debug*) liidest, millega on võimalik lisaks programmeerimisele ja koodi siluda ja vigu otsida. SWD on ARM-i standardne liides, pakudes töökindlat, kiiret ja minimalistliku ühendust [41]. Välise mikrokontrolleriga ühendamise toimub joonise 3.19 alusel. Lisaks kahele eelnevale signaalile

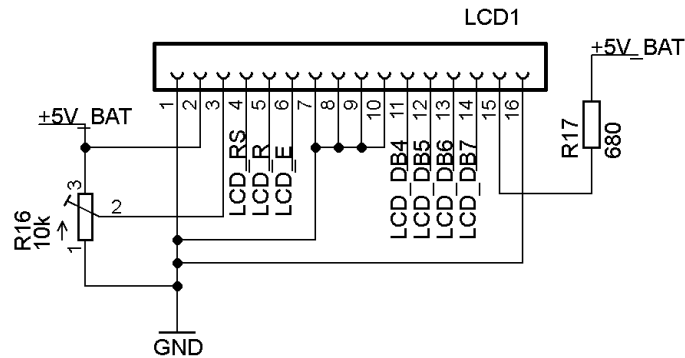
on kindlasti vaja ühendada ka maapotentsiaalid ning RESET (NRST) signaal, mis on vajalik programmeerimise lihtsustamiseks.



Joonis 3.19 Programmeerimisühendus STLINK/V2 ja SWD vahel

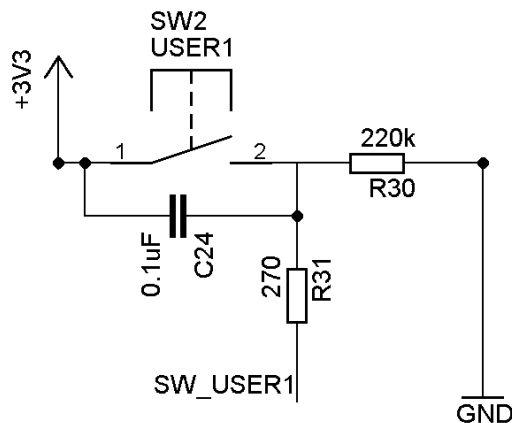
Programmaatori STLINK/V2 poolelt on ühenduseta toide VDD ja SWO. Toiteühendus seadmete vahel ei ole vajalik kuna mõlematel on iseseisev toiteallikas, sealhulgas on maapotentsiaalid ühenduses ning SWO klemm on reserveeritud ja ei vaja ühendamist [41], [10].

Mikrokontroller võimaldab kasutada antud projektis LCD ekraani moodulit, mille abil on võimalik kasutajale kuvada tekstipõhist teavet akvaariumi kohta. LCD moodul põhineb Hitachi HD44780 kontrollerial. See töötab nii 8-bitises kui ka 4-bitises konfiguratsioonis, kusjuures 4-bitine ühendus vajab poole vähem andmesiini ühendusi. LCD elektriskeem on toodud joonisel 3.20. LCD ühendamiseks mikrokontrolleriga on vaja minimaalselt seitse vaba sisend-väljund klemmi. Kolm on vajalikud instruksioonide ja juhtsignaalide edastamiseks (LCD_RS, LCD_R, LCD_E) ning kuna antud juhul otsustati lihtsuse ja kokkuhoiu mõttes kasutada LCD-d 4-bitises ühenduses, siis on vajalikud ka neli andmesiini (LCD_DB4 – LCD_DB7). 4-bitises lülituses toimub andmete edastamine korda mööda neli nooremat järku ja siis neli vanemat järku. Sel juhul tulebki välja 4-bitise lülituse puudus, milleks on andmeside kiirus. Kuna antud rakenduses pole andmete kiire voog väga suure tähtsusega, siis valitigi 4-bitine lülitus. Lisaks on veel vajalik 10kΩ potentsiomeeter R16 ekraani kontrastsuse reguleerimiseks ning volupiirav takisti R17, mis määrab LCD LED taustvalguse heleduse.



Joonis 3.20 LCD ühendusskeem mikrokontrolleriga

Selleks, et kasutajal oleks võimalus teha valikud kuvatava informatsiooni suhtes, on vaja lisada nupud. Nuppude ja ekraaniga on hiljem võimalik luua menüü süsteem, kus kasutaja saab seadistada näiteks kellaega või siis uurida antud hetkel huvipakkuvat infot akvaariumi kohta. Kontaktnuppude kasutamine pole kahjuks aga lihtne, kuna ühe nupuvajutusega võib esineda nn „kontaktide sädelust“, mille tulemusena võib üks nupuvajutus hoopis registreeruda kui mitu järjestikust nupuvajutust. Selle nähtuse leevendamiseks võib kasutada nii riistvaralisi kui ka tarkvaralisi filtreid. Tarkvaras on asja idee see, et kui toimub nupuvajutus, siis oodatakse teatud ajavahemik ning siis kontrollitakse uuesti, kas nupu olek on sama, mis enne. Riistvaralises lahenduses tuleb lisada RC filter, mille ajakonstant peaks olema piisavalt pikk, et välistada nupu fantoomvajutused. Antud juhul kasutatav lülitus on joonisel 3.21.

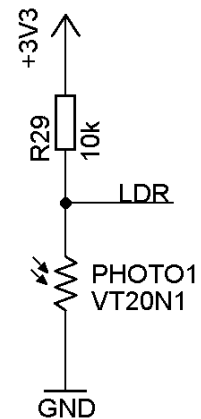


Joonis 3.21 Lülitifantoomvajutuse filter

Takisti R31 koos kondensaatoriga C24 moodustavad RC filtri, mille ajakonstant on $\tau = RC = 270\Omega \cdot 0,1\mu F = 27\mu s$. R30 on voolupiirav takisti, mille eesmärk on nupu vajutuse korral piirata lülitit läbivat voolu. Lülitivajutuse korral sulgub ahel ning vool voolab läbi R30 maha, tõstes SW_USER1 potentsiaali toitepingele, ehk loogilisele „1“, mida tarkvaras tõlgendatakse kui nupuvajutust.

Peale kahe kasutajanupu on ka „reset“ nupp, millega on võimalik mikrokontroller taaskäivitada, kui näiteks süsteemile laetakse peale uus kood või kui tekib ettearvamatu programmi käitumine väliste tõrgete tõttu.

LED valgustuse juhtimiseks on vaja lisada ka valgusandur, milleks valiti fototakisti. Fototakisti takistus muutub vastavalt sellele langevale valgushulgale. Antud juhul otsustati kasutada vana fotoaparaadi fototakistit, mille takistus väheneb sellele langeva valguse kasvades, ehk tegemist on negatiivse koefitsiendiga anduriga. Katseliselt mõõdeti antud fototakisti takistuseks 500Ω (otsene päiksevalgus) - 100kΩ (pime tuba), kusjuures tavalise päevavalguse puhul oli väärtuseks 6kΩ - 12kΩ. Lähtudes eelnevatest andmetest otsustati kasutada fototakistit koos 10kΩ takistiga R29 pingejaguri konfiguratsioonis (Joonis 3.22), mille väljundpinge on vastupidiselt võrdeline keskkonna valgustusega ning ADC abiga on võimalik juhtida LED valgustuse intensiivsust.



Joonis 3.22
Fototakisti
pingejaguri lülituses

$$U_{out(valge)} = \frac{U_{in} \cdot R_{photo}}{R_{photo} + R29} = \frac{3,3V \cdot 2k\Omega}{2k\Omega + 10k\Omega} \approx 0,54V$$

$$U_{out(pime)} = \frac{U_{in} \cdot R_{photo}}{R_{photo} + R29} = \frac{3,3V \cdot 20k\Omega}{20k\Omega + 10k\Omega} \approx 2,2V$$

Lisaks kõigele eelnevale lisati antud süsteemile mitmeid väiksemaid detaile. Näiteks paar indikaator valgusdiodi, millega on võimalik kasutajat informeerida teatud vee parameetri halvenemisest. Kuna temperatuurisensor DS18B20 töötab antud juhul välise toiteallika pealt, siis oli vaja lisada ainult 4,7kΩ takisti andmesiini pinge tõstmiseks toitepingele.

Kõikide eelmainitud lülituste ühendamisel mikrokontrolleriga lähtuti sellest, et võimaluse korral ei peaks ära kasutama kõiki viit sisendite-väljundite porti (A,B,C,D,F). Iga porti on võimalik aktiveerida individuaalselt ning vähima arvu portide kasutamisel on võimalik muuta süsteem energiasäästlikumaks. Siiski tuli ka arvestada, et näiteks ADC on ainult C pordi väljaviikudel. Lõpptulemuseks saadi elektriskeem, kus ei kasutatud mikrokontrolleri B-porti. Tabel 3.1 annab lõpliku ülevaate mikrokontrolleri väljaviikude kasutusest ning nende konfiguratsioonist.

Tabel 3.1 Mikrokontrolleri STM32F0 väljaviikude kasutus. Pruunil taustal on toiteklemmid.

Väljaviigu nr	Väljaviik	Signaal	Kirjeldus	Väljaviigu konfiguratsioon
1	VBAT	VBAT	Tagavara toiteallika sisend	toide
3	PC14	OSC32_IN	Välise kvartsresonaatori sisend	sisend
4	PC15	OSC32_OUT	Välise kvartsresonaatori väljund	väljund
7	NRST	NRST	Reset signaal, madalaktiivne	sisend
9	PC1	LDR	Fototakisti analoogsisend	sisend
10	PC2	PH_SENS	pH-anduri analoogsisend	sisend
12	VSSA	GND	0V toide (analoog)	toide
13	VDDA	3V3	3,3V toide (analoog)	toide
15	PA1	LCD_DB4	LCD andmesiin	väljund
16	PA2	LCD_DB5	LCD andmesiin	väljund
17	PA3	LCD_DB6	LCD andmesiin	väljund
20	PA4	LCD_DB7	LCD andmesiin	väljund
21	PA5	LCD_E	LCD "enable" juhtsignaal	sisend/väljund
22	PA6	LCD_R	LCD "reset" juhtsignaal	sisend/väljund
23	PA7	LCD_RS	LCD "register select" juhtsignaal	sisend/väljund
24	PC4	LED2	Indikaator LED1	väljund
25	PC5	LED3	Indikaator LED2	väljund
31	VSS1	GND	0V toide	toide
32	VDD1	3V3	3,3V toide	toide
37	PC6	PWM1	500kHz PWM signaal	väljund
38	PC7	DS18B20	Temperatuurisensor DS18B20	sisend/väljund
39	PC8	LED_DIM	LED valgustuse reguleerimiseks PWM signaal	väljund
41	PA8	SW_USER2	Kasutajaliidese juhtnupp	sisend
42	PA9	SW_USER1	Kasutajaliidese juhtnupp	sisend
46	PA13	SWDIO	SWD andmesiin	sisend/väljund
49	PA14	SWDCLK	SWD taktsignaal	sisend/väljund
60	BOOT0	BOOT0	Algaaduri (boot) seadistussignaal. (Flash)	sisend
63	VSS2	GND	0V toide	toide
64	VDD2	3V3	3,3V toide	toide

Antud peatükis koostati kogu akvaariumisüsteemi elektriskeemid ning esitati vajalikud arvutused ning põhjendati komponentide valikut. Akvaariumisüsteem koosneb kahest elektriskeemist (LED valgustus ja põhimoodul), põhimooduli elektriskeem jaotati lihtsuse mõttes veel kolmeks alamskeemiks: toitemoodul, pH-anduri tüürskeem ning STM32F0 mikrokontroller koos sisend-väljund ühendustega. Terviklik juhtmooduli elektriskeem on lisas 2.

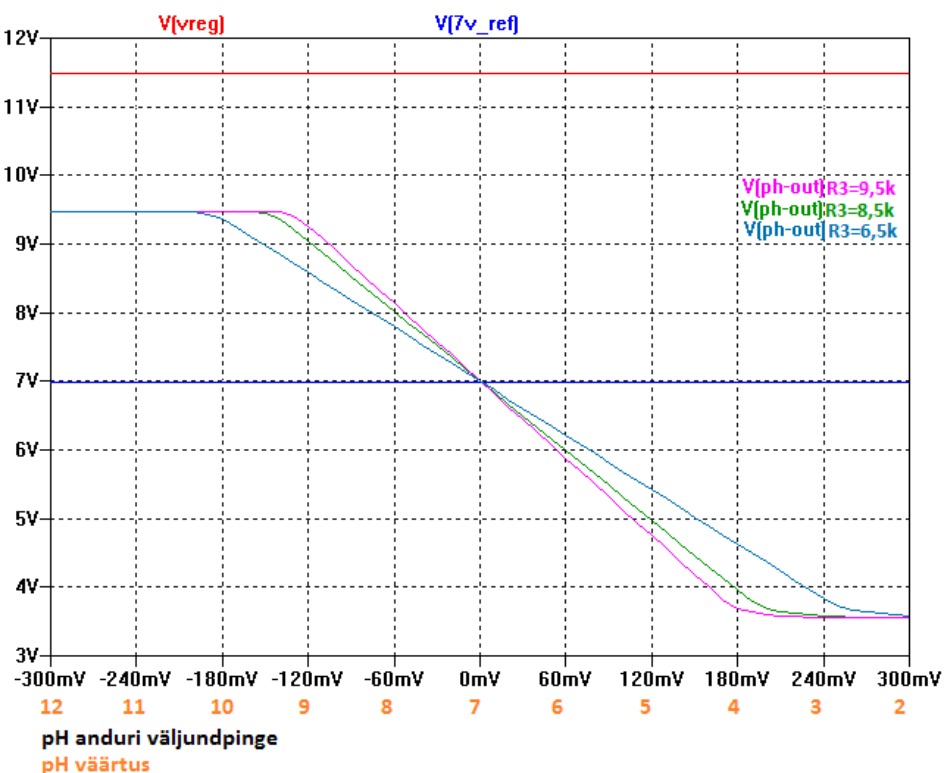
4. Simulatsioonid

Antud peatükis teostakse enne trükkplaatide projekteerimist osade elektriskeemide simulatsioonid, et uurida erinevaid parameetreid ning vajadusel arvutada ümber komponentide väärtused. Peamisteks simulatsiooni objektideks on pH-anduri elektriskeem ja toitemooduli 5V pingemuundur. Simulatsioonid teostati tarkvara LTSpice abil.

4.1 pH-anduri juhtskeemi simulatsioon

Kuna pH-anduri näol on tegemist analoogskeemiga, siis on võimalik simuleerida ja uurida kuidas toimub antud skeemi (lisas 2) kalibreerimine ning kas skeem on üldse teoreetiliselt töövõimeline.

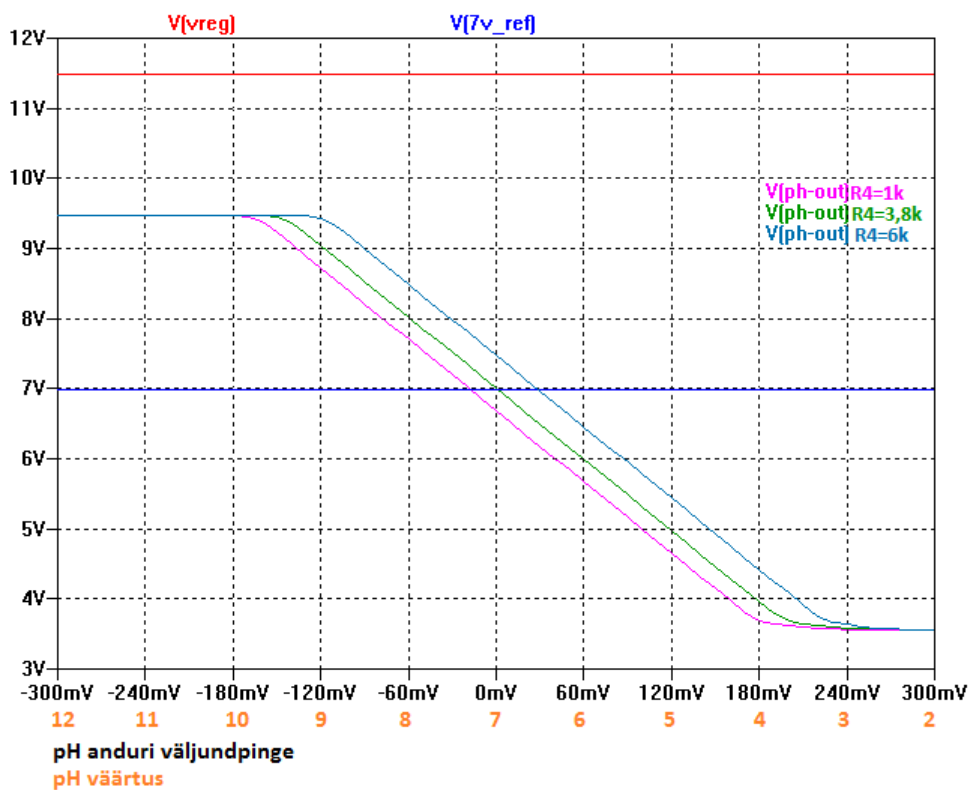
Enne skeemi uurimist tuleb see kalibreerida. Kuna pH-andur käitub kui pingeallikas, mille pinge muutub 60mV pH ühiku kohta, siis simulatsioonis asendati see pingeallikaga, mille väljundpinget muutes on võimalik simuleerida pH muutust reaalses lahuses. Esimese sammuna tuleb potentsiomeetri R1 abil seadistada 11,5V stabiilne toitepinge ($V(vreg)$) ja peale seda R2 abil 7V referentspinge ($V(7v_ref)$). Järgmiseks tuleb paika seada pH-sirge tõus ja nullinihke kompensatsioonipinge.



Joonis 4.1 pH juhtskeemi tõusukallaku kalibreerimine potentsiomeetri R3 abil

Selleks tuleb realsuses pH-andur paigutada testvedelikku, mille pH on täpselt 7. Selle tulemusena on võimalik R3 abil reguleerida graafiku tõus ja R4 abil kompensatsiooni pinget. Joonisel 4.1 on simulatsiooni tulemus, mis illustreerib pH-skeemi tõusu kalibreerimist potentsiomeetri R3 reguleerimisel. Simulatsioonitulemus saadi kui muudeti pH-anduri väljundpinget vastavalt pH muutusele (-300mV kuni 300mV, mis vastab 12) Tõusu reguleerimine kujutab täpsemalt võimendi võimenduse seadmist ca 17 peale, mis annaks väljundisse täpse võrdelise suhte: 60mV muut vastab 1V väljundpinge muudule ja pH muudule. Simulatsiooni tulemusest on näha, et kui seada R3 väärtuseks arvatud 8,5k Ω (roheline), siis on see tingimus täidetud, ehk süsteem on kalibreeritud. Kui aga R3 väärtust suurendada, siis muutub tõusu kallak laugemaks ja sarnaselt R3 vähendades muutub tõusu kallak järsumaks. Mõlemal juhul ei tööta skeem korrektselt, et väljundpinge ei vasta mõõdetavale lahuse pH-le. Kui võrrelda antud simulatsioonitulemust ja peatükis 2 esitatud joonist 2.9, kus on antud Nernsti võrrand, siis on näha, et simulatsioonitulemus on sarnane Nernsti võrrandiga, mis kinnitab skeemi töövõimelisust.

Operatsioonivõimendi nihkepinge kompenseerimiseks kasutatakse potentsiomeetrit R4. See võimaldab kõrvaldada OV süstemaatilise vea ehk nihkepinge. Allpool joonisel 4.2 on toodud simulatsioonitulemus, mis kirjeldab kuidas mõjutab R4 süsteemi väljundit.



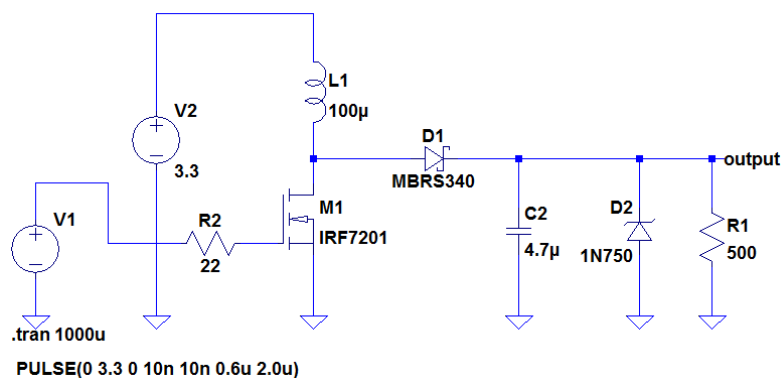
Joonis 4.2 pH juhtskeemi kompensatsiooni (nihkepinge) kalibreerimine potentsiomeetri R4 abil

Joonisel 4.2 on näha, et kalibreeritud süsteemi pH-tunnusjoonel vastab igale pH ühikule võrdeline väljundpinge. Katsemeetodil leiti, et simulatsiooniskeemi puhul on R4 jaoks ideaalne väärtus $3,8k\Omega$ (roheline). Antud väärtusest väiksema takistuse korral nihkub pH-tunnusjoon vasakule ja takistuse suurenedes paremale, mis tähendab, et suurema nihkepinge kompenseerimiseks tuleb vähendada R3 takistust, sarnaselt väiksema nihkepinge kompenseerimiseks suurendada.

4.2 5V pingemuunduri simulatsioon

Kui eelmises peatükis projekteeriti pinget tõstev pingemuundur $3,3V \rightarrow 5V$, siis selgus, et kõige kriitilisemad parameetrid on induktiivsus ja täitetegur. Selleks, et uurida täpsemalt kuidas sõltub pingemuunduri väljundpinge induktori ja täiteteguri valikust, teostati simulatsioonid, kus uuriti kuidas sõltub väljundpinge kui suurendada/vähendada induktori ja täiteteguri väärtust. Lähtepunktiks valiti arvutatud väärtused $L = 100\mu H$ ja täitetegur $D = 30\%$.

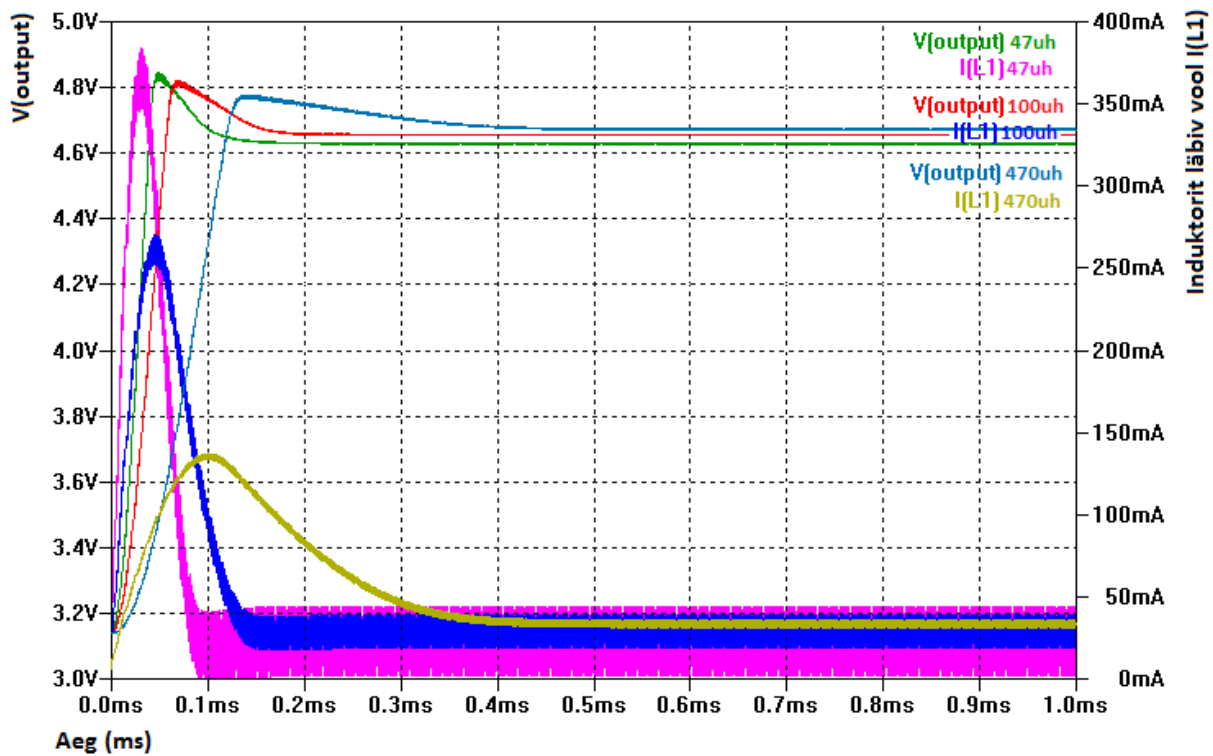
Simulatsiooni jaoks koostati LTSpice's simulatsiooniskeem, mis on toodud joonisel 4.3.



Joonis 4.3 5V pingemuunduri LTSpice simulatsiooniskeem

Esimese sammuna uuriti, kuidas sõltub induktori vool $I(L1)$ induktori väärtuse muutmisel. Vastavalt eelnevas peatükis tehtud arvutustele on induktorit läbiv vool (s.h pulsatsioon) pöördvõrdeline induktori suurusele. See tähendab, et mida väiksem on induktor, seda suurem on induktorit läbiv vool ja ka pulsatsioon, mis omakorda võib põhjustada induktori küllastusse sattumise ja seega on suurem risk, et pingemuundur võib muutuda ebastabiilseks [32].

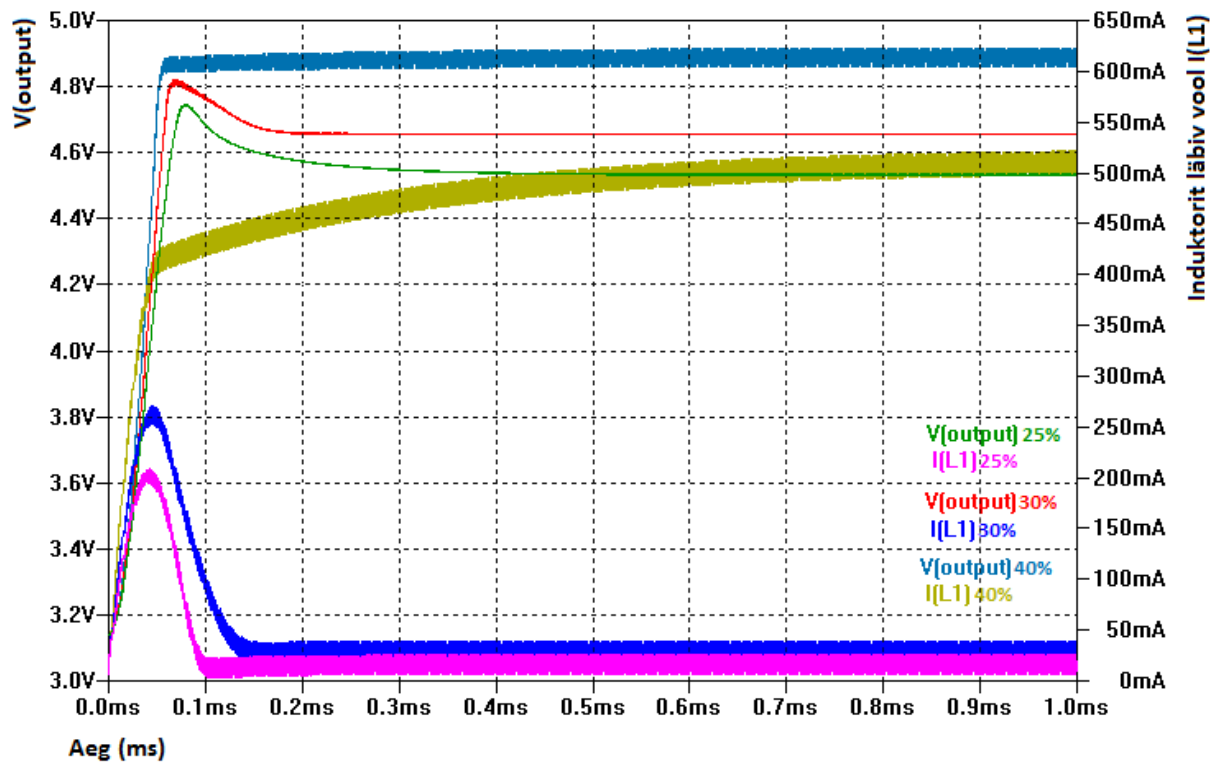
Esimesena uuriti kuidas mõjutab induktori suurus väljundpinget ja induktori pulsatsiooni. Selleks teostati simulatsioonid järgnevate L1 väärtustega: $47\mu H$, $100\mu H$, $470\mu H$. Tulemused on allpool joonisel 4.4.



Joonis 4.4 Pingemuunduri väljundpinge ja induktori voolu sõltuvus induktori suurusest täiteteguri 30% korral

Jooniselt 4.4 on näha, et induktori väärtuse kasvades väheneb pulsatsioon ja suureneb väljundpinge, mis vastab oodatud tulemustele. 100 μ H induktori puhul on keskmine induktorit läbiv vool 30mA ja väljundpinge 4,6V, mis vastab soovitud tingimustele.

Järgmiseks uuriti, kuidas mõjutab signaali täitetegur samasid parameetreid. Joonisel 4.5 on toodud simulatsioonitulemused induktori väärtuse 100 μ H ning erinevate täitetegurite 25%, 30% ja 40% korral. Nagu näha jooniselt 4.5, siis täiteteguri suurenemisel suureneb ka induktori vool ja ka väljundpinge, kuna täiteteguri suurenemisel salvestub induktoris suurem energiahulk, mis omakorda tekitab ka kõrgemat väljundpinget. Tulemused vastavad teoreetilistele eeldustele.



Joonis 4.5 Pingemuunduri väljundpinge ja induktori voolu sõltuvus täitetegurist induktori väärtuse $100\mu\text{H}$ korral

5. Trükkplaatide ja akvaariumi kaane projekteerimine

Järgnevas peatükis disainitakse eelnevalt koostatud elektriskeemide alusel trükkplaadid. Elektriskeemid paigutatakse kahe erineva trükkplaadi peale vastavalt funktsioonidele: põhitrükkplaat ja LED valgustuse trükkplaat. Trükkplaadid disainitakse tarkvaraga Cadsoft Eagle. Lisaks trükkplaatidele projekteeritakse ja ehitatakse ka akvaariumikaas, kuhu hiljem paigutatakse valmis trükkplaadid, mis seob süsteemi tervikuks.

5.1 Üldised nõuded trükkplaadile

Enne trükkplaadi disainimist tuleb kindlasti selgeks teha, mis on antud toote edasised plaanid, sest see kõik mõjutab trükkplaadi disaini. Näiteks kui on tegemist esimese prototüüp plaadiga, siis ei ole komponentide valik väga kriitiline. Reeglina tuleks eelistada võimalikult palju pindmontaažkomponente, kuna nende jootmine on odavam ja kergemini automatiseeritav kui on tegemist masstoodanguga. Siiski oleks mõistlik trükkplaadi tegemisel kohe arvestada nii trükkplaadi tootja- kui ka hiljem valmistamisfirmaga. Tihiti on lihtsam, kiirem ja odavam kohe alguses disainida korralik trükkplaat, mida oleks ka lihtne toota, kui hiljem hakata seda muutma, mis võib võtta isegi rohkem aega ja raha.

Antud juhul arvestati trükkplaadi disainis algusest peale asjaoluga, et trükkplaadid ei tehta kodustes tingimustes, vaid tuleb tellida. Peamisteks põhjusteks on see, et kahepoolseid trükkplaatide puhul ei saa kodustes tingimustes metalliseeritud viasid. Igal trükkplaadi tootjal on teatud miinimumnõuded, mida tuleb järgida trükkplaadi disainimisel. Miinimumnõuded määravad ära näiteks minimaalse radade vahe, puuriava mõõtmed, vasekihi kauguse plaadi äärest, mis tulevad tootjapoolsetest tehnilistest piirangutest. Antud juhul otsustati tellida trükkplaadid Eesti tootjalt Kamitra OÜ. Sellest lähtuvalt on toodud tabelis 5.1 Kamitra miinimumnõuded trükkplaadile.

Tabel 5.1 Kamitra OÜ trükkplaadi miinimumnõuded [42]

Tunnus	Miinimum mõõtmed
Radade vaheline kaugus ja raja laius	0,25mm
Vase kaugus trükkplaadi äärest	0,5mm
Väikseim metalliseeritud auk	0,2mm
Väikseim freesitav lõige	0,8mm
Siiditrüki tolerants	0,4mm

Tavaliselt on mõistlikum tellida mitu trükkplaati, kuna siis tuleb ühe trükkplaadi hind soodsam. See tähendab, et tellimus tuleb esitada paneelina. Paneeli ettevalmistamisel tuleb arvestada paneeli maksimaalsete mõõtmetega 360mm x 460mm. Paneliseerimisel peab jätma trükkplaatide vahele vaba ruumil, sõltuvalt kuidas soovitakse need hiljem lahti lõigata. Selleks võib kasutada freesimist, v-lõiget või mõlema kombinatsiooni. Freesimisel kasutatakse reeglina 2mm läbimõõduga puuri, seega tuleb jätta plaatide vahele paneelis vähemalt 2mm vaba ruumi. V-lõige on alati sirge, mistõttu saab seda kasutada ainult korrapäraste plaatide puhul. V-lõike jaoks peab arvestama 0,8mm vaba ruumiga plaadi äärest [42].

Lisaks tootmistest tulenevatele piirangutele tuleb vooluradade projekteerimisel arvestada ka mitmete muude asjaoludega, mis on tingitud signaalide sageduslikest omadustest. Näiteks kõrgsageduslikud digitaalsignaalid võivad indutseerida kõrvalolevates juhtmetes soovimatuid vooluimpulsse. Teiseks peab kindlasti arvestama radasid läbiva voolu suurusega. Tabelis 5.2 on toodud maksimaalsed lubatavad voolud amprites 35µm paksuse vasekihi korral ning vastava voolu puhul temperatuuri tõus võrreldes keskkonna temperatuuriga.

Tabel 5.2 Maksimaalsed lubatavad voolud ja temperatuuritõus [43]

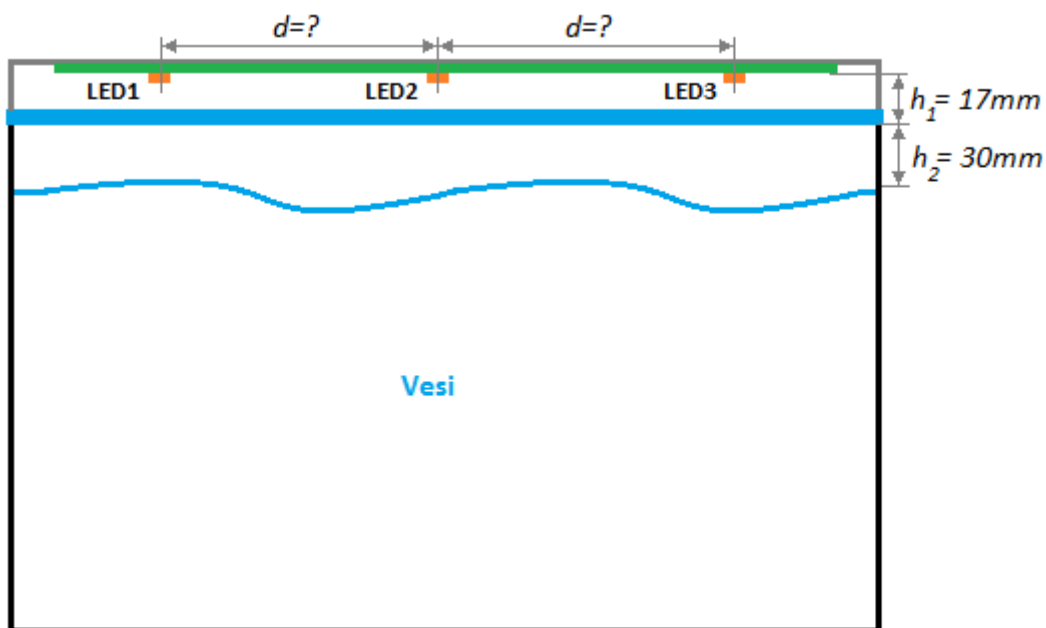
Juhtme laius [mm]	10 °C [A]	20 °C [A]
0,5	1,3	2
1	2	2,8
1,5	2,6	3,7
2	3,2	5
4	5,5	8
6	8	11
8	9,5	13

5.2 LED valgustuse trükkplaadi disain

Kuna LED valgustuse elektriskeem on suhteliselt lihtne, siis antud plaadi disainimise peamiseks nõudmiseks olid selle mõõtmed, mille laiuse määras ära alumiiniumist U-kujuline kronstein, kuhu kinnitatakse hiljem valmis trükkplaat kruvidega (16mm), ja pikkuse LED-ide vaheline kaugus.

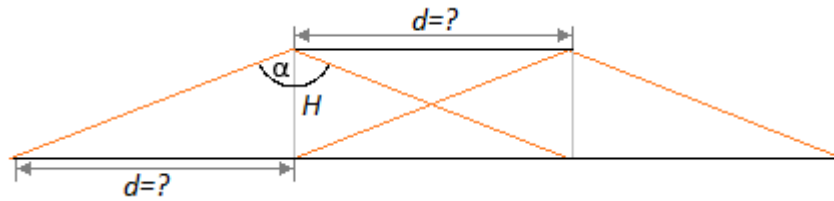
LED-ide vaheline kaugus on oluline, kuna sellest sõltub valguse jaotus akvaariumis. Selle määramiseks on vaja teada, kui kaugel on LED-id veepinnast ning LEDi valgusvihu nurka. Kuna tegemist on võimsus LED-idega, siis juhitakse eralduv soojus läbi trükkplaadi viade plaadi tagumisele küljele. Parema jahutuse tagamiseks tuleb paigutada trükkplaat alumiiniumist kronsteini külge, mis toimib jahutusena. LED-e kaitseb niiskuse eest pleksiklaas. Joonisel 5.1 on toodud akvaariumivalgustuse eskiis.

Valgusdiodide paigutamisel on oluline teada nende kaugust veepinnast. Selle hindamiseks on vaja teada U-kronsteini sügavust ja akvaariumi veepinna taset. Arvestades, et akvaariumi veetase ülemisest servast on 30mm ja kronsteini sügavus koos pleksiklaasi paksusega ja 2mm trükkplaadiga moodustab ca 17mm, siis võib arvestada, et LEDide kauguseks veepinnast kujuneb 47mm. Lihtsuse mõttes võib aga ümardada antud suuruse 50mm peale, kuna see kindlustab, et valgus hajub paremini ka siis, kui veetase on hinnatust madalamal.



Joonis 5.1 Akvaariumivalgustuse LED-ide paigutus

LED-ide kauguse d leidmiseks tuleb rakendada trigonomeetriat. Teades LEDide kaugust veepinnast ($H = h_1 + h_2 \approx 50\text{mm}$) ning Rebel LED-i valgusvihu nurka ($\alpha = 120^\circ$) [12], on võimalik leida täisnurkse kolmnurga abil otsitav suurus d (Joonis 5.2).



Joonis 5.2 LED-ide vahelise kauguse leidmine

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{d}{H} \Rightarrow d = H \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 50\text{mm} \cdot \tan\left(\frac{120^\circ}{2}\right) = 86,6\text{mm} \approx 90\text{mm}$$

Seega kujunes optimaalseks LED-ide vaheliseks kauguseks 90mm, mis annab trükkplaadi pikkuseks¹³ 240mm, kui jätta äärmistele LED-idele 30mm vaba ruumi trükkplaadi äärest.

Elektroonikakomponentide valikul eelistati täielikult pindmontaaži, kuna teisiti poleks võimalik hiljem trükkplaati kinnitada alumiiniumist radiaatori külge. Peamooduliga ühendamiseks lisati jooteväljad, kuhu lisatakse juhtmed ja nende otsa JST-XH pistik.

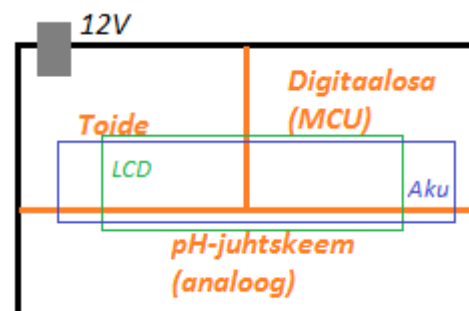
Kokkuvõtteks kujunes LED-ide trükkplaadi suuruseks 240mm x 16mm. Trükkplaadi joonised on lisan 4. Allpool joonisel 5.3 on LED valgusti trükkplaadi 3D mudel, mis on tehtud tarkvaraga Google Sketchup.



Joonis 5.3 LED valgusti trükkplaadi 3D mudel

5.3 Põhimooduli trükkplaadi disain

Põhimooduli trükkplaadi tegemisel tuleb arvestada, et see koosneb mitmest alamskeemist, mistõttu peab arvestama võimalike häiringute tekkimisega analoog- ja digitaalsignaalide



Joonis 5.4 Põhimooduli skeemi alamskeemide paigutus

¹³ Pikkus = 30mm + 90mm + 90mm + 30mm = 240mm

paigutamisel. Sellest lähtuvalt jaotati põhimooduli trükkplaadi tegemine elektriskeemide põhjal osadeks (Joonis 5.4).

Trükkplaadil on selgelt eristatavad toiteosa, pH-juhtskeem ja mikrokontroller (digitaalosa). Antud jaotus lihtsustab hiljem trükkplaadi kokku monteerimist ja testimist. Trükkplaadi mõõtmeteks kujunes 100mm x 60mm, mille määravaks teguriks osutusid kõige suuremate komponentide - LCD ekraani ja aku mõõtmed. LCD paigutati trükkplaadi keskossa ja aku trükkplaadi tagumisele poolele.

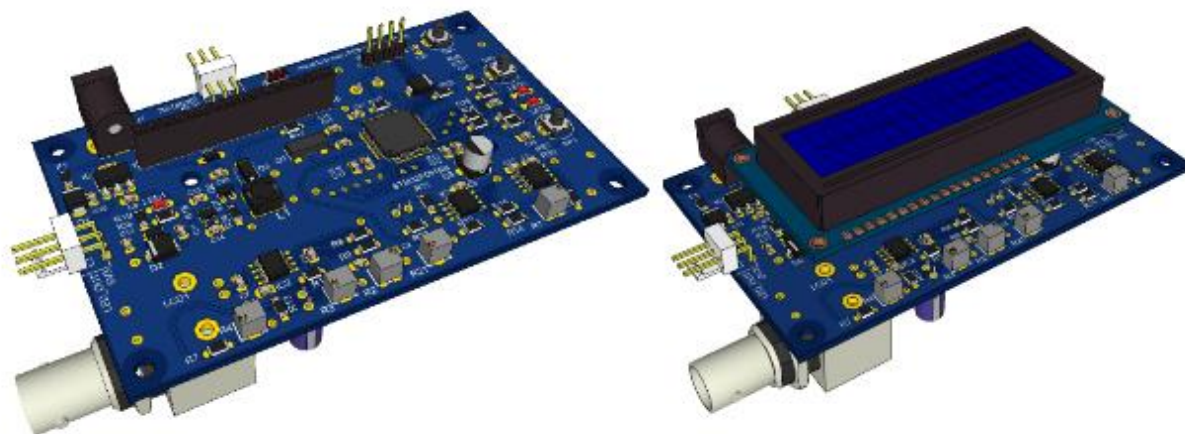
Trükkplaadi projekteerimist alustati loogiliselt toitemoodulist. Toitemooduli disainimisel on oluline, et pingeregulaatorite sidekondensaatorid paigutataks võimalikult lähedale integraalskeemidele, mis tagab stabiilse väljundpinge ning hoiab ära pingeregulaatori genereeriva oleku.

pH-juhtskeemi alustati BNC pistiku paigaldamisega trükkplaadi alumisse ossa, vasakule. pH-skeemi projekteerimisel oli kõige kriitilisem osa just võimendi paigutamine BNC pesa lähedale. Antud sõlm on kõrge impedantsiga, mis tähendab, et pikema ühenduse korral käitub see sõlm kui antenn ja tekitab pH-signaalis häiringuid. pH-juhtskeemi kalibreerimise lihtsustamiseks paigutati vastavad potentsiomeetrid (R1 - R4) trükkplaadi alumisse ossa.

Mikrokontrolleri ja seda ümbritsevate komponentide paigutamisel trükkplaadile on mitmed nõudmised [40]. Kindlasti tuleb kõik toiteklemmid lahti sidestada kondensaatoritega, mis tuleb paigutada võimalikult lähedale toiteklemmidele. Veel parem oleks häiringute vältimiseks pühendada eraldi vasekihid toitepotentsiaali ja maaühenduse jaoks. Kuna antud juhul on tegemist siiski kahekihilise FR4 trükkplaadiga, siis üritati hoida toiteühendused mikrokontrolleri toiteklemmidega võimalikult lühikesed. Seda võimaldas ka viade kasutamine.

Kogu trükkplaadi projekteerimise vältel kasutati suurem osa pindmontaaž komponente, kuna need säästavad väärtuslikku trükkplaadi pinda ning vajaduse korral on odavam ka tootmises kasutada.

Valmis trükkplaadi 3D mudel on joonisel 5.5. Antud mudel on tehtud tarkvaraga Google Sketchup. Trükkplaadi gerber joonised on lisa 4.



Joonis 5.5 Põhimooduli trükkplaadi 3D mudel. Paremalt koos ekraaniga.

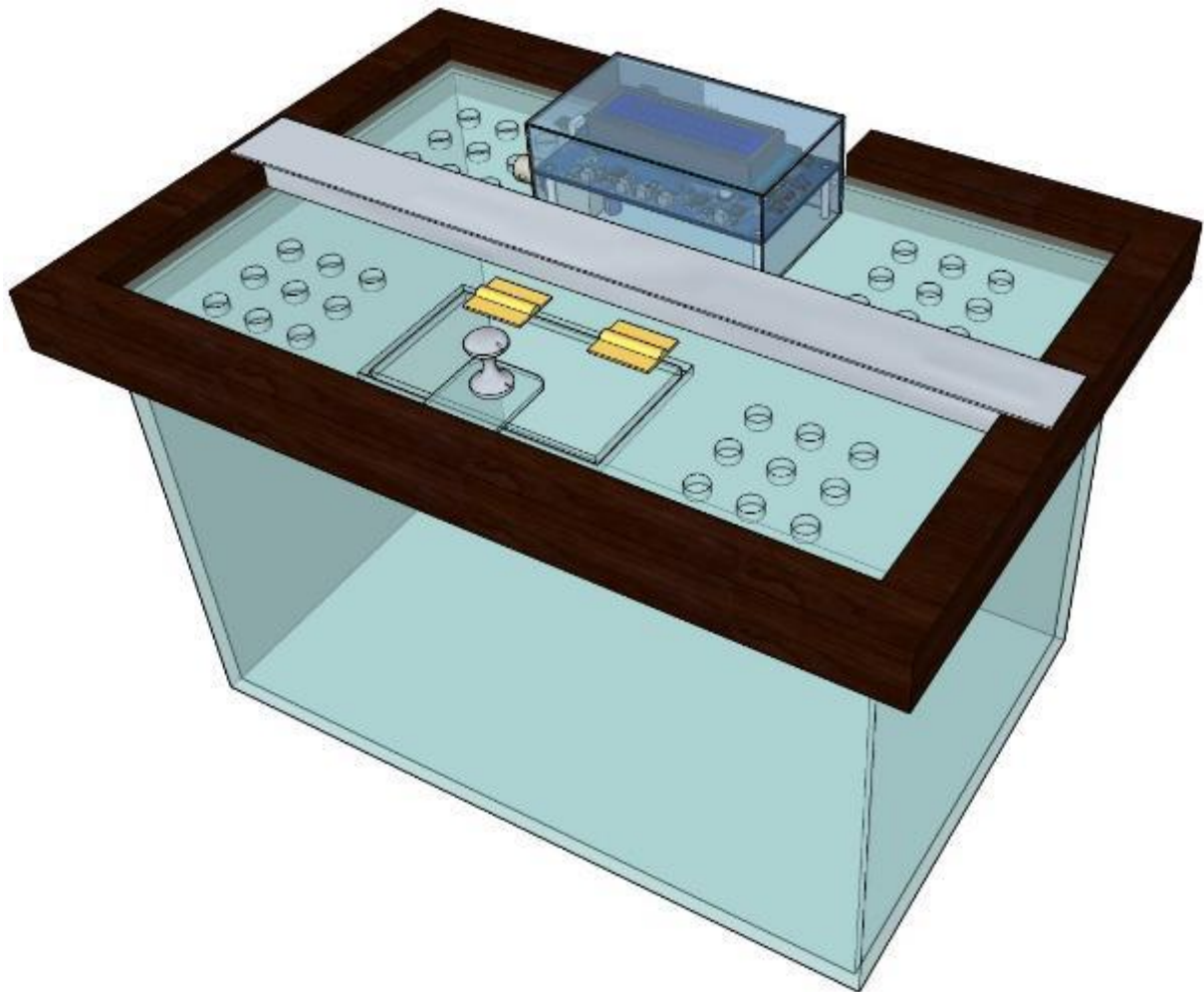
5.4 Akvaariumi kaane projekteerimine ja realiseerimine

Akvaariumisüsteemi paigaldamiseks ja testimiseks on vaja kinnitada süsteem koos valgustuse ja sensoritega akvaariumi külge. Kuna tegemist on suhteliselt väikese akvaariumiga, millel puudub kaas, siis on ideaalne võimalus see ise projekteerida vastavalt soovile ja paigaldada kogu süsteem kaanele. Akvaariumile on kaas hädavajalik, kuna see kaitseb vee liigse aurustumise eest ja kindlustab, et kalad ei hüppaks veest välja. Viimaseks põhjuseks võib pidada ka autori enda huvi akvaristika vastu ning antud süsteemi testimist reaalses olukorras.

Akvaariumikaane projekteerimisel lähtuti akvaariumi mõõtmetest. Tegemist on 11 liitri akvaariumiga, mille mõõtmed on 32cm x 21cm x 21cm. Tavaliselt võib katta akvaariumi ka metallist võrguga või siis spetsiaalse kaanega, kuhu on juba sissehitatud luminofoorvalgustus. Antud juhul otsustati akvaariumikaane põhimaterjaliks kasutada 4mm paksust pleksiklaasi. Kaane nelja nurka puuriti õhuavad, mis võimaldavad õhuringlust, mis omakorda filtri abil võimaldab seguneda veega ja sedasi jõuda kaladeni. Kalade söötmise lihtsustamiseks paigaldati ka söötmissava luugi kujul. Kaane fikseerimiseks paigaldati pleksiklaas puidust raami sisse, mis istub vabalt akvaariumi peal ning vajaduse korral on kogu kaas lihtsalt eemaldatav. Kaane peale paigaldati ka alumiiniumist tagurpidi U-kujuline kronstein, mis on vajalik LED-ide jahutamiseks ning samas tugevdab kogu konstruktsiooni. Juhtmoodul paigaldatakse pleksiklaasi peale, kasutades metallist avadega kinnitusi, kuhu on võimalik juhtmoodul sisse libistada. Trükkplaadi nurkadesse paigutatakse poldid, mille pead kinnituvad metallist kinnitusavadesse. Selline kinnitusviis on kasulik, kuna võimaldab ligi

pääseda juhtmoodul all olevale akule. Juhtmooduli kaitsmiseks veepritsmete ja tolmu eest konstrueeriti sellele ümber pehmest plastmassist korpus.

Kaane projekteerimisel kasutati tarkvara Google Sketchup, mille abi loodi akvaariumi 3D mudel koos kaane ja juhtmooduliga (Joonis 5.6).



Joonis 5.6 Akvaariumi 3D mudel koos kaane ja juhtmooduliga

Viimaks realiseeriti kogu süsteem ning paigaldati akvaariumile. Lisas 5 on toodud mõned pildid valmis süsteemist. Akvaariumisüsteemi testimise käigus selgus, et selle voolutarve võrgutoitel on 367mA ja akutoitel ainult 38mA, mis tähendab, et 2200mAh akuga peab seade vastu ligi 58h, arvestades et akutoitel ei tööta LED valgustus ja pH mõõtmine. Arvata võib, et kõige enam tarbib voolu just LCD ekraan. Arvestades, et lisaks akutoitele on veel 4 päevane tagavara toiteallikas superkondensaatori näol, siis võib öelda, et antud süsteem on suhteliselt energiasäästlik.

6. Tarkvara disain

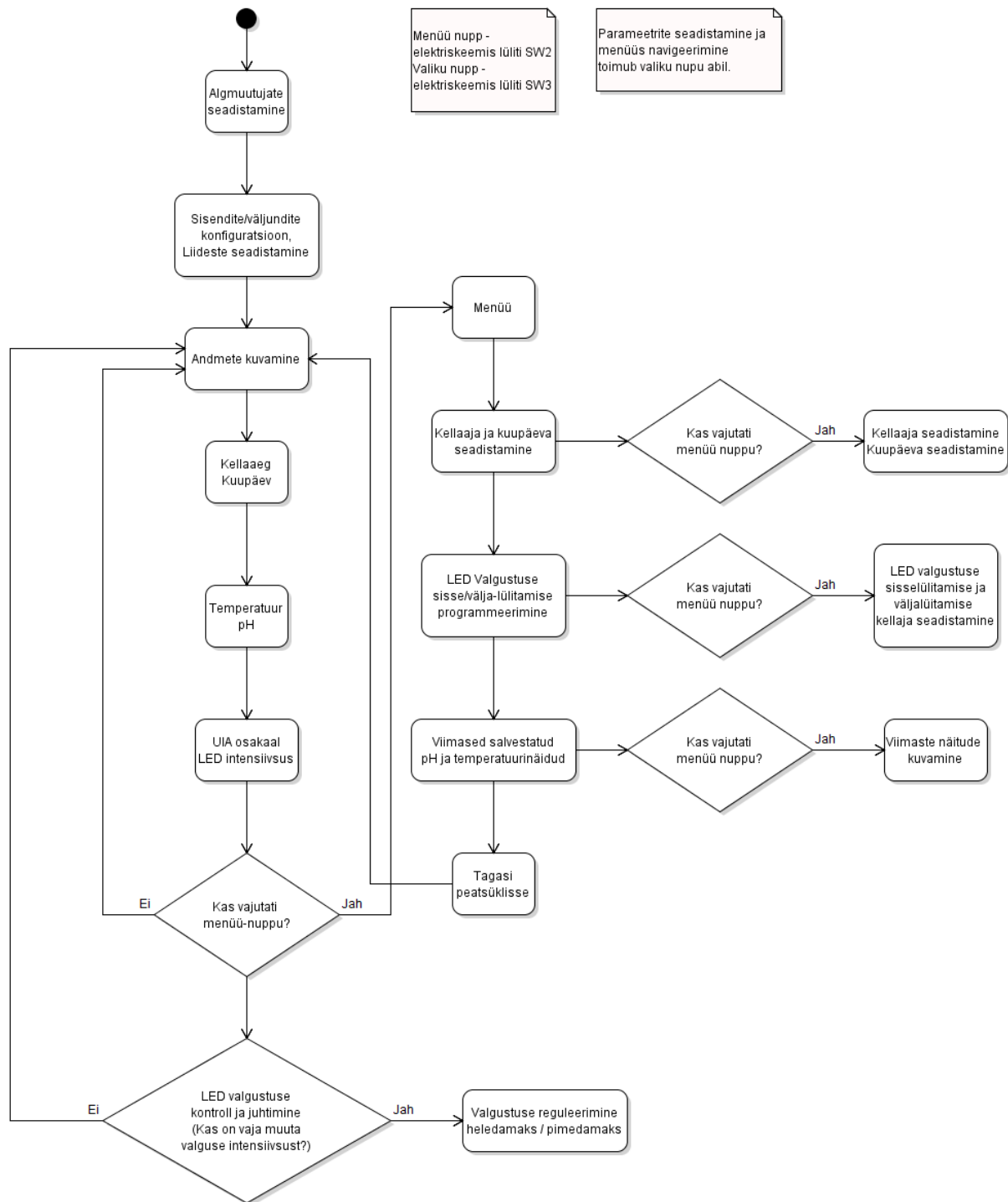
Iga nutiseadme teeb „targaks“ sellel jooksev tarkvara, mis kirjeldab täpselt seadme tööd etappidena. Seepärast nimetataksegi programmiks käskude kogumikku, mis kirjeldavad täpselt seadme tööd. Antud peatükis koostatakse algoritm koduakvaariumi süsteemile mille abil on võimalik kirjutada programmi lähtekood. Lähtekoodi kirjutamiseks kasutatakse ARMI ametlikku tarkvara Keil μ Vision, mis on tasuta, piiranguks on seadmele laetava koodi suurus, mis peab olema väiksem kui 32KB [44].

6.1 Programmi algoritm

Koduakvaariumi jälgimissüsteemi peamiseks ülesanneteks on vee parameetrite (temperatuur ja pH) mõõtmine ja kuvamine kasutajale, keskkonna valgustuse mõõtmine ja selle põhjal akvaariumivalgustuse intensiivsuse reguleerimine, õige kellaaja hoidmine ning viimaks lahustunud lämmastiku kordaja arvutamine ja kuvamine. Lisaks peab olema võimalik seadistada kellaajaga ja aega millal LED valgustus hommikul ja õhtul sisse ja välja lülitub. See annab kasutajale võimaluse akvaariumit seadistada vastavalt oma elustiilile või tööruutiniile. Viimaseks võib olla vajalik ka uurida temperatuuri ja pH näitude ajalugu ööpäeva vältel, et saada ülevaadet kuidas need parameetrid muutuvad ajas. Selleks lisatakse võimalus kasutajal uurida viimase 24h näite 4h intervallide tagant. Antud info võimaldab paremini jälgida ja aru saada akvaariumis toimuvast kui ökosüsteemist.

Võttes aluseks eelnevalt kirjeldatud tingimused, koostati programmi algoritm, mis on toodud allpool joonisel 6.1. Programmi töö algab muutujate seadistamisega ning vajalike definitsioonidega. Järgmiseks konfigureeritakse sisend-/väljundseadmed nagu näiteks LCD, PWM signaalide generaatorid, ADC seadistamine jms, mis hõlmab vastavate mikrokontrollerite väljaviikude seadistamist kas sisendiks või väljundiks. Peale seda kuvab ekraan tervitusteksti, mis annab kasutajale teada, et süsteem on korralikult üleslaadinud ja valmis. Nüüd satub programm lõpmatusse tsüklisse, mille käigus kuvatakse kordamööda kellaajaga, vee temperatuuri ja pH-d, ioniseerimata lämmastiku osakaalu konstanti (UIAf) ning LED valgustuse intensiivsust (keskkonna valgustase). Akvaariumi valgustuse juhtimiseks toimub pidev keskkonna valgustaseme kontrollimine, mille sensoriks on valgustakisti. LED-ide reguleerimine on võrdeline keskkonna valgustusega, mis tähendab, et kui näiteks paistab

päike, siis lülituvad LED-id välja ja samas kui väljas läheb pilve, siis on valgustus intensiivsem. Sedasi tagatakse optimaalne energiatarve ja samas piisav valgustus akvaariumile, mis aitab taimedel paremini fotosünteesida. Ööseks lülituvad LED-id välja, kuna taimedele ja kaladele on oluline naturaalne ööpäevatsükkel.



Joonis 6.1 Akvaariumisüsteemi programmi tööalgoritm

Seadmega suhtlemiseks on kaks nuppu: menüü-nupp (trükkplaadil SW2) ja valiku-nupp (SW3), mille abil on võimalik reguleerida süsteemi tööd ning saada ka teavet. Kui peatsükli ajal vajutada menüü-nuppu, siis siseneb programm alamtsükklisse, kus on võimalik valida valiku-nupuga kellaaja seadistamise, LED valgustuse kellaaja seadistamise ja viimaste näitude kuvamise vahel. Kellaegade seadistamiseks kasutatakse valiku-nuppu, millega seadistatakse soovitud parameetri suurus ja menüü-nuppu, millega kinnitatakse see ja valitakse järgmine. Viimaste näitude kuvamisel on võimalik valiku-nupuga uurida iga 4h tagant salvestatud andmeid. Menüüst väljumiseks on vastav valik, mis viib programmi tagasi peatsükklisse.

Põhiprogramm kujunes suhteliselt mahukaks¹⁴. Lisaks põhiprogrammile kasutati ka mitmeid lisateeke, et lihtsustada ja kiirendada tarkvara arendamist. Näiteks on eelnevalt olemas juba LCD teek, mis võimaldab juhtida LCD ekraani väga lihtsalt. Samas on ka ametlikud põhiteegid, mis lihtsustavad ARM Cortex M0 mikrokontrolleri programmeerimist märgatavalt. Siiski on võimalik ka mikrokontrolleri andmelehe abil programmeerida ainult muutes vastavate registre bitte.

Kokkuvõtteks saadi töötav tarkvaralahendus, mis täitis kõik eeldatud ülesanded. Siiski on antud tarkvara suhteliselt algeline ning tulevikus võiks kaaluda selle täiendamist ja efektiivsemaks muutmist.

¹⁴ Põhiprogrammi pikkuseks kujunes ca 1000 rida, arvestamata lisateeke

7. Edasiarendamise võimalused

Kuigi lõputöö käigus koostatud süsteem töötab kui tervik, ei ole see kindlasti täiuslik, kuna prioriteet oli ehitada süsteem, mis lihtsustaks just vee parameetrite mõõtmist ning hoolitseks ka valgustuse eest. Antud süsteem on võimeline jälgima vee parameetreid, juhib valgustust vastavalt keskkonna valgustusele ja kellajale ning on sõltumatu võrgupinge olemasolust teatud piirides. Siiski kodukasutaja aspektist vaadates võiks antud süsteemi täiendada mitmete lisafunktsioonidega, et lihtsustada veelgi akvaariumipidamist

Esiteks oleks kindlasti vajalik automatiseeritud söötmine. See oleks kõige kasulikum kiire elutempoga inimestele, kes reisivad palju. Kuigi alati on võimalus kalade söötmine kellegi tuttava hooleks jätta, võib see pikapeale muutuda tülikaks ning siis on hea kui see oleks ka akvaariumisüsteemi integreeritud. Söötismehhanismi lisamine ei tohiks väga raske olla, kuna on olemas mikrokontroller koos kasutajaliidesega, mida on võimalik programmeerida ükskõik milleks. Kõige lihtsam viis oleks lisada mootoriga juhitud või solenoidiga luuk, mis avaneks eelprogrammeeritud ajavahemiku tagant. Kuigi on olemas ka automaatsöötja masinad tuntud firmade poolt nagu Eheim või JBL, siis autor leiab, et antud süsteemi puhul on lihtsam lisada oma lahendus.

Kuigi toimub vee temperatuuri mõõtmine, ei ole hetkel selle reguleerimist. See oleks järgmine aspekt, kus võiks süsteemi edasi arendada. Toatemperatuur võib kõikuda väga palju, eriti kevadel ja sügisel, kuid paljud kalad on väga temperatuuritundlikud. Vee soojendamine hoiaks vee temperatuuri stabiilsena, mis tähendaks vähem kohustusi kalapidajale. Siiski pole see nii kriitiline täiendus, kuna on olemas ja täisautomaatsed vee soojenduspulgad, mis reguleerivad vee temperatuur vastavalt vajadusele.

Väga teretulnud uuendus antud süsteemile oleks ka korralik vees lahustunud kogulämmastiku (TAN) ja hapnikumõõtja. See võimaldaks hoida lämmastikutsükklit kontrolli all ning sedasi vähendada kalade stressi, haigusi ja surmasid. Kahjuks on aga antud mõõteseadet väga kallis ning hetkel ei tasu veel kodukasutajale ära.

Kui tegemist on suurema akvaariumiga, siis võib olla probleemiks ka veetase akvaariumis ja iseeneslik aurumine (väiksemas akvaariumis pole see probleem, kuna seal vahetatakse vett tihti). Veetaseme mõõtmiseks on olemas kõige lihtsam kahe erineva pikkusega metallist vardaga seade, mis annab märku kui veetase langeb teatud punktist madalamale. Antud lahendus ei ole ideaalne, kuna see eeldab, et vesi on pinge all, mis ei ole

just kõige ohutum. Parem oleks kasutada optilist andurit, mis mõõdaks veepinna kõrgust. See ei segaks kalade elu, oleks ohutum ning ka täpsem.

Kindlasti oleks oluline ka vee kareduse mõõtmise, mis annaks aimu vee olukorrast. Vee kareduse hindamine on oluline, kuna suurem osa kalu eelistavad pehmet vett ning tihti tuleb kraanivette lisada kunstlike vee pehmedajaid, kuna vesi on liiga mineraalirikas, mis teeb selle karedaks ja kaladele ebasobivaks elukeskkonnaks.

Kuna on interneti ja nutitelefonide ajastu, siis võiks ka süsteemile lisada liidese, millega oleks võimalik hoida akvaariumil silma peal ka nutitelefoni või interneti kaudu. See oleks teostatav näiteks XBee juhtmevaba mooduliga. Kui vee parameetrid muutuvad kriitiliseks, saaks süsteem teavitada kasutajat sõnumi teel. Kuna aga XBee moodulid on suhteliselt kallid, siis antud rakendus eeldaks suuremat investeringut.

Kuigi antud süsteem töötab juba praegugi kui tervik ja aitab akvaariumipidajal olla kursis akvaariumivee seisundiga, siis nagu näha, on arenemisruumi palju. Siiski kui arvestada, et antud lõputöö raames projekteeritud süsteem on suunatud pigem kodukasutajale või algajale akvaariumipidajale, siis võib määravaks saada maksumus. Lisafunktsioonid teevad küll süsteemi täiuslikumaks kuid tõstavad ka toote lõpphinda, mis ei pruugi olla just kõige mõistlikum samm.

8. Majanduslik ülevaade

Kuna kõik ressursid on piiratud, siis on oluline disainida tooteid pidades silmas, et lõpptoodet oleks võimalikult odav toota. Antud akvaariumisüsteemi disainimise käigus üritati teha nii lihtne süsteem kui vähegi võimalik, minimeerides vajaminevate komponentide arvu. Vaatamata sellele on tegemist suhteliselt keeruka süsteemiga ning tahes tahtmata sõltub kvaliteet ka kasutatavatest komponentidest. Antud peatükk annab lõputöö käigus tehtud akvaariumisüsteemile majandusliku ülevaate ning antakse hinnang ka seadme lõplikule maksumusele.

Seadme maksumus sõltub lisaks komponentide valikule ka toodetavast hulgast. Alati on mõistlik toota suuremas koguses, kuna siis on ka komponendid soodsamad ning trükkplaatide lõpphind tuleb odavam. Antud projektis eelistati komponentide valikul pindmontaaži nii palju kui vähegi võimalik, kuna SMD komponendid on soodsamad ning kui tulevikus on vaja toota suuremas koguses, siis SMD komponentide ladumine on odavam ja kiirem tänu Pick-and-Place masinatele. SMD komponentide teiseks eeliseks on ka see, et pole vaja auke puurida, mis tõstab korralikult trükkplaadi tootmishinda. Täielik projektis kasutatud komponentide nimekiri on lisa 6.

Lisa 6 toodud tabelis on antud komponentide kirjeldused, kogused, tootjakoodid ning ka hinnad. Suurem osa komponente soetati elektroonikapoodidest Farnell ja Oomipood. Antud tabelis olevad hinnad põhinevad eelmainitud poodide hinnakirjadel ning sisaldavad käibemaksu. Elektroonikakomponentide lõpphinnaks kujunes 72,42€, kusjuures osa komponente leiti ka vanadest elektroonikaseadmetest, hoides sedasi kokku 9,68€. Kuigi see pole oluline masstoodangu puhul, siis see võimaldas ehitada esimese prototüübi veidi soodsamalt, hoides kokku ressursse ning taaskasutades terveid komponente. Tabelis on märgitud leitud komponendid sümboliga „y“ viimases veerus „Vana“.

Kuna antud toode projekteeriti eesmärgiga autori koduseks kasutamiseks, telliti trükkplaadid väikeses koguses ettevõttest Kamitra. Paneeli maksumuseks kujunes 154,67€. Kuna paneelis on kaks trükkplaadi paari¹⁵, siis ühe trükkplaadi paari hinnaks kujunes 77,33€. Antud summa on põhjendatav sellega, et hetkel oli tegemist esimese prototüübiga ning sellepärast on ka hind kallim, kuna pole vajadust tellida suures koguses.

¹⁵ Ühes paneelis on kaks LED valgustuse trükkplaati ja kaks põhitrükkplaati

Lisaks tuli veel soetada pH-elektrood, milleks valiti Extech Standard pH-andur [45], mis maksis Ronexi kaudu tellides 47,45€ [46]. Kahjuks moodustab see ligi kolmandiku kogu projekti hinnast, aga leiti, et see on õigustatud, kuna pH-andurid on üldiselt keerukad seadmed ja suhteliselt kallid.

Kokkuvõtteks kujunes toote esimese prototüübi omahinnaks 197,2€, mis tuleb tunnistada on suhteliselt suur summa võrreldes näiteks 99€ Seneye lahendusega [3]. Siiski moodustab suurem osa kuludest pH-elektrood ja asjaolu, et hetkel oli tegemist väiksesemahulise prototüübi tellimusega. Eeldades, et reaalsel tootmisel on tegemist suuremate mahtudega, mis teeb trükkplaatide tegemise soodsamaks, siis võib arvata, et toote hinnaks võiks kujuneda ca 120€ (ilma pH andurita ca 80€).

Kokkuvõte

Tänapäeval on paljudel inimestel kodus akvaarium. Ilus ja hoolitsetud akvaarium loob ruumis meeldiva atmosfääri. Akvaariumipidamine on lihtne, kuid siiski on vaja jälgida pidevalt erinevaid vee parameetreid, et tagada kaladele sobiv elukeskkond. Selle lihtsustamiseks on loodud mitmeid akvaariumisüsteeme, kuid need on suhteliselt keerukad ja kallid ning pigem suunatud kommertskasutusalaadele kui kodukasutajatele. Seoses sellega oli antud lõputöö eesmärgiks projekteerida ja realiseerida lihtne, energiasäästlik koduakvaariumi jälgimissüsteem.

Lõputöö käigus disainiti STM32F0 mikrokontrolleril põhinev akvaariumisüsteem, mis mõõdab ja kuvab tähtsamaid vee parameetreid nagu näiteks temperatuur, pH ja arvutab ka mitteioniseeritud lämmastiku osa, mida saab kasutada lämmastikuhulga hindamisel. Lisaks disainiti ka akvaariumivalgustuslahendus LEDide baasil, mida juhitakse automaatselt vastavalt ruumi valgustasemele ja kellajale. Valgustuse disainimisel lähtuti taimedele sobivast spektrist, et tagada stabiilne taimede kasv ning ära hoida võimalike vetikate vohamist. Kasutajasõbralik menüüsüsteem võimaldab uurida veeparameetrite ajalugu ning seadistada LED valgustuse tööaega.

Antud seade on töökindel ja ei sõltu võrgupinge olemasolust, kuna disainitud süsteem on kahetoimeline. Üheelemendilise Li-ion akuga peab süsteem vastu kuni 58h. Siiski eeldab LED valgustus ja pH mõõtmine võrgupinge olemasolu. Seadme voolutarve akutoitel on minimaalne – kõigest 38mA, mis teeb selle suhteliselt energiasäästlikuks.

Kuigi lõputöö eesmärk sai täidetud ning antud süsteem on töötab väga hästi, on kindlasti ruumi edasiarendusteks. Kindlasti tasuks ära automaatse söötmismehhanismi lisamine, mis hoolitseks kalade eest ka siis, kui inimene ei saa teatud perioodil kodus viibida. Lisaks on kindlasti teretulnud ka akvaariumilahenduse integreerimine nutiseadmetega, mis teavitaks kasutajat probleemi tekkimisel võimalikult kiiresti.

Võib väita, et antud jälgimissüsteemi lihtsustab kindlasti akvaariumipidamist ning pikemas perspektiivis hoiab ära algaja akvaariumipidaja probleemidest, mis säästab nii aega ja raha. Ilus akvaarium elutoas pakub meeldivat silmailu pikemaks ajaks nii endale kui ka teistele.

Viidatud allikad

- [1] "Features - Puratek Puratek." [Online]. Available: <http://puratek.com/products/insight-monitor-controller/features>. [Accessed: 15-Dec-2014].
- [2] "Insight Starter Packages - Puratek Puratek." [Online]. Available: <http://puratek.com/insight-247/insight-starter-packages>. [Accessed: 16-Dec-2014].
- [3] "seneye Home - the secret for becoming a expert fish keeper - seneye." [Online]. Available: <http://www.seneye.com/store/devices/seneye-home-device.html>. [Accessed: 16-Dec-2014].
- [4] "Accessories - Puratek Puratek." [Online]. Available: <http://puratek.com/products/insight-monitor-controller/accessories>. [Accessed: 16-Dec-2014].
- [5] E. Schneider, "All about aquariums," 1982.
- [6] "Guppy Tank Conditions: The Ideal Water Parameters for Your Guppies - Guppy Fish Care." [Online]. Available: <http://guppyfishcare.com/guppy-tank-conditions-the-ideal-water-parameters-for-your-guppy/>. [Accessed: 07-Dec-2014].
- [7] "Processors - ARM." [Online]. Available: <http://www.arm.com/products/processors/index.php>. [Accessed: 17-Dec-2014].
- [8] "Cortex-M0 Processor - ARM." [Online]. Available: <http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-m0.php>. [Accessed: 03-Apr-2015].
- [9] STMicroelectronics, "STM32F051xx Datasheet," 2014. [Online]. Available: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/reference_manual/DM00031936.pdf. [Accessed: 03-Apr-2015].
- [10] STMicroelectronics, "STM32F051-Discovery User Manual," 2012. [Online]. Available: http://www.element14.com/community/servlet/JiveServlet/previewBody/54979-102-1-275023/STM.User_Manual_2.pdf. [Accessed: 03-Apr-2015].
- [11] "Aquarium Lighting Information Guide | Reef & Planted | PAR PUR." [Online]. Available: http://www.americanaquariumproducts.com/aquarium_lighting.html. [Accessed: 03-Feb-2015].
- [12] Philips, "LUXEON Rebel PLUS," 2014. [Online]. Available: <http://www.lumileds.com/uploads/380/DS107-pdf>. [Accessed: 07-Apr-2015].

- [13] "pH electrode construction." [Online]. Available: <http://www.ph-meter.info/pH-electrode-construction>. [Accessed: 07-Apr-2015].
- [14] "The Nernst Equation." [Online]. Available: <http://www.all-about-ph.com/nernst-equation.html>. [Accessed: 07-Apr-2015].
- [15] "OMEGA ENGINEERING - Electrode Basics." [Online]. Available: <http://www.omega.com/techref/ph-3.html>. [Accessed: 07-Apr-2015].
- [16] "Ronex OÜ E-pood - Mõõteriistad ja valveseadmed » Mõõteriistad » pH-meetrid »." [Online]. Available: http://www.ronex.ee/Tootekataloog/pH-meetrid/ph_meeter_ph100. [Accessed: 16-Apr-2015].
- [17] "Ronex OÜ E-pood - Mõõteriistad ja valveseadmed » pH-meeter-juhtivusmõõtja-termomeeter-loger (Delta Ohm) » Mõõteriistad » pH-meetrid »." [Online]. Available: http://www.ronex.ee/Tootekataloog/pH-meetrid/ph_meeter_juhtivusmootja_termomeeter_logerbr_delta_ohm__hd21562. [Accessed: 16-Apr-2015].
- [18] "The Nitrogen Cycle - Article at The Age of Aquariums - Tropical Fish." [Online]. Available: http://www.aquahobby.com/articles/e_ciclo.php. [Accessed: 17-Apr-2015].
- [19] Y. M. Chung, Z. A. Halim, and R. Raffay, "Un-ionized ammonia detection system for water quality monitoring," in *Applied Electromagnetics (APACE), 2012 IEEE Asia-Pacific Conference on*, 2012, pp. 274–279.
- [20] R. Francis-Floyd, C. Watson, D. Petty, and D. B. Pouder, "Ammonia in Aquatic Systems," 05-Jul-2012. [Online]. Available: <http://edis.ifas.ufl.edu/fa031>. [Accessed: 17-Apr-2015].
- [21] "Filtration | Aquarium Basics | Tropical Fish Hobbyist Magazine." [Online]. Available: <http://www.tfhmagazine.com/aquarium-basics/filtration.htm>. [Accessed: 18-Apr-2015].
- [22] Maxim Integrated, "DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer," *System*, vol. 92, pp. 1–22, 2008.
- [23] Hitachi, "Hd44780u Datasheet." [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>. [Accessed: 15-Apr-2015].
- [24] Diodes, "AP8801 Datasheet," 2012. [Online]. Available: <http://www.diodes.com/datasheets/AP8801.pdf>. [Accessed: 28-Apr-2015].
- [25] ON Semiconductor, "Effects of High Switching Frequency on Buck Regulators." [Online]. Available: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/TND388-D.PDF. [Accessed: 28-Apr-2015].

- [26] Bourns, "Bourns® TVS Chip Diodes Datasheet." [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1695388.pdf>. [Accessed: 29-Apr-2015].
- [27] TI, "LM340/LM78XX Series 3-Terminal Positive Regulators datasheet." [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1888853.pdf>. [Accessed: 29-Apr-2015].
- [28] Microchip, "Miniature Single-Cell, Fully Integrated Li-Ion, Li-Polymer Charge Management Controllers." [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/630369.pdf>. [Accessed: 29-Apr-2015].
- [29] ROHM Semiconductor, "BUxxTD3WG Series Datasheet." [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1747256.pdf>. [Accessed: 29-Apr-2015].
- [30] Maxim, "How to Design an Efficient DC-DC Converter Using the DS1875 PWM Controller - Application Note - Maxim - AN4332.pdf." [Online]. Available: <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN4332.pdf>. [Accessed: 07-May-2015].
- [31] Linear Techonolgy, "AN19 - LT1070 Design Manual, Principles of Boost Converter." [Online]. Available: <http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an19fc.pdf>. [Accessed: 29-Apr-2015].
- [32] Daycounter, "Boost Switching Converter Design Equations." [Online]. Available: <http://www.daycounter.com/LabBook/BoostConverter/Boost-Converter-Equations.phtml>. [Accessed: 07-May-2015].
- [33] Steven W. Smith, "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing." [Online]. Available: <http://www.dspguide.com/ch13/4.htm>. [Accessed: 29-Apr-2015].
- [34] NEC/Tokin, "NEC/Tokin Supercapacitor Datasheet." [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1754672.pdf>. [Accessed: 29-Apr-2015].
- [35] Maxim Integrated, "Estimating Super Capacitor Backup Time on Trickle-Charger Real-Time Clocks - Application Note - Maxim." [Online]. Available: <http://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3517>. [Accessed: 29-Apr-2015].
- [36] 66pacific.com, "Schematic for ph Measurement & Control Circuit." [Online]. Available: <http://www.66pacific.com/ph/phschematic.htm>. [Accessed: 30-Apr-2015].
- [37] 66pacific.com, "pH Measurement & Control Circuit - Intro and Getting Started." [Online]. Available: http://www.66pacific.com/ph/ph_1.htm. [Accessed: 30-Apr-2015].
- [38] TI, "LM117/LM317A/LM317-N 3-Terminal Adjustable Regulator." [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1882329.pdf>. [Accessed: 30-Apr-2015].
- [39] TI, "LP4950C-5V and LP4951C Adjustable Micropower Voltage Regulators." [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1862587.pdf>. [Accessed: 30-Apr-2015].

- [40] STMicroelectronics, "Getting started with STM32F0x1/x2/x8 hardware development." [Online]. Available: http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application_note/DM00051986.pdf. [Accessed: 04-May-2015].
- [41] "Serial Wire Debug - ARM." [Online]. Available: <http://www.arm.com/products/serial-wire-debug.php>. [Accessed: 04-May-2015].
- [42] Kamitra, "Kamitra » Trükkplaadid » Nõuanded." [Online]. Available: <http://www.kamitra.ee/nouanded/>. [Accessed: 07-May-2015].
- [43] A. Kasemaa, "SPICE simulatsioonid PCB õppematerjal." [Online]. Available: http://www.ttu.ee/public/i/infotehnoloogia-teaduskond/Instituudid/Elektronikainstituut/Loengud/SPICESimulatsioonid_PCB.pdf. [Accessed: 15-May-2015].
- [44] "Keil Evaluation Software Limitations." [Online]. Available: <http://www.keil.com/demo/limits.asp>. [Accessed: 15-May-2015].
- [45] "601500 - Standard pH Electrode (12 x 160mm)." [Online]. Available: <http://www.extech.com/instruments/product.asp?catid=73&prodid=469>. [Accessed: 07-Apr-2015].
- [46] "Ronex OÜ E-pood » 601500 : pH andur , üldkasutatav (standard) : 0...14 pH ; diam.12,5 x 155mm (Extech)." [Online]. Available: <http://www.ronex.ee/Tootekataloog/pH-meetrid/EX601500>. [Accessed: 05-May-2015].
- [47] K. Emerson, R. C. Russo, R. E. Lund, and R. V Thurston, "Aqueous Ammonia Equilibrium Calculations: Effect of pH and Temperature," *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, vol. 32, no. 12. pp. 2379–2383, 1975.

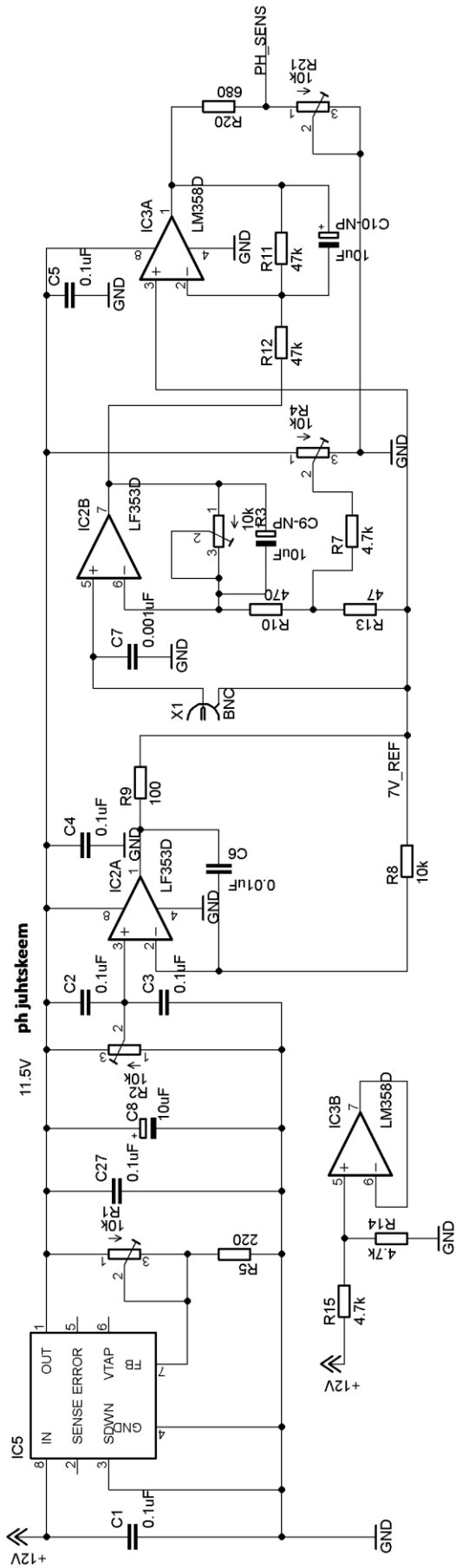
Lisad

Lisa 1. Vees lahustunud NH₃ osakaal kogu ammoniaagist

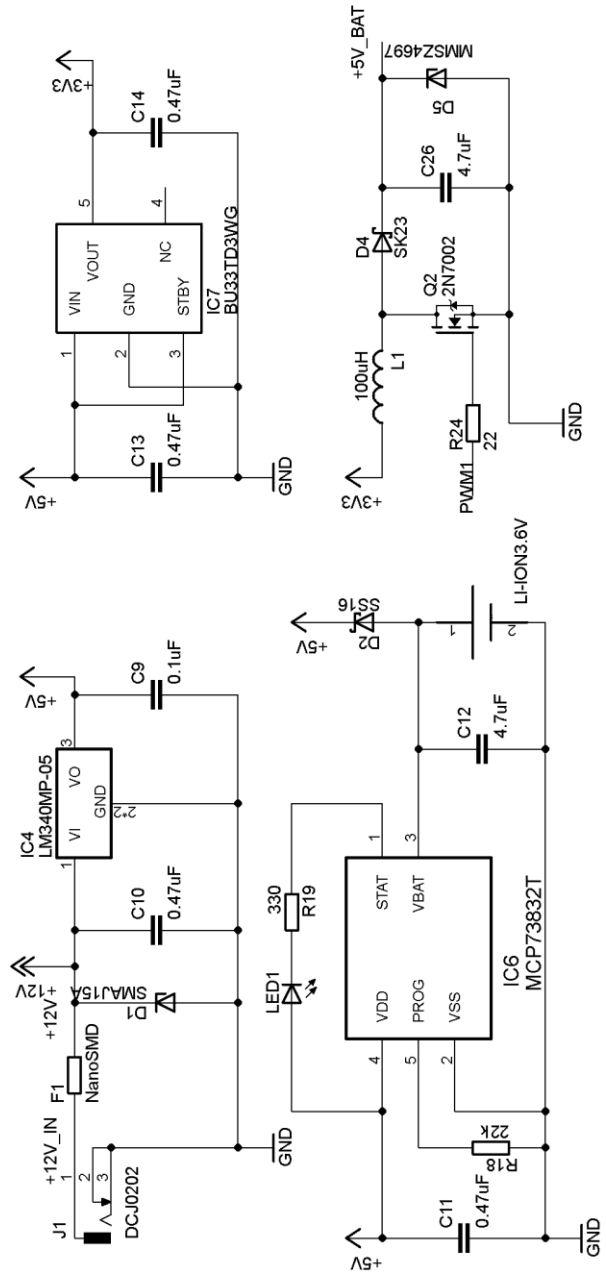
Temp (°C)	pH								
	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
0	0,0000827	0,000261	0,000826	0,00261	0,0082	0,0255	0,0764	0,207	0,453
1	0,0000899	0,000284	0,000898	0,00284	0,00891	0,0277	0,0825	0,221	0,453
2	0,0000977	0,000309	0,000977	0,00308	0,00968	0,03	0,089	0,236	0,494
3	0,000106	0,000336	0,00106	0,00335	0,0105	0,0325	0,096	0,251	0,515
4	0,000115	0,000364	0,00115	0,00363	0,0114	0,0352	0,103	0,267	0,535
5	0,000125	0,000395	0,00125	0,00394	0,0123	0,038	0,111	0,283	0,556
6	0,000136	0,000429	0,00135	0,00427	0,0134	0,0411	0,119	0,3	0,576
7	0,000147	0,000464	0,00147	0,00462	0,0145	0,0444	0,128	0,317	0,596
8	0,000159	0,000503	0,00159	0,00501	0,0157	0,0479	0,137	0,335	0,614
9	0,000172	0,000544	0,00172	0,00542	0,0169	0,0516	0,147	0,353	0,633
10	0,000186	0,000589	0,00186	0,00586	0,0183	0,0556	0,157	0,371	0,651
11	0,000201	0,000637	0,00201	0,00633	0,0197	0,0599	0,168	0,389	0,668
12	0,00218	0,000688	0,00217	0,00684	0,0213	0,0644	0,179	0,408	0,685
13	0,000235	0,000743	0,00235	0,00738	0,023	0,0692	0,19	0,426	0,702
14	0,000254	0,000802	0,00253	0,00796	0,0248	0,0743	0,202	0,444	0,717
15	0,000274	0,000865	0,00273	0,00859	0,0267	0,0797	0,215	0,464	0,733
16	0,000295	0,000933	0,00294	0,00925	0,0287	0,0954	0,228	0,483	0,747
17	0,000318	0,00101	0,00317	0,00996	0,0308	0,0914	0,241	0,502	0,761
18	0,000343	0,00108	0,00342	0,0107	0,0331	0,0978	0,255	0,52	0,774
19	0,000364	0,00117	0,00368	0,0115	0,0356	0,105	0,27	0,539	0,787
20	0,000397	0,00125	0,00396	0,0124	0,0382	0,112	0,284	0,557	0,799
21	0,000427	0,00135	0,00425	0,0133	0,041	0,119	0,299	0,575	0,81
22	0,000459	0,00145	0,00457	0,0143	0,0439	0,127	0,315	0,592	0,821
23	0,000493	0,00156	0,00491	0,0154	0,047	0,135	0,33	0,609	0,832
24	0,00053	0,00167	0,00527	0,0165	0,0503	0,144	0,346	0,626	0,841
25	0,000569	0,0018	0,00566	0,0177	0,0538	0,153	0,363	0,643	0,851
26	0,00061	0,00193	0,00607	0,0189	0,0575	0,162	0,379	0,659	0,859
27	0,000654	0,00207	0,00651	0,0203	0,0615	0,172	0,396	0,674	0,868
28	0,000701	0,00221	0,00697	0,0217	0,0656	0,182	0,412	0,689	0,875
29	0,000752	0,00237	0,00747	0,0232	0,07	0,192	0,429	0,704	0,883
30	0,00805	0,00254	0,00799	0,0248	0,0746	0,203	0,446	0,718	0,89
32	-	-	0,0095	-	0,0877	-	0,49	-	0,906

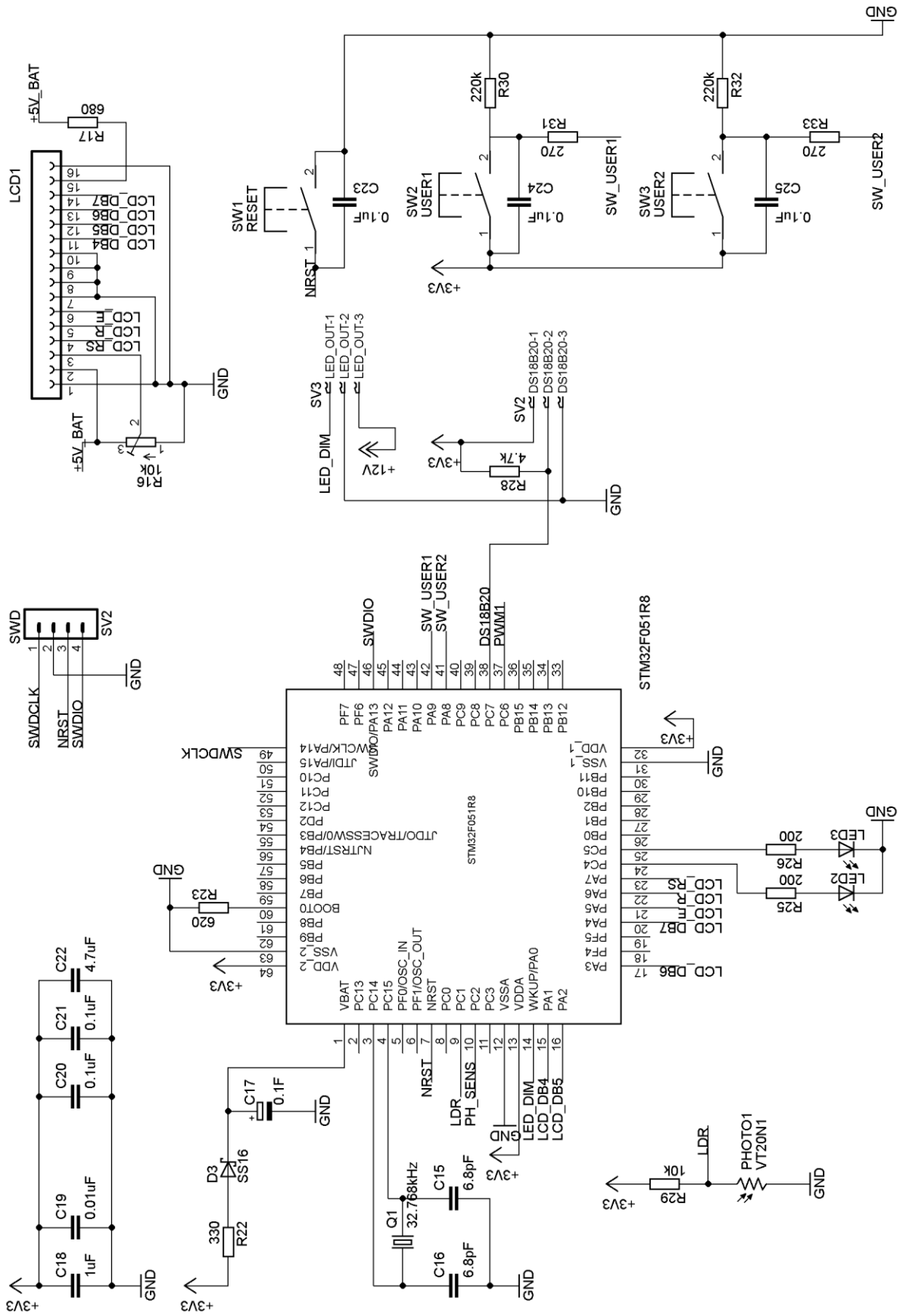
Allikas: [47]

Lisa 2. Elektriskeemid

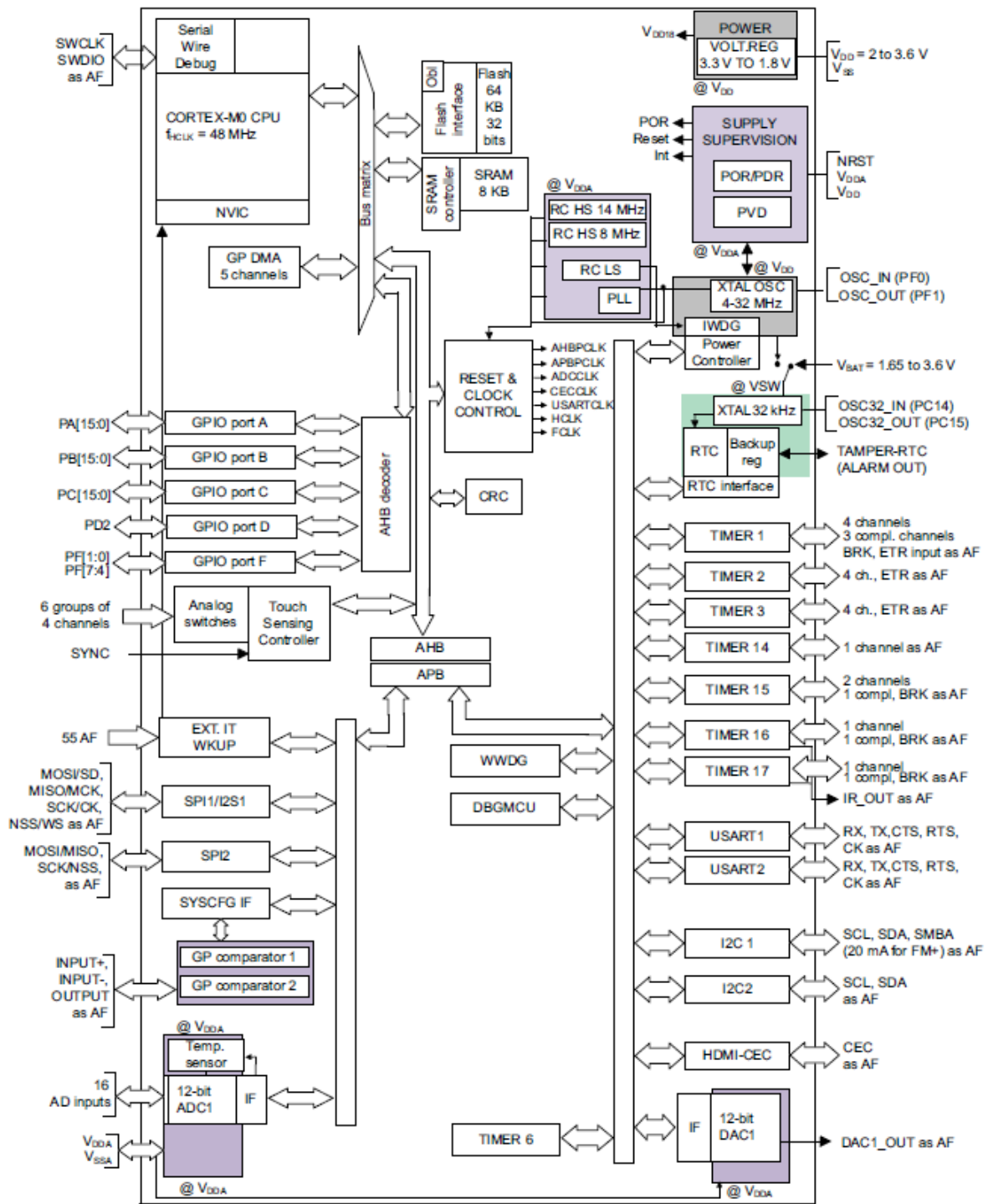


Toiteplokk





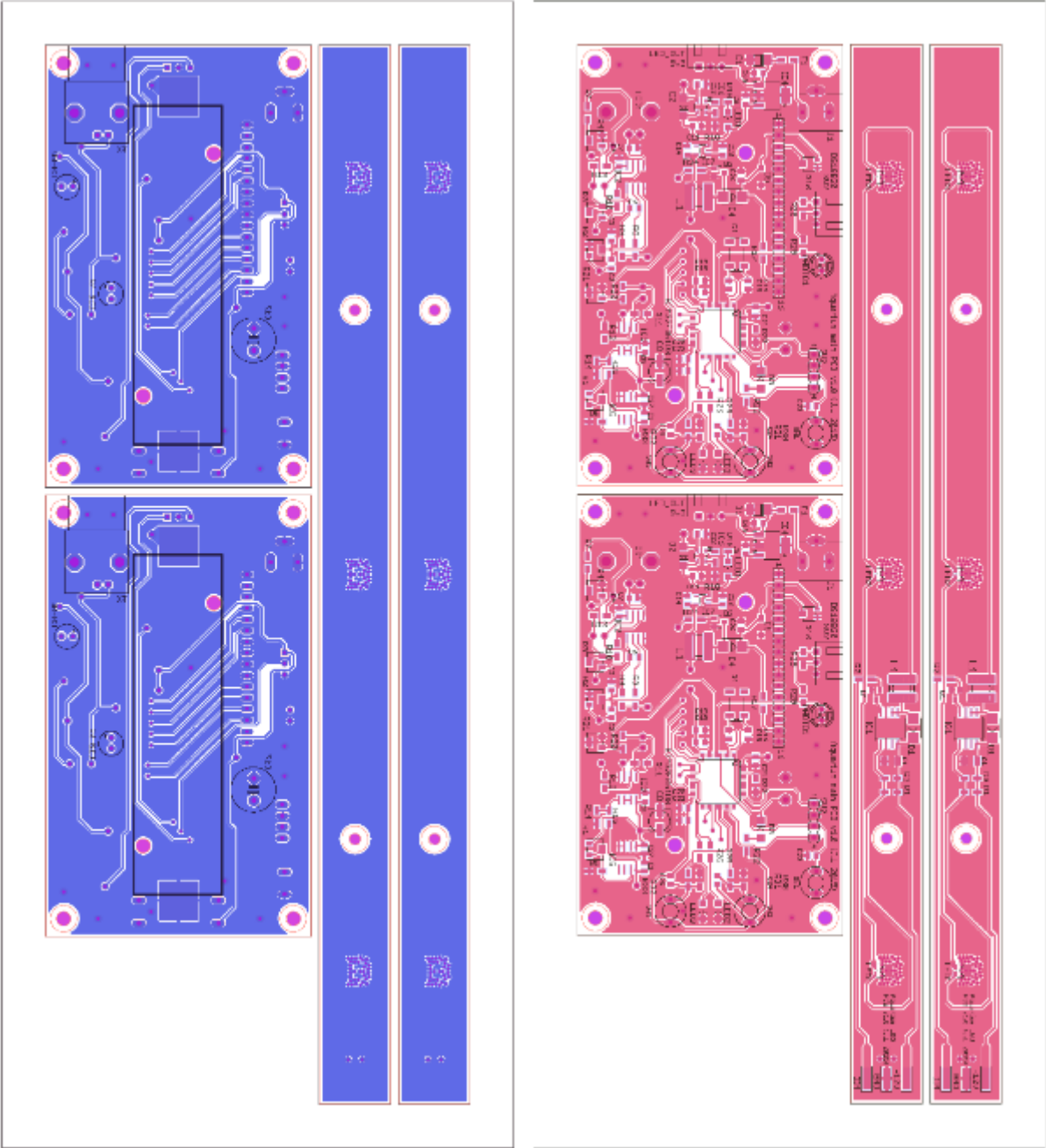
Lisa 3. Mikrokontrolleri STM32F051xx ülevaade



MSv19315V6

Allikas: [9]

Lisa 4. Trükkplaadid



Sinine – alumine vasekiht, punane – pealmine vasekiht

Lisa 5. Akvaariumi jälgimissüsteemi realisatsioon



Juhtmoodul kuvamas vee temperatuuri ja pH-d



Valmis LED valgustuse trükkplaat



Koduakvaarium koos jälgimissüsteemiga

Lisa 6. Komponentide nimekiri

Sümbol	Korpus	Kirjeldus, tootja kood	Tootja	Kogus	Hind (1tk) [€]	Summa [€]	Vana
LED valgustus							
IC1	8SOP	AP8801 500mA LED driver, AP8801SG-13	Diodes Inc	1	1,36	1,36	
LED1, LED3	4530	Luxeon Rebel LED 3000K, LX18-P130-3	LUMILEDS	2	2,92	5,83	
LED2	4530	Luxeon Rebel LED 5000K, LX18-P130-3	LUMILEDS	1	2,92	2,92	
D1	SMB	SK23 Schottky diood	Diotec Semic.	1	0,54	0,54	y
Q1	SO23	NPN transistor, BC847	NXP	1	0,02	0,02	y
R2	1206	Takisti 33kΩ, MCHP06W2F3302T5E	Multicomp	1	0,06	0,06	
R1,R3	1206	Takisti 1Ω, MC0125W120611R0	Multicomp	2	0,04	0,08	y
C1	1206	Kondensaator 2,2μF X7R, GRM31CR71H225KA88L	Murata	1	0,20	0,20	
L1	5x5mm	Induktor 100μH, MSS5121-104MLB	Coilcraft	1	1,46	1,46	
Põhimoodul							
IC2	SOIC	LF353D JFET Op-amp, LF353D	TI	1	0,83	0,83	y
IC3	SOIC	LM358D Op-amp, LM358D	TI	1	0,48	0,48	y
IC4	SOT-223	LM340 5V regulaator, LM340MP-5.0/NOPB	TI	1	1,26	1,26	
IC5	SOIC	LP4951C LDO, LP4951CM	TI	1	0,64	0,64	
IC6	SOT-23	MCP73832T Li-Ion laadija	Microchip	1	0,66	0,66	
IC7	SSOP	BU33TD3WG 3,3V LDO	ROHM	1	0,25	0,25	
D1	SMA	SMAJ15A TVS 15V 400W	Bourns	1	0,16	0,16	
D2,D3	SMB	SK16 Schottky diood, SK16B	Taiwan Semic.	2	0,30	0,60	y
D4	SMB	SK23 Schottky diood	Diotec Semic.	1	0,54	0,54	y
D5	SOD-123	MMSZ4697 Zener 10V, MMSZ4697T1G	ON Semic.	1	0,08	0,08	y
F1	1206	NanoSMD kaitse, NANOSMDC050F/13.2-2	TE	1	0,67	0,67	
STM32F051R8	LQFP64	STM32F0 Cortex-M0 MCU, STM32F051R8T6	STM	1	5,22	5,22	
LCD	16x1	Pesa 16x1 2,54mm, CES-116-01-T-S	SAMTEC	1	2,34	2,34	
SV2	4x1	Pistik 4x1 2,54mm, TLW-104-05-G-S	SAMTEC	1	1,01	1,01	y
SW1,SW2,SW3	Round	Mikrolüliti	-	3	0,25	0,75	y
X1	BNC	BNC pesa PCB-le, 1-1634622-0	TE	1	1,68	1,68	
J1	-	DC toitepesa, RAPC712X	Switchcraft	1	0,85	0,85	y
L1	5x5mm	Induktor 100μH, MSS5121-104MLB	Coilcraft	1	1,46	1,46	
LCD	16x2	LCD alphanumeric 16x2, MC21605C6W-BNMLW	Midas	1	8,50	8,50	
LED1,LED2,LED3	1206	SMD LED punane 15mcd, KPT-3216EC	Kingbright	3	0,10	0,31	
DS18B20, LED_OUT	3x1	JST pesa 3x1 PCB-le, S3B-XH-A (LF)(SN)	JST	2	0,17	0,34	

PHOTO1	TO46	Fototakisti 200kΩ, VT90N1	Excelitas Tech	1	2,41	2,41	y
DS18B20	TO92	DS18B20 temp andur	Maxim	1	3,00	3,00	
-	18650	Li-ion aku 2200mAh 3,6V	Samsung	1	3,80	3,80	
Li-ion 3,6V	SMT	Akupesa 18650 akule, KEYS1042	Keystone	1	2,86	2,86	
Q1	MC-306	32,768kHz kvartsresonaator, Q13MC30610006	Epson	1	1,60	1,60	
Q2	SOT-23	N-MOSFET 2N7002	NXP	1	0,03	0,03	y
R1,R2,R3,R4,R21	3214W	Trimmer pot. 10kΩ 5-turn, 3214W-1-103E	Bourns	5	2,42	12,12	
R16	3mm	Trimmer pot. 10kΩ 1-turn, TC33X-2-103E	Bourns	1	0,36	0,36	y
R5	1206	Takisti 220Ω SMD, MC0063W06035220R	Multicomp	1	0,05	0,05	y
R30,R32	1206	Takisti 220kΩ SMD, MC0063W06035220K	Multicomp	2	0,06	0,12	
R7,R14,R15, R18,R28	1206	Takisti 4,7kΩ SMD, MCPWR06FTEO4701	Multicomp	5	0,09	0,46	y
R8,R29	1206	Takisti 10kΩ SMD, MCMR12X1002FTL	Multicomp	2	0,02	0,03	y
R9	1206	Takisti 100Ω SMD, CR1206-FX-1000ELF	Bourns	1	0,04	0,04	y
R10	1206	Takisti 470Ω SMD, CR1206-JW-471ELF	Bourns	1	0,02	0,02	y
R11,R12	1206	Takisti 47kΩ SMD, ERJ8ENF4702V	Panasonic	2	0,03	0,07	y
R13	1206	Takisti 47Ω SMD, ERJ8GEYJ470V	Panasonic	1	0,03	0,03	
R25,R26	1206	Takisti 200Ω SMD, ERJ8GEYJ201V	Panasonic	2	0,04	0,08	
R17,R20,R23	1206	Takisti 680Ω SMD,MC0125W12065680R	Multicomp	3	0,02	0,07	
R19,R22	1206	Takisti 330Ω SMD, CR1206-JW-331ELF	Bourns	2	0,02	0,03	y
R24	1206	Takisti 22Ω SMD, ERJPO8F22R0V	Panasonic	1	0,15	0,15	y
R31,R33	1206	Takisti 270Ω SMD, MC0125W12061270R	Multicomp	2	0,04	0,07	y
C17	E5-10,5	Kondensaator 0,1F, elekt., FG0H104ZF	Kemet	1	2,12	2,12	
C8	Radial-Can	Kondensaator 10μF, elekt., UWX1C100MCL1GB	NICHICON	1	0,17	0,17	y
C9-NP, C10-NP	E2,5-6	Kondensaator bipol, 10μF, KEB 10/50P	Panasonic	2	0,10	0,20	
C1-C5,C9,C20,C21,C23- C25, C27	0805	Kondensaator 0,1μF SMD, MC0805B104K500CT	Multicomp	12	0,02	0,20	
C6,C19	0805	Kondensaator 0,01μF SMD, MC0805B103K500CT	Multicomp	2	0,02	0,03	
C7	0805	Kondensaator 0,001μF SMD, MC0805B102K500CT	Multicomp	1	0,02	0,02	
C10,C11,C13,C14	0805	Kondensaator 0,47μF SMD, MC0805B474K250CT	Multicomp	4	0,05	0,21	
C12,C22,C26	0805	Kondensaator 4,7μF SMD, C0805C475K4PACTU	Kemet	3	0,10	0,31	
C15,C16	0805	Kondensaator 6,8pF SMD, C0805C689C5GACTU	Kemet	2	0,28	0,55	
C18	0805	Kondensaator 1μF SMD, C0805C105K3RACTU	Kemet	1	0,11	0,11	
						Kokku:	72,42
						Säästetud:	9,68