

Antti Jokelainen

Kasvihuoneenohjausjärjestelmä

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Tutkinto: Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma: Elektroniikka
Opinnäytetyö
Päivämäärä: 26.5.2011

Tekijä Otsikko	Antti Jokelainen Kasvihuoneenohjausjärjestelmä
Sivumäärä Aika	43 sivua 26.5.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Elektroniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Elektroniikkasuunnittelu
Ohjaaja	lehtori Janne Mäntykoski
<p>Tämän insinööriyön aiheena oli harrastajakäyttöön soveltuvan kasvihuoneenohjausjärjestelmän suunnittelu ja toteutus. Järjestelmän tarkoituksena on mitata tarvittavia suureita ja säätää säätölaitteita mittaustulosten mukaan. Järjestelmän ei itsessään ole tarkoitus säätää kasvihuoneen suureita, vaan se ohjaa niitä säätäviä laitteita. Järjestelmä antaa hälytyksen raja-arvojen ylittyessä. Lisäksi siinä on datalokiominaisuus, joka tallentaa kaiken järjestelmän mittaaman datan.</p> <p>Idea työhön ja vinkki laitteen tarpeellisuudesta tuli puutarha-alaa opiskelevalta ystävältä, ja tarkempi tarkastelu osoitti, että markkinoilla on laitteita ja järjestelmiä puutarhan automaattiseen ohjaamiseen, mutta tällaiset järjestelmät on tarkoitettu ammattikäyttöön, eivätkä ne hintansa puolesta sovi harrastelijoille. Työssä olikin lähtökohtana suunnitella kattava, helppokäyttöinen laite, jonka hinta olisi harrastajalle sopiva ja jota voisi markkinoida harrastajapuutarhureille.</p> <p>Järjestelmää varten tehtiin pieni tutkimus kasvin tarpeista ja tätä kautta selvitettiin, mitä suureita tulisi mitata ja millä raja-arvoilla. Järjestelmän elektroniikka sisältää niin digitaali- kuin analogiakomponenttejäkin, ja toimintaa ohjaa Atmel AT90USB1287 -mikrokontrolleri.</p> <p>Järjestelmän suunnittelu- ja kehittämissä vaiheissa mikrokontrollerina toimi Teensy++ 2.0 -alustalla toimiva AT90USB1286-mikrokontrolleri, joka eroaa lopullisen version mikrokontrollerista vain kyvyltään toimia USB-isäntälaitteena. Tällä ei järjestelmän kannalta ollut merkitystä. Eri osia, kuten RTC-kelloa, testattiin erillisiä piirilevyjä käyttäen. Erillisesti toteutetut piirilevyt kytkettiin Teensy++ 2.0 -alustaan koekytkentälevyllä. Ohjelmiston ohjelmointikielenä oli C ja ohjelmointialustana AVR Studio/WinAVR.</p>	
Avainsanat	kasvihuone, ohjausjärjestelmä, anturi

Author Title	Antti Jokelainen Greenhouse Controller Unit
Number of Pages Date	43 pages 26 May 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Specialisation option	Electronics Design
Instructor	Janne Mäntykoski, Senior Lecturer
<p>The object of this thesis was to design and manufacture a greenhouse controlling unit that is suitable for a hobbyist. The purpose of the system is to measure all the essential quantities in a greenhouse and to control them. The unit itself doesn't execute any of the adjusting measures, but it controls the devices that do so. The system gives an alarm if any of the limit values are exceeded. In addition, the unit has a data log feature that records all the measured data.</p> <p>The idea for the thesis and a hint for the demand towards this kind of a system came from a friend, who is studying gardening, and a closer look revealed that there are devices and systems for controlling a greenhouse automatically, but these systems are meant for professional use and therefore the prices of these systems make them unappealing or simply out-of-reach for hobbyists. Therefore, the goal of the thesis was to design an all-inclusive system that is easy to use and has a price tag that meets the needs for a hobbyist gardener.</p> <p>A study was made for the system to determine the quantities that should be measured and the tolerances and scales for them. The electronics of the device include digital and analog components and the process is driven by the Atmel AT90USB1287 microcontroller.</p> <p>In the designing and development phase, the microcontroller was an AT90USB1286 microcontroller that was run on a Teensy++ 2.0 board, which differs from the controller of the final version only by its incapability to function as a USB host device. From the unit's point of view this was irrelevant. Different parts of the system, such as RTC clock, were tested by building them in separated PCB's. The separate PCB's were connected to Teensy++ 2.0 board on a breadboard. The software of the system was programmed with C using AVR Studio/WinAVR.</p>	
Keywords	greenhouse, controlling unit, sensor

Sisälllys

Tiivistelmä

Abstract

Sisälllys

1	Johdanto	5
2	Kasvien vaatimukset ja toleranssit	6
2.1	Kasvien rakenne ja toiminta	6
2.2	Kasvun edellytykset ja kasvuun vaikuttavat tekijät	8
2.2.1	Ilma kasvutekijänä	9
2.2.2	Valo kasvutekijänä	11
2.2.3	Kasvualusta kasvutekijänä	13
2.2.4	Vesi ja ravinteet kasvutekijänä	14
3	Mitattavat ja säädettävät suureet	17
3.1	Ilma	17
3.2	Valo	18
3.3	Kasvualusta, vesi ja ravinteet	18
4	Käytetyt tiedonsiirtomenetelmät	19
4.1	I ² C-väylä	19
4.2	SPI-väylä	20
5	Keskusyksikkö	22
5.1	Tasajännitelähde	22
5.2	Mikrokontrolleri	23
5.3	Kello	24
5.4	Valaistuksen ohjaus	25
5.5	Lämpötilan ja kosteuden mittaus ja säätö sekä ilmanvaihdon ohjaus	26
5.6	pH-arvon mittaus	27
5.7	Sähkönjohtavuuden mittaus	30
5.8	Dataloki	32
5.9	Näyttö	33
5.10	Hälytys	33
6	Testaaminen, käytännön ongelmat ja lopullinen toteutus	34
7	Laitteen jatkokehittäminen	38
8	Yhteenveto	40
	Lähteet	42

1 Johdanto

Tämä insinööritoiminta on suunnitelma pienkasvihuoneiden ja sisäpuutarhojen ohjaukseen tarkoitettu järjestelmä. Järjestelmä on suunnattu harrastelijakäyttöön ja yksi suunnittelutavoitteista onkin ollut mahdollisimman edullinen loppuhinta. Markkinoilla on varsin kattavia kasvihuonejärjestelmiä, mutta nämä järjestelmät ovat tarkoitettu ammattilaiskäyttöön, ja näin ollen niiden hinnat ovat harrastelijakäyttäjälle liian korkeat. Idea järjestelmän toteuttamiseen tuli puutarha-alaa opiskelevalta ystävältä ja tarkoituksena on toteuttaa järjestelmästä lopulta harrastelijoille suunnattu kaupallinen versio.

Järjestelmään on integroitu kaikki keskeisten toimintojen kuten valaistuksen, ilmanvaihdon ja kastelun seuranta ja ohjaus. Lähtökohtana oli kehittää mahdollisimman helppokäyttöinen, käyttäjäystävällinen ja kattavasti palveleva laite, jossa olisi kaikki oleellinen, mutta ei kuitenkaan ns. täysin turhia ominaisuuksia. Laite on suunniteltu erilaisia kasvien kasvatusprosesseja silmällä pitäen, mutta koska samoja suureita tarkkaillaan myös akvaariossa ja terraariossa sekä sienten kasvatuksessa, laitetta voidaan soveltaa myös näissä ympäristöissä. Varsinaisten kasvatustoimintojen lisäksi laitteessa on myös dataloki ominaisuus. Myöhemmässä vaiheessa laitteeseen on tarkoitus lisätä GSM-hälytys- ja etäohjausjärjestelmä.

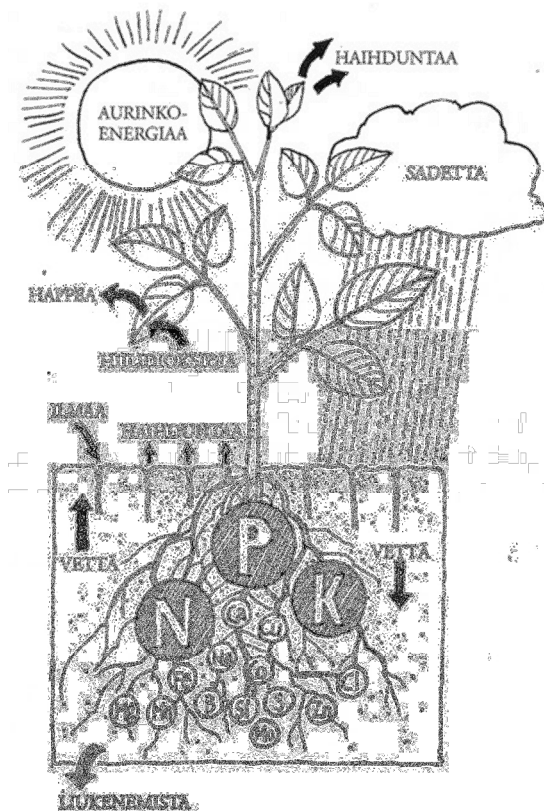
2 Kasvien vaatimukset ja toleranssit

2.1 Kasvien rakenne ja toiminta

Kasvien elinkaari voidaan jakaa useampaan eri vaiheeseen: itäminen, taimivaihe, kasvullinen eli vegetatiivinen vaihe ja kukintavaihe. Kukin vaihe eroaa toisista niin kasvin ulkomuodon, toiminnan kuin vaatimustensakin osalta. Itämisvaiheessa ilma, kosteus ja lämpö aktivoivat kasvin siemenen ulkopinnan hormonit, siemen halkeaa ja siemenestä työntyy ulos itu. Tämä itu on kasvin juuri. Kasvi alkaa hakeutua kohti maanpintaa. Itämisvaiheessa kasvi saa ravintonsa siemenestä itsestään.

Taimivaiheessa kasvi juurtuu kasvualustaansa ja kehittää ensimmäiset lehtensä. Itämis- ja taimivaiheessa kasvu on hidasta, koska yhteyttävää lehtipinta-alaa on vähän. Vegetatiivinen vaihe on se vaihe, jossa kasvi yhteyttää ja kasvaa kokoa. Tämä on ajallisesti merkittävin. Kukintavaiheessa kasvi muodostaa kukkia, joista hedelmöityttyään muodostuu edelleen hedelmiä ja siemeniä. Useilla kasveilla vegetatiivinen vaihe jatkuu kukkien ja hedelmien muodostumisesta huolimatta.

Itämisvaiheen jälkeen, kun ensimmäiset lehdet ovat puhjenneet maan pinnalle, kasvit koostuvat yleisesti juuresta, varresta, lehdistä ja kukintavaiheen alettua kukasta, johon myöhemmin muodostuu hedelmä. Näistä jokaisella on oma tehtävänsä: Juuret kiinnittävät kasvin kasvualustaansa ja imevät alustasta kasvin tarvitseman veden ja ravinteet. Varsi kannattelee kasvin muita osia ja kuljettaa näiden välillä vettä, ravinteita ja yhteyttämistuotteita. Kukkien tarkoitus on huolehtia kasvin lisääntymisestä. Lehtiensä avulla kasvi yhteyttää ja hengittää.

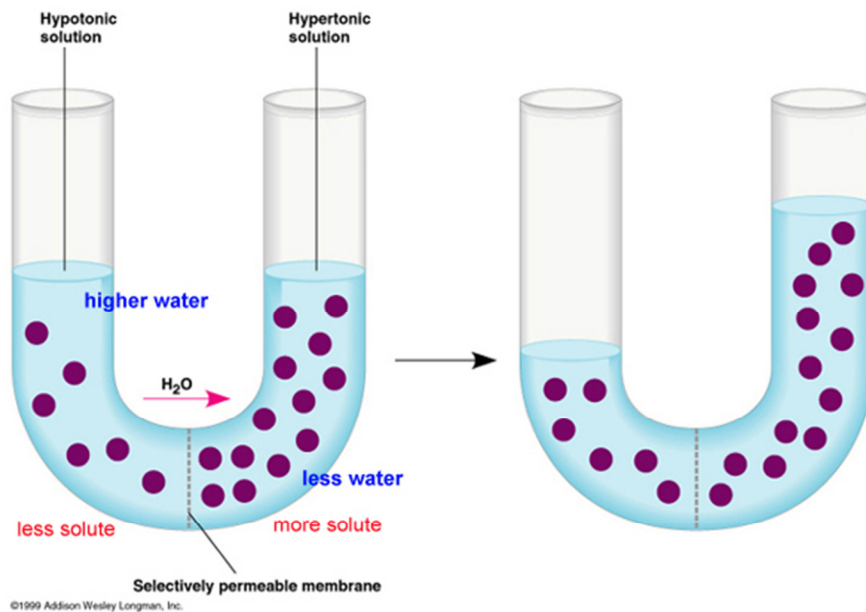


Kuva 1. Fotosynteesi eli yhteyttäminen [1, s. 59]

Kuvassa 1 havainnollistettu yhteyttäminen eli fotosynteesi on prosessi, jossa kasvi varastoi valoenergiaa ja muuttaa sen avulla juurillaan imemänsä veden ja vihreiden osiensa, pääasiassa lehtiensä alapinnoilla olevien ilmarakojen kautta imemänsä hiilidioksidin sokeriksi (hiilihydraateiksi) ja hapeksi. Kasvi luovuttaa hapen ilmakehään ja varastoi sokerin kasvityypistä riippuen esimerkiksi tärkkeliksi, öljyinä, rasvoina ja proteiineina. Fotosynteesin toiminnan kannalta on ratkaisevan tärkeää, että ilmarakot ovat avoimia. Ne sulkeutuvat, jos lämpötila on liian korkea, tai jos vettä on liian vähän.

Yhteyttämisestä lisäksi kasvi myös hengittää. Toisin kuin eläimillä, kasvilla ei ole hengityselimistöä, vaan hengitys tapahtuu solutasolla. Hengittäessään kasvi polttaa hapen avulla sokerin muiksi ravinteiksi sekä energiaksi, jota se sitten käyttää omiin elintoimintoihinsa: kasvuun, liikkeeseen, hengitykseen ja uusien yhdisteiden valmistukseen. Kasvi hengittää valosta riippumatta ja kaikilla osillaan. Voimakkainta palaminen on kasvin kasvukohdissa. Myös, mitä korkeampi lämpötila on, sitä voimakkaampaa palaminen on. Kun hengitys on vähäisempää kuin yhteyttäminen, osa sokerista varastoituu ja kasvi

kasvaa. Sokerin sisältämästä energiasta noin 40 % sitoutuu yhdisteisiin, joista kasvi saa helposti energiaa käyttöönsä. Loput 60 % energiasta vapautuu lämpönä.



Kuva 2. Osmoosi [2]

Kasvi imee tarvitsemansa veden ja ravinteet kasvualustasta juurillaan, joista nämä kulkeutuvat kasvin muihin osiin. Tämä veden liike sekä kasvualustasta juuriin että juurista muualle kasviin perustuu osmoosiin. Osmoosilla tarkoitetaan ilmiötä, jossa neste läpäisee puoliläpäisevän kalvon - kasvin tapauksessa solukalvon - laimeasta seoksesta väkevämpään pyrkiessään tasaamaan nesteiden väkyyserot, kuten kuvassa 2 on havainnollistettu. Osmoosi saa aikaan kasvin solussa nestejännityksen, jonka avulla ruohovartisetkin kasvit pysyvät pystyssä. Kun kasvi käyttää tai haihduttaa vettä, se saa jäljellä olevan nesteen väkyytymään, mikä puolestaan aiheuttaa sen, että kasvi imee osmoosin avulla lisää vettä ja ravinteita. [1, s. 57 - 59; 3, s. 2 - 7, 168; 4, s. 30 - 32, 50; 5; 6; 7.]

2.2 Kasvun edellytykset ja kasvuun vaikuttavat tekijät

Eläkkeen kasvin täytyy yhteyttää ja hengittää. Yhteyttämiseen kasvi tarvitsee hiilidioksidia, valosta saatavaa energiaa ja vettä. Hengittämiseen kasvi käyttää yhteyttämistuotteitaan. Kasvi tarvitsee myös kasvualustan, johon kiinnittyä ja josta imeä ravinteita

ja vettä. Kasvuun vaikuttavat tekijät voidaankin erotella kuvan 3 lailla viiteen yhtä ratkaisevaan osaan: ilma, valo, kasvualusta, vesi ja ravinteet. Nämä kasvutekijät pyritään säätämään niin, että kasvi kaikissa kasvunsa vaiheissa pystyisi yhteyttämään mahdollisimman tehokkaasti. Puutarhaviljelyssä halutaan vaikuttaa myös kasvin muotoutumiseen sekä energian varastoitumiseen kasvin niihin osiin, jotka korjataan sadoksi. [1, s. 59, 60; 3, s. 68; 4, s. 29 – 31.]



Kuva 3. Kasvien kasvuun vaikuttavat tekijät [3, s. 68]

2.2.1 Ilma kasvutekijänä

Kasvi asettaa ympäröivälle ilmalle kolme kriteeriä: Ilman lämpötila ei saa olla liian korkea tai liian alhainen, ilmankosteuden täytyy olla kasville sopiva ja ilman täytyy sisältää riittävästi sekä hiilidioksidia että happea.

Kasvin vaatima lämpötila vaihtelee lajien ja jopa lajikkeiden välillä. Tässä yhteydessä on erotettava optimi-, minimi- ja maksimi- sekä kriittinen lämpötila. Optimilämpötilalla tarkoitetaan lämpötilaa tai lämpötila-aluetta, jossa kasvu on parhaimmillaan. Kasvun kannalta tehokkain ja laadullisesti paras lämpötila ovat kuitenkin usein eri asioita. Mi-

nimilämpötilalla tarkoitetaan lämpötilaa, jota ei voida alittaa ilman, että kasvi siitä vaurioituu ja vastaavasti maksimilämpötilalla lämpötilaa, jota ei voida ylittää vaurioittamatta kasvia. Kriittisellä lämpötilalla tarkoitetaan esimerkiksi lämpötilaa, jonka alitus laukaisee joillain kylmäsäilyä vaativilla kasvilajeilla kukintavaiheen.

Alm ja Palmstierna toteavat teoksessaan optimilämpötilan vaihtelevan lajista toiseen, mutta määrittelevät kuitenkin optimilämpötila-alueeksi yleisesti noin 22 ... 25 °C. Van Patten määrittää optimilämpötilan suurin piirtein samoin, 22 ... 24 °C, ja hänen mukaansa kasvin kasvu hidastuu lämpötila-alueen 15 ... 29 °C ulkopuolella. Hän ei määritä tarkkaan maksimilämpötilaa, mutta esimerkissään kertoo monen puutarhurin menettäneen satonsa, kun lämpötila on noussut yli 38 °C:een.

Minimilämpötilasta Van Patten sanoo seuraavaa: "Jos mahdollista, pidä sisäkasvihuoneen lämpötila aina 5 °C:een yläpuolella ja ehdottomasti 0 °C:n yläpuolella". Alm ja Palmstierna eivät määrittele minimilämpötilaa sen tarkemmin, mutta toteavat maksimilämpötilan olevan useimmille lajikkeille 40 ... 43 °C. Opetushallituksen opas määrittelee kasvin kasvun lämpötila-alueeksi 7 ... 33 celsiusastetta. Optimi-, minimi- tai maksimilämpötila-arvoja se ei tarkkaan määrittele. Jos kasvatustilan ilmaa rikastetaan hiilidioksidilla, voi optimilämpötila olla tavallista korkeampi.

Puhuttaessa lämpötilasta täytyy myös eritellä päivä- ja yölämpötila sekä vuorokauden keskilämpötila. Yleisesti ottaen mahdollisimman tasainen vuorokauden keskilämpötila auttaa kasvia kasvamaan tasaisemmin vahvempana, ja terveempänä. Yölämpötilat kasvatustilassa normaalisti putoavat, koska valaisin ei tuota pois päältä ollessaan myöskään lämpöä. Muutamien asteiden pudotus ei tuota ongelmia ja joidenkin kasvien yön lämpötilavaatimus voi myös poiketa päivästä, mutta sisäkasvihuoneen yö- ja päivälämpötilojen ero ei tulisi olla suurempi kuin 8 °C. Tätä suurempi lämpötilavaihtelu saattaa aiheuttaa ongelmia liian suuren ilmankosteuden kanssa ja altistaa kasvin homeille.

Kuten lämpötilankin kanssa, paras viljelytulos saavutetaan, kun ilman suhteellinen kosteusprosentti saadaan pysymään mahdollisimman vakaana. Kasvi haihduttaa sitä voimakkaammin, mitä kuivempaa ympäröivä ilma on. Jos ilmankosteus on liian korkea, kasvin ilmaroot sulkeutuvat ja haihdutus ja yhteyttäminen pysähtyvät. Korkea ilmankosteus altistaa kasvin myös homeille ja tuholaisille.

Toisaalta, jos ilmankosteus laskee liian alhaiseksi, kasvi haihduttaa vettä enemmän kuin sen juuret kykenevät imemään kasvualustasta, jolloin kasvi kuivaa liikaa. Tämä saa kasvin sulkemaan ilmarakonsa, jolloin jälleen haihtuminen ja yhteyttäminen hidastuvat tai loppuvat. Itämis- ja vegetatiivisessa vaiheessa kasville suotuisin ilmankosteus on noin 65 ... 70 %. Kukintavaiheessa tämä luku on noin 55 ... 60 %. Kasvin haihdutusta voidaan edistää myös mm. liikuttamalla kasvatustilan ilmaa tuulettimella, sillä ilman liike kuivattaa kasvia.

Ulkoilmassa on happea keskimäärin 21 % ja hiilidioksidia noin 0,039 % (392.40 ppm, mitattu maaliskuussa 2011 Mauna Loan Observatoriossa, Havaijilla). Ilmassa on happea kasvin tarpeisiin riittävästi, eikä se vaadi käytännössä koskaan lisäkontrollia. Alhainen hiilidioksidipitoisuus taas muodostuu käytännössä suurimmaksi kasvua rajoittavaksi tekijäksi valaistuksen ja ilmankosteuden ollessa riittävät. Varsinkin huonosti ilmastoidussa kasvatustilassa ja aurinkoisena päivänä ulkokasvihuoneessa hiilidioksidipitoisuudet laskevat nopeasti. Tuulettamattomassa tilassa kasvi voi käyttää kaiken hiilidioksidin muutamassa tunnissa. Pitoisuuden laskiessa alle 200 ppm:n kasvu hidastuu selvästi.

Opetushallituksen opas kertoo hiilidioksidipitoisuuksia nostettavan usein lannoituksella 600 ppm:ään ja toteaa, ettei yli 1 000 ppm:n pitoisuuksia suositeta nykyään. Van Patten puolestaan esittää 1 200 ... 1 500 ppm:n pitoisuuksia yleisesti hyväksytyksi optimiarvoksi ammattiviljelijöiden keskuudessa. Käytettäessä hiilidioksidilla rikastettua ilmaa kasvi tarvitsee enemmän vettä, ravinteita ja tilaa sekä korkeampaa kasvulämpötilaa. Hiilidioksidin lisäys kiihdyttää kasvunopeutta, mutta se ei paranna sadon laatua. Se ei esimerkiksi tuota voimakkaampia makuja. [1, s. 61, 62; 3, s. 68, 246, 253 - 256, 258, 260, 261; 4, s. 45 - 47, 50 - 52, 57; 8.]

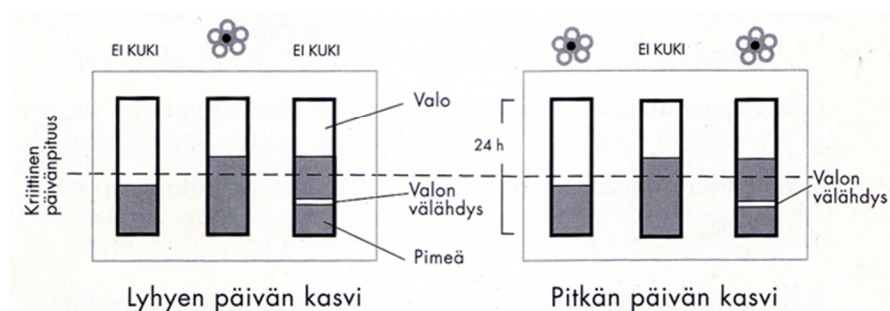
2.2.2 Valo kasvutekijänä

Kasvit tarvitsevat valoa. Hyvän lopputuloksen kannalta sekä valon värisävy, voimakkuus että valojakson pituus merkitsevät.

Kasvit eivät voi hyödyntää kaikkea auringosta tai valaisimesta saatavaa säteilyä, vaan ainoastaan tietyt spektrin osat. Kasvin muotoon vaikuttaa oleellisesti kasvin saaman punaisen ($\lambda = 660 \text{ nm}$) ja kaukopunaisen ($\lambda = 730 \text{ nm}$) valon suhde. Esimerkiksi koska hehkulampussa kaukopunaisen valon määrä on suhteessa suurempi kuin suurpainenaariumvalaisimessa, se saa kasvin venymään turhaan pituutta, eikä näin sovi kasvatusvalaisimeksi. Kasvin pituuskasvuun vaikuttaa lisäksi sininen valo. Se vaikuttaa varsien kasvuun ja ilmarakojen avautumiseen ja sen on havaittu tekevän kasveista tiiviskasvuisia. Spektrialue vaihtelee kasvin elinvaiheen mukaan.

Yhteyttämisessä hyödyllinen aallonpituusalue on $400 \dots 700 \text{ nm}$. Tätä spektrin aluetta kutsutaan PAR-valoksi (engl. Photosynthetically Active Radiation). Mitä valon voimakkuuteen tulee, toiset kasvit vaativat runsaasti valoa kasvaakseen hyvin, kun taas toiset kasvilajit ovat niin sanottuja varjokasveja, jotka eivät pysty hyödyntämään runsasta valoa, vaan saattavat jopa kärsiä liian voimakkaasta valon intensiteetistä.

Myös valojakso on ratkaisevan tärkeä. Monet kasvutapahtumat ohjautuvat valojakson perusteella. Tällaisia tapahtumia ovat esimerkiksi kukinta, mukuloiden muodostus, lehtien variseminen, lepotila ja itäminen. Päivän tai valojakson pituus vaikuttaa eri kasveihin eri tavalla. Kasvit voidaan jakaa pitkän päivän, lyhyen päivän ja päiväneutraaleihin kasveihin sen perusteella, miten ne kukkivat valojakson vaikutuksesta. Kuten kuvassa 4 havainnollistetaan pitkän päivän kasvit kukkivat, kun ne saavat valoa joko kriittisen päivänpituuden yli tai niiden pimeää jaksoa häiritään, kun taas lyhyen päivän kasvit kukkivat vasta kun valojakso on lyhyempi kuin kriittinen päivänpituus. Päiväneutraalit kasvit eivät piittaa valojakson pituudesta, vaan kukkivat, kun ovat saavuttaneet tietyn kehitysvaiheen.



Kuva 4. Valojakson vaikutus kukintavaiheen laukaisuun [4, s. 177]

Van Pattenin mukaan vegetatiivisessa vaiheessa monelle lyhyen päivän kasville suotuisin valojakso on 18 ... 24 tuntia valoa ja 0 ... 6 tuntia pimeyttä vuorokaudessa, vaikkakin poikkeuksia on. Opetushallituksen opas suosittelee muutaman tunnin yötä, vaikka monia kasveja voidaan valottaa koko vuorokauden ilman haitallisia sivuvaikutuksia. Kukkimisvaiheelle Van Patten suosittelee tasaista 12 tunnin valoisaa ja 12 tunnin pimeää jaksoa vuorokaudessa, kun taas Opetushallituksen selkeästi ammattimaisempaan ulko-kasvihuonekasvatukseen tehty opas toteaa kasvihuoneen yleensä pimennettävän pimennysverhoilla tai muoveilla klo 16 - 7, jolloin pimeä jakso ei häiritse kasvihuoneessa työskentelyä.

Kukkivien lyhyen päivän kasvien pimeän jakson aikana kasvatustilaan ei tule päästää ylimääräistä valoa, koska se häiritsee kukkien muodostumista ja saa kasvin palautumaan vegetatiiviseen vaiheeseen, josta palautuminen takaisin kukintavaiheeseen voi kestää jopa kuusi viikkoa. Van Patten tosin ehdottaa sisäkasvihuoneeseen vihreää lisävaloa, koska kasvit eivät reagoi vihreän valon aallonpituuksiin.

Pitkän päivän kasvit siirtyvät kukintavaiheeseen, kun pimeä jakso on tarpeeksi lyhyt. Paras tulos saadaan yhtenäisellä, yli 12 tunnin valoisalla jaksolla, mutta pitkä pimeä jakso voidaan myös keskeyttää lyhyellä valoisalla jaksolla keskellä pimeää. Pimeän jakson pituus ei saa ylittää seitsemää tuntia. [1, s. 38, 40, 61; 3, s. 3 - 5, 68, 86 - 90; 4, s. 37 - 43, 176 - 180, 191.]

2.2.3 Kasvualusta kasvutekijänä

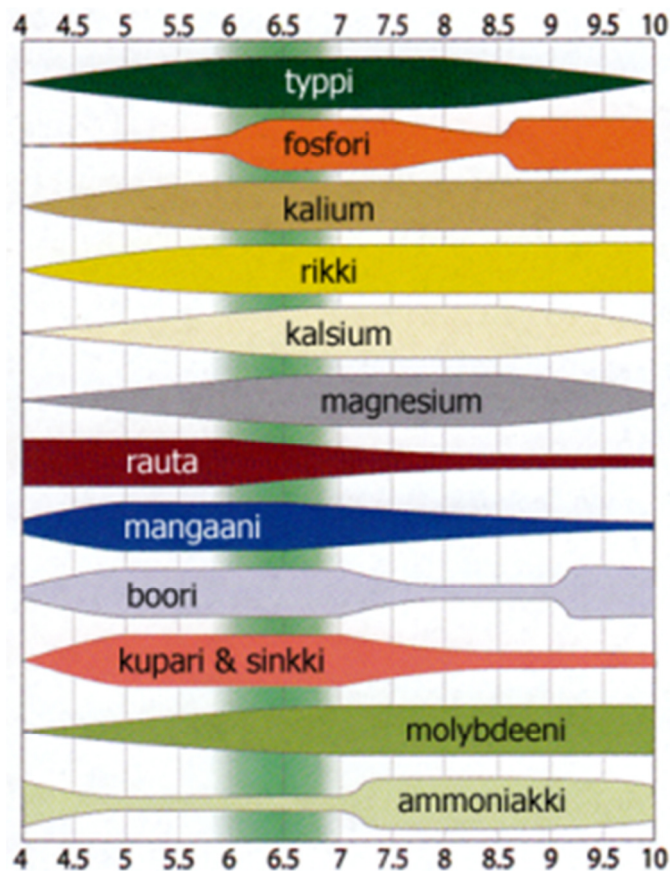
Kasvi ei välttämättä tarvitse kasvaakseen maaperää, vaan myös luonnossa maaperässä kasvavia kasveja voidaan viljellä sekä kiinteässä alustassa että vesiviljelmässä. Vesiviljelmäksi luetaan myös viljelmät, joissa kasvualustana on esimerkiksi kivillä, turve tai kookoskuitu. Joillain vesiviljelmämenetelmillä ei välttämättä käytetä mitään kiinteää kasvualustaa, vaan kasvin juuret ovat vedessä. Yhteistä kasvualustoille vesiviljelmissä on, että kasvualustassa ei itsessään ole ravinteita, vaan kasvi saa tarvitsemansa ravinteet ravintoliuoksista.

Vesiviljelmällä kasvin ravinteidenottoa ja kasvualustan happipitoisuutta voidaan helpommin säädellä. Vesiviljelmässä kasvi myös saa ravinteita niin nopeasti, kuin se pystyy niitä käyttämään, ja näin ollen se kasvaa nopeammin kuin maaperässä viljeltäessä. Toisaalta maaperässä viljely antaa anteeksi paljon enemmän, eikä se vaadi niin paljon tarkkaavaisuutta, koska kasvit kasvavat hitaammin ja maaperä itsessään toimii puskurina ravinteiden imeytymiselle. [3, s. 212]

2.2.4 Vesi ja ravinteet kasvutekijänä

Vedellä on kasville useampikin merkitys. Kasvi käyttää vettä ravinteiden, sokereiden ja tärkkelyksen kuljettamiseen, veden avulla kasvi viilentää itseään haihduttamalla, ja vesi on itsessään osa kasvia. Kasvi säilyttää muotonsa veden aiheuttaman nestejännityksen avulla ja kasvilajista riippuen jopa 95 % kasvin massasta on vettä.

Kasvi imee juurillaan maasta tarvitsemansa veden ja ravinteet. Koska se varastoi suoloja ja sokereita juuriinsa, niissä on lähes aina korkeampi sähkönjohtavuus (EC) kuin kasvualustassa. Yksittäisten ravinteiden kannalta osmoosin toimimiseksi tärkeää on niiden keskinäiset suhteet solukalvon molemmiin puolin, eikä sähkönjohtavuus vaikuta niiden imeytymiseen, mutta veden imeytymiseen sähkönjohtavuudella on ratkaiseva merkitys. Liian pieni johtokyky vaikuttaa kasvin ravinnonsaantiin, ja sadosta tulee tyyppillisesti pieni ja huonolaatuinen. Sähkönjohtavuuden kasvaessa liian suureksi kasvi ei saa imettyä vettä kasvualustastaan. Jos sähkönjohtavuus on korkeampi juuren ulkopuolella, juuri alkaa luovuttaa vettä, ja kasvi kuivuu. Maaperässä viljeltäessä yli 3 mS/cm ja ruukkukasvatuksessa yli 1,5 mS/cm sähkönjohtavuus on liian korkea.



Kuva 5. Viljelyn kannalta turvallinen pH-alue [3, s. 142]

Veden happamuusaste vaikuttaa ratkaisevasti ravintoaineiden liukenemiseen. Kun vesi on liian emäksistä eli kun sen pH-arvo kasvaa yli seitsemän, jotkin ravinteet ja alkuaineet eivät enää liukene kunnolla, eikä kasvi saa imettyä niitä juurillaan tarpeeksi. Tällaisia aineita ovat erityisesti rauta, mangaani ja boori. Happamassa vedessä (alhainen pH-arvo) ilmenee tämän lisäksi helposti myrkytysoireita. Esimerkiksi kasville haitallisen alumiinin liukoisuus lisääntyy huomattavasti, kun veden pH-arvo laskee alle viiden. Kuvassa 5 on esitetty eri alkuaineiden liukeneminen veteen eri pH-arvoissa. Kuvassa on myös havainnollistettu vihreällä kasvin viljelyn kannalta turvallinen pH-alue.

Kasvihuoneviljelyssä ravinneliuokset ovat yleensä happamia, mikä saa veden pH-arvon laskemaan. Kun kasvi käyttää ravinteita vedestä, pH-arvo nousee. Tästä syystä on hyvä mitata sekä kasvualustan että kasteluveden pH-arvoa. Optimaalisen pH-alueen määrittelyssä lähdeteokset ovat hieman ristiriitaisia. Opetusministeriön teos sanoo, että kasteluveden pH-alueen tulisi olla 5,5 ... 6,5. Yhdysvaltain Victorian osavaltion tietolehtinen mainitsee hyväksi pH-alueeksi maaperässä viljelyyn 5,5 ... 6,5 ja keinotekoisissa

alustoissa hieman happamamman 5,0 ... 6,5. Van Patten puolestaan suosittaa vesiviljelyyn pH-alueita 5,5 ... 6,5 ja kiinteässä kasvualustassa aluetta 6,5 ... 7. [1, s. 60; 3, s. 143, 166, 168, 223, 233, 234; 4, s. 49, 50, 138, 139, 147; 9, s. 2.]

3 Mitattavat ja säädettävät suureet

Hyvän kasvutuloksen saavuttaminen vaatii monen seikan ja suureen huomioonottamista, mittausta ja säätöä (ks. 2). Tässä luvussa selvitetään kasvihuoneen ohjausjärjestelmän kannalta tärkeät suureet ja toiminnot eri kasvutekijöiden mukaan.

3.1 Ilma

Kasvuun vaikuttavat tekijät ilmassa ovat ilmankosteus ja lämpötila sekä hiilidioksidin ja hapen määrä. Käyttäjä voi määrittellä käyttöliittymään raja-arvot päivä- ja yölämpötiloil- le ja järjestelmä säätää laitteita mittaustulosten mukaisesti.

Varsinkin suurempitehoisia valaisimia käytettäessä kasvatustilan lämpötila kohoaa herkästi yli tavoitellun kasvatuslämpötilan. Jos vain ympäristön lämpötila on riittävän alhainen, kätevin tapa lämpötilan laskemiseksi on tehokas ilmanvaihto. Toisaalta kasvatettaessa kylmällä ilmalla paikassa, jossa on huono lämpötilaneristys ja valaisimet, jotka eivät tuota suurta määrää lämpösäteilyä, lämpötila voi tippua alle halutun. Tällöin tilaa täytyy lämmittää esimerkiksi lämpöpatterilla.

Ilmanlämpötilan kannalta laitteessa tulee siis olla lämpötilan mittausta ja ohjausta sekä jäähdytykselle että lämmitykselle. Laitteen tässä versiossa ohjaus toteutetaan kahden puolijohdereleellä ohjatun 230 V_{AC}:n pistorasian avulla, jotka kytkeytyvät tarpeen mukaan päälle tai pois. Käyttäjä voi kytkeä näihin jäähdytystuulettimen ja lämpöpatterin. Jatkokehittävänä jäsä mm. portaaton nopeudensäätö tuulettimelle esimerkiksi PWM-modulaatiota hyödyntäen. Laitteen myöhemmissä versioissa voisi olla myös mahdollisuus säätää lämmitys- ja jäähdytyslaitteiden ohjausjännitteen suuruutta käyttöliittymästä.

Laitteen tulee mitata myös ilmankosteutta, ja siinä tulee olla pistorasiat ilmankostuttimelle ja -kuivaimelle. Lämpötilanohjauksen tavoin myös ilmankosteuden-ohjauksessa jatkokehittelyyn jää erilaisten ohjausjännitteiden säätö käyttöliittymästä, jos osoittautuu, että siihen on tarvetta.

Koska hapen määrä ilmassa on kasveille käytännössä aina riittävä, ei hapen määrää ole järkevää mitata laitteella. Järkevä ja turvallinen tapa hiilidioksidipitoisuuden lisäämiseen kasvihuoneessa on lisätä sitä ilmaan painepullosta. Hiilidioksidin määrää voidaan säädellä magneettiventtiilillä. Laitteessa on hiilidioksidimittaus ja 230 V_{AC}:n ohjaus magneettiventtiilille. [1, s. 42, 47; 3, s. 263, 264.]

3.2 Valo

Valon intensiteetti ja spektrialue riippuu täysin käytettävästä valaisimesta, joten valon osalta säädettäväksi jää valojakson pituus. Käyttäjä määrittää käyttöliittymässä haluamansa valoisat ja pimeät jaksot ja valot säätyvät järjestelmän kellon mukaan. Jatkokehiteltäväksi jää esimerkiksi spektrialueen suhteen erilaisten sinisten ja punaisten kirkasledien ohjaaminen erikseen kasvin kasvuvaiheen mukaan.

3.3 Kasvualusta, vesi ja ravinteet

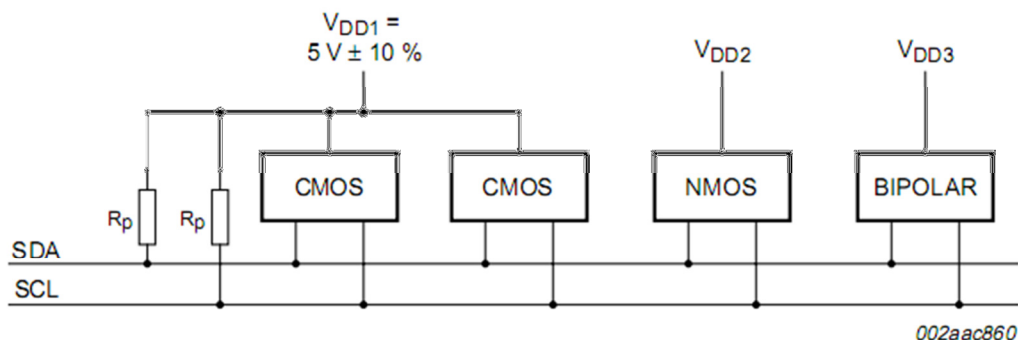
Kasvualusta ei sinänsä vaadi muita mitattavia suureita kuin maaperässä viljeltäessä maaperän kosteuden mittauksen. Valitulla kasvualustalla saattaa tosin olla vaikutusta esimerkiksi optimaaliseen pH-arvoalueeseen. Veden ja ravinteiden osalta on tärkeää mitata pH- ja sähkönjohtavuusarvot. Saatavilla olevat pH-anturit mittaavat pH-arvon koko pH-asteikon alueelta (0 ... 14), joten tämä ei tuota päänvaivaa. Laitte on tarkoitettu pääasiassa sisäviljelyyn ja pienkasvihuoneisiin, joissa viljely on ruukkuviljelyä. Näin ollen mitattavaksi sähkönjohtavuusalueeksi riittää 0 ... 2 mS/cm. Sähkönjohtavuuden mitta-asteikko on säädettävissä ja kalibroitavissa potentiometrillä, joten tarvittaessa laitteen voi virittää mittaamaan suurempaakin sähkönjohtavuutta. Lisäksi automaattisen kastelun toteuttamiseksi laitteessa tulee olla sensorit mittaamaan vedenpinnan minimi- ja maksimikorkeuksia.

4 Käytetyt tiedonsiirtomenetelmät

Niin keskusyksikön ja antureiden välinen kuin keskusyksikön sisäistenkin komponenttien keskinäinen kommunikaatio tapahtuu eri tiedonsiirtoväyliä ja -standardeja hyväksikäyttämällä. Seuraavassa on selitetty tarkemmin nämä eri menetelmät.

4.1 I²C-väylä

I²C on Philipsin kehittämä sarjamuotoinen tiedonsiirtoväylä, jonka avulla useat laitteet voivat kommunikoida keskenään käyttäen samaa kello- (SCL) ja datalinjaa (SDA). Käytännössä näiden linjojen lisäksi väylään liitettävä laite tarvitsee toimiakseen ainoastaan käyttöjännitteen ja maatason. Väylän laitteilla on jokaisella yksilöllinen osoite, jonka avulla isäntälaitte yksilöi, minkä orjalaitteen kanssa se kulloinkin kommunikoi. Kuvan 6 mukaisesti sekä kello- että datalinjalla tulee myös olla ylösvetovastus.

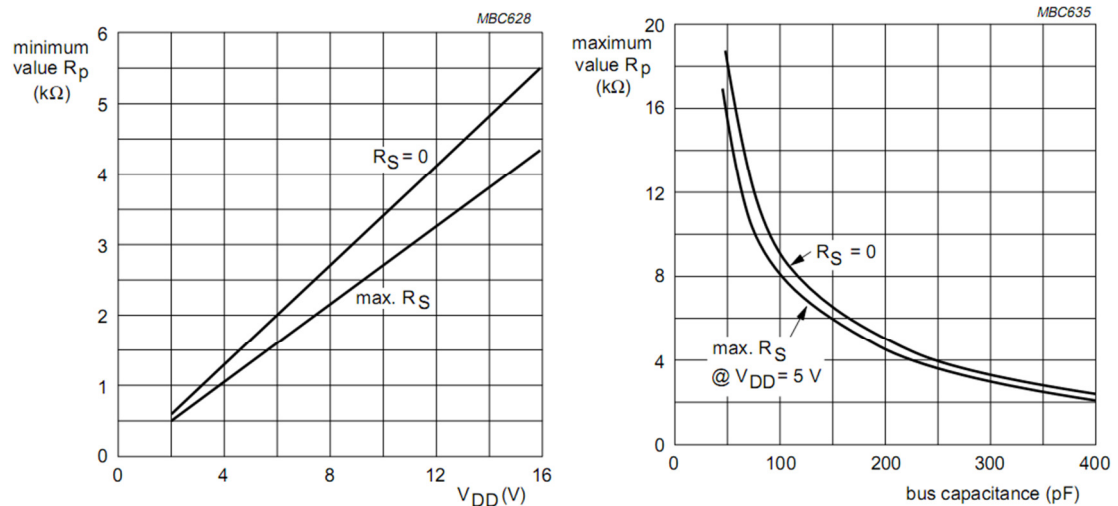


V_{DD2} , V_{DD3} are device dependent (e.g., 12 V).

Kuva 6. Laitteiden kytkentä I²C -väylällä [10, s. 8]

I²C-väylän ylösvetovastusten arvo ei vaadi kovin suurta tarkkuutta. Minimiarvo määrittyy kuvan 8 (ks. s. 21) mukaisesti käyttöjännitteen ja maksimiarvo väyläkapasitanssin mukaan sarjavastuksen R_S ollessa 0 Ω . Laitteen käyttöjännitteen ollessa 5 V ylösvetovastuksen on oltava vähintään 1,7 k Ω . Koska väylässä on vain yksi laite ja sekin sijaitsee fyysisesti lähellä mikrokontrolleria, väyläkapasitanssi ei ole suuri. Näin ollen kuvasta 7 (ks. seur. s.) voidaan lukea, että vastuksen arvolla ei ole kovin suurta merkitystä. Tätä tukee myös mm. Robot Electronics -internetsivuston I²C-väyläopas, joka mainit-

see, että ylösvetovastukset voivat olla mitä tahansa 1,8 k Ω :n ja 47 k Ω :n väliltä. Sivusto sanoo 1,8 k Ω :n, 4,7 k Ω :n ja 10 k Ω :n vastusarvojen olevan tyypillisesti käytettyjä. [10, s. 6, 42, 43; 11; 12, s. 37 - 40.]

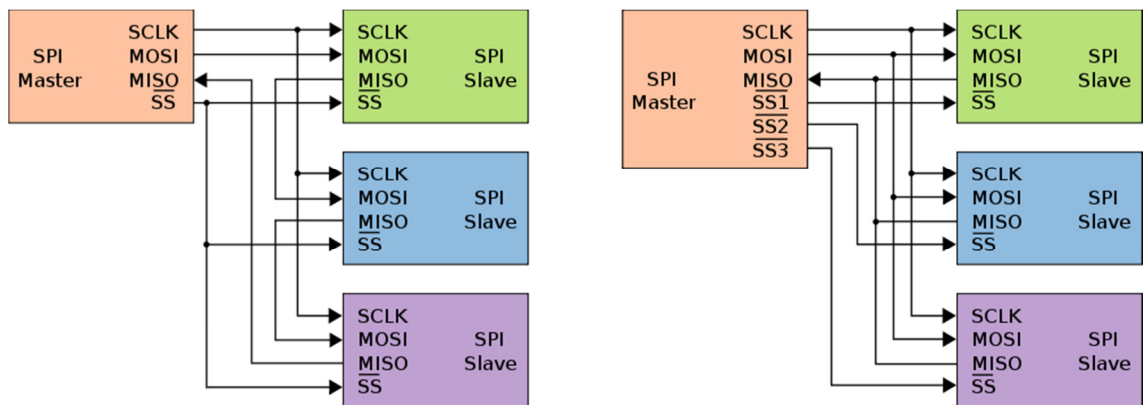


Kuva 7. I²C-väylän ylösvetovastuksen maksimi- ja minimiarvot [12, s. 40]

4.2 SPI-väylä

SPI on Motorolan kehittämä synkroninen sarjamuotoinen tiedonsiirtoväylä. Väylällä tieto liikkuu samanaikaisesti sekä isäntälaitteelta orjalaitteelle että toisinpäin (*full duplex*). Väylässä on neljä data- ja ohjauslinjaa: MOSI, MISO, kellolinja (SCK) ja orjalaitteen valintasignaali (SS/CS). Varsinainen data liikkuu isäntälaitteelta orjalaitteelle MOSI-linjaa ja orjalaitteelta isäntälaitteelle MISO-linjaa pitkin. Isäntälaitte ohjaa väylän kellolinjaa ja määrittää SS-linjan avulla, minkä orjalaitteen kanssa se kulloinkin kommunikoi.

Väylässä voi olla samaan aikaan yksi tai useampi orjalaitte. Käytettäessä useampaa orjalaitetta käytettävän laitteen valinta voidaan toteuttaa yhdellä valintalinjalla ketjuttamalla laitteet (*daisy-chain*) tai käyttämällä jokaiselle laitteelle erillistä SS-linjaa. Kuvassa 8 (ks. seur. s.) esitetään usean laitteen kytkentä sekä ketjuttamalla (vas.) että erillisillä laitevalintasignaaleilla (oik.) toteutettuna. Vain yhden tavun kerrallaan siirtävät laitteet voidaan kytkeä väylään ketjuttamalla.



Kuva 8. Useamman laitteen kytkentä SPI-väylään [13]

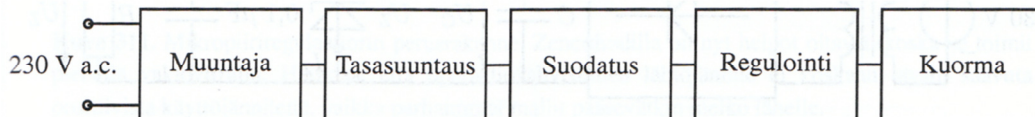
SPI-väylää käytetään tyypillisesti ainoastaan piirilevyllä. Koska SPI kehitettiin siirtämään dataa piirien välillä suurilla nopeuksilla, fyysinen tiedonsiirtoväli ei voi olla kovin suuri ilman, että resistanssi kasvaa liian suureksi väylän toiminnalle. Pienillä tiedonsiirtonopeuksilla SPI:tä on mahdollista käyttää myös piirilevyn ulkopuolella, mutta tämä ei ole kovin käytännöllistä. [14.]

5 Keskusyksikkö

Kaikki laitteen toiminnot tapahtuvat keskusyksikössä. Keskusyksikköä syötetään 230 V_{AC} verkkovirralla ja sen käyttöjännitteenä on 5 V_{DC}. Laitteen näyttö tarvitsee lisäksi -15 V_{DC} ja *flash*-muisti ja SD-kortti tarvitsevat +3,3 V_{DC}.

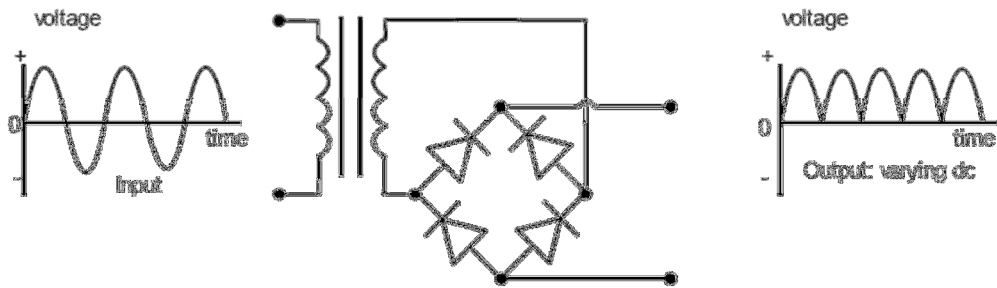
5.1 Tasajännitelähde

Laitteen elektroniikka toimii +5 V:n, +3,3 V:n ja -15 V:n tasajännitteellä ja laitetta on tarkoitus käyttää 230 V_{AC}:n verkkovirralla. Laitteessa täytyy siis olla tasajännitelähde. Tämä on toteutettu lineaarisella tehollähteellä, joka kuvan 9 mukaisesti koostuu muuntajasta, tasasuuntauksesta, suodatukselta ja reguloinnista. Kuvassa on havainnollistettu myös laitteen kuorma.



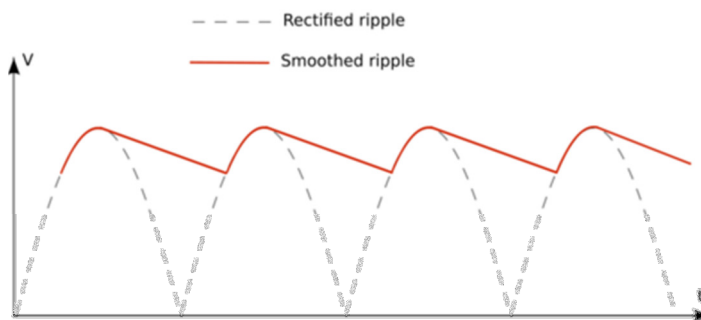
Kuva 9. Tasajännitelähteen osat [15]

Muuntaja muuntaa vaihtojännitteen 230 voltista pienemmäksi vaihtojännitteeksi. Muuntajalle ainoat kriteerit ovat toisiokäämin jännite ja teho, jonka muuntaja kykenee antamaan. Näistä toisiokäämin jännite määräytyy regulaattorin mukaan ja virta kuorman tarpeen mukaan. Tasasuuntaus kääntää vaihtojännitteen negatiivisen vaiheen positiiviseksi tai positiivisen vaiheen negatiiviseksi, riippuen halutun jännitteen napaisuudesta. Kuvassa 10 (ks. seur. s.) esitetään jännite tasasuuntauksen jälkeen. Tasasuuntaus on hoidettu tasasuuntaussillalla yksittäiskomponentilla.



Kuva 10. Jännite ennen ja jälkeen tasasuuntaussillan [16]

Suodatus tapahtuu kondensaattorilla. Kondensaattorin tehtävä on tasata jännite mahdollisimman tasaiseksi ennen regulaattoria, toisin sanoen pienentää rippelijännite mahdollisimman pieneksi. Tämä tarkoittaa, että kondensaattorin täytyy olla arvoltaan mahdollisimman suuri. Jännite suodatuksen jälkeen esitetään kuvassa 11.



Kuva 11. Jännite suodatuksen jälkeen [17]

Lopuksi suodatettu jännite reguloidaan, jonka jälkeen jännitelähteen ulostulojännite on käytännössä tasainen. Regulointi toteutetaan regulaattoripiirillä, kuten KA7805. Regulaattoripiirissä on lisäksi oikosulku- ja ylikuumenemissuojus. [15, s. 249, 251, 252; 18, s. 2.]

5.2 Mikrokontrolleri

Mikrokontrolleri ohjaa koko järjestelmän toimintaa: se suorittaa mittainformaation käsittelyn, liitettävien laitteiden ohjauksen, hälytykset ja datan tallentamisen. Laitteen mikrokontrolleriksi on valittu Atmelin AT90USB1287.

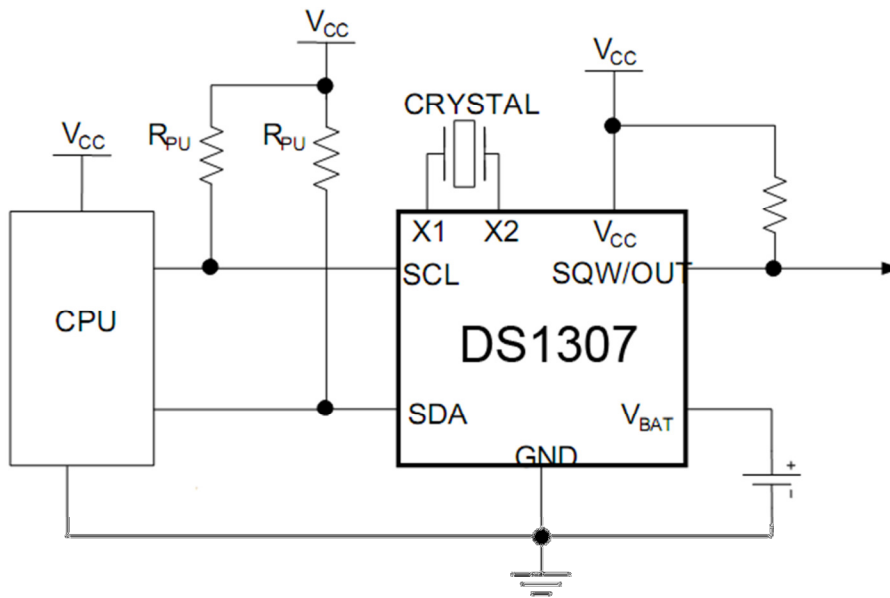
Kyseinen mikrokontrolleri täyttää laitteen asettamat kriteerit:

- Digitaaliset anturit käyttävät eri tiedonsiirtomenetelmiä, ja mikrokontrollerin tulee kyetä toimimaan näiden kanssa. AT90USB1287:ssä on integroituna seuraavat menetelmät: I²C/TWI, SPI ja USART. Näiden lisäksi *1-wire*-standardia käyttävät laitteet saadaan liitettyä järjestelmään erillisen siltapiirin (engl. *1-wire bridge*) avulla. Piiri toimii I²C-väylässä renkinä ja näkyy *1-wire*-laitteille isäntänä.
- Suunnittelun yhtenä lähtökohtana oli, että laite tai sen myöhemmät versiot kykenisivät kommunikoimaan tietokoneen kanssa. Mikrokontrollerissa on täysi USB 2,0 -tuki, joten se kykenee suoraan kommunikaatioon USB-väylää pitkin.
- AT90USB1287:ssä on riittävä määrä I/O-portteja tarvittavien laitteiden ja antureiden liittämiseen, myös graafisen LCD-näytön rinnakkaismuotoisen datan siirtoon.
- AD-muunninten määrä riittää antureille, joiden ulostulo on analoginen.
- Lisäksi valintaa puolsi se, että kontrollerin ohjelmointiympäristö ja rakenne olivat ennalta tutut. [19, s. 1, 2; 20; 21.]

5.3 Kello

Koska mikrokontrollerin sisäinen kello ei ole kovin tarkka ja laitteen tulee kyetä toimimaan pitkiäkin aikoja ilman kellon synkronointia, on järjestelmässä hyvä olla ulkoinen kellokide. Laitteen varsinaiset, kasvuun vaikuttavat perustoiminnot eivät kaipaa kalenteriominaisuutta, mutta datalokin kannalta laitteessa on hyvä olla myös kalenteri. Ulkoisella RTC-kellolla laitteeseen saadaan tarkka aika ja ennalta koodattu kalenteri. Laitteen RTC-kelloksi on valittu Maximin DS1307.

Kyseinen kellopiiri ilmaisee kellonaikaa muodossa hh:mm:ss (valittavana joko 24- tai 12-tuntinen kello) ja siinä on kalenteri, joka ilmaisee viikonpäivän ja päivämäärän vuoteen 2100 asti. Piirin tyyppillinen käyttöjännite on 5 V_{DC}, ja siihen on mahdollista liittää paristovarmennus sähkökatkoksen varalta. DS1307 tarvitsee toimiakseen ulkoisen kellokiteen, jonka taajuus on 32,768 kHz (2¹⁵ Hz) ja kuormakapasitanssi 12,5 pF. Tiedonsiirto mikrokontrollerin ja RTC-kellon välillä tapahtuu I²C-väylää pitkin.



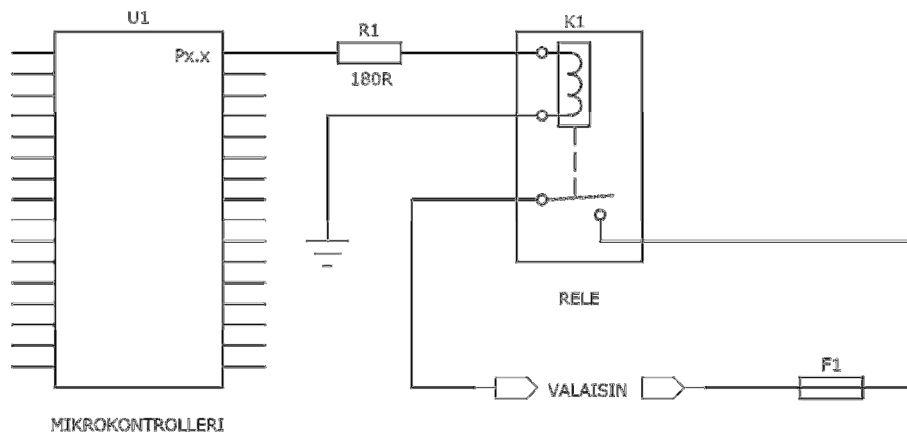
Kuva 12. Kellon kytkentäkaavio. [22, s. 1]

Kuvassa 12 on esitetty DS1307:n kytkentäkaavio. Kaaviossa SCL ja SDA ovat I²C-väylän kello- ja datalinjat. Kellokide kytketään X1- ja X2-nastojen välille. Sähkökatkosten varalta kellopiiri on suojattu V_{BAT}-nastan ja maan välille kytketyllä 3 V:n paristolla. Kuvan vastukset R_{PU} ovat I²C-väylän ylösvetovastukset (ks. 4.1). SQW/OUT-nasta on ulostulo, josta saadaan kanttiaallon muotoinen pulssi. Tästä voidaan ottaa pulssi, jonka avulla ohjataan mikrokontrollerin keskeytystä, jolla hoidetaan suureiden mittaukset.

Maxim DS1307 RTC-kellon I²C-väyläosoite on 1101000, joten mikrokontrollerin kirjoittaessa dataa kellolle käytetään osoitetta 0xD0h ja luettaessa kellon dataa käytetään osoitetta 0xD1h. [12, s. 39, 40; 22, s. 1, 2, 6, 12.]

5.4 Valaistuksen ohjaus

Valaistusta ohjataan vertailemalla käyttäjän asettamia sytytys- ja sammutusaikoja laitteen kelloon: Kun kellonaika saavuttaa asetetun sytytysajan, mikrokontrollerin lähtö vaihtuu loogiseen 1-tilaan, ja kun kellonaika täsmää sammutusajan kanssa, mikrokontrollerin lähtö vaihtuu loogiseen 0-tilaan. Tämä ulostulo ohjaa puolestaan relettä, joka taas ohjaa valaisimen pistorasiaa, kuten kuvassa 13.



Kuva 13. Valaistuksen ohjaus

Releenä valaistuksen ohjauksessa on Sharpin puolijohderele S202S02F. Se täyttää releelle asetetut vaatimukset: Sen ohjaus onnistuu viiden voltin tai pienemmällä tasajännitteellä, sen ulostulo kestää 230 voltin vaihtojännitteen ja sen virrankesto on riittävän suuri kyetäkseen ohjaamaan tehokkaampaakin valaisinta. Kyseistä relettä ohjataan 1,2 voltin tasajännitteellä ja sen ulostulo kestää 8 ampeerin virran 230 voltin tasajännitteellä. Releen tyyppinen ohjausvirta on 20 mA ja suurimmillaan absoluuttinen maksimiohjausvirta 50 mA. Näin ollen rele vaatii etuvastuksen, jonka arvo on laskettu kaavassa 1.

$$R_{rele} = \frac{U_{CC} - U_{rele}}{I_{rele}} = \frac{5V - 1,2V}{20mA} = 190\Omega \quad (1)$$

Etuvastuksena voidaan käyttää E-sarjan mukaista 180 Ω:n vastusta. [23, s. 4.]

5.5 Lämpötilan ja kosteuden mittaus ja säätö sekä ilmanvaihdon ohjaus

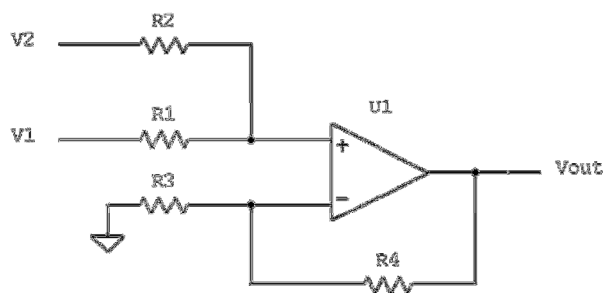
Sekä lämpötilaa että ilmentuusta mittaa sama anturi, GE Sensing CHIPCAP-L-50. Anturi on digitaalinen, jolloin pitkäkään anturin ja keskusyksikön välinen johto ei vääristä mittatulosta, kuten analogisten antureiden kohdalla on tapana käydä. Anturin toiminta-alue on riittävän laaja lämpötila-alueen ollessa -40 ... 85 °C ja suhteellisen ilmentuuden mittausalueen 0 ... 100 % RH. Anturi on myös riittävän tarkka. Suhteellisen ilmentuuden virhemarginaali on tyyppillisesti ±2.0 prosenttiyksikköä ja lämpöti-

lan virhemarginaali +25 °C lämpötilassa $\pm 0,6$ °C. Laite vertaa käyttäjän syöttämiä raja-arvoja mitattuihin arvoihin ja vertailun perusteella ohjaa pistorasioita kuten valaistuksen ohjauksessa. [24, s. 3, 4.]

5.6 pH-arvon mittaus

pH-arvo mitataan pH-elektrodilla. Elektrodi antaa tietyn jännitearvon mitattavan liuoksen pH-arvon mukaan. Laitteessa käytettävä elektrodi tuottaa 0 V, kun pH-arvo on 7. Jännite elektrodissa muuttuu 56 mV per kokonainen asteikon väli. Toisin sanoen pH-arvon ollessa 0 jännite elektrodin ulostulossa on -392 mV ja arvon ollessa 14 elektrodin ulostulossa on +392mV. Koska mikrokontrolleri ei pysty käsittelemään negatiivista jännitettä, täytyy mitattu jännite käsitellä niin, että mikrokontrolleri saa positiivisen jännitteen.

Luonnollisesti tämä jännite täytyy myös vahvistaa niin, että mikro-kontrollerin A/D-muuntimen sisääntulossa näkyy 0 ... 5 V. Kun pH-elektrodin signaali syötetään kuvan 14 ei-invertoivaan summaavaan vahvistimeen yhdessä 392 mV:n referenssijännitteen kanssa, saadaan signaalin alataso nostettua -392 mV:sta 0 V:iin. pH-arvoon vaikuttaa myös lämpötila. Tämä lämpötilasta aiheutuva mittavirhe voidaan korjata mikrokontrollerissa laskennallisesti, veden pH-arvon lisäksi mitataan myös sen lämpötila.



Kuva 14. Ei-invertoiva summaava vahvistin [25]

Ei-invertoivan summaavan vahvistimen siirtofunktiosta kaavassa 2 (ks. seur. s.) voidaan päätellä, että valitsemalla vastusten R_1 ja R_2 arvot yhtä suuriksi summattavien jännitteiden arvot puolittuvat.

$$V_{OUT} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_2 \right) \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \quad (2)$$

Vahvistimen ulostulossa tulee pH-arvolla 0 näkyä 0 V, kuten kaavassa 3 esitetään.

$$V_{OUT} = \left(\frac{1}{2} \cdot (-392 \text{ mV}) + \frac{1}{2} \cdot 392 \text{ mV} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) = 0 \text{ V} \quad (3)$$

pH-arvolla 14 ulostulo on kaavan 4 mukainen.

$$V_{OUT} = \left(\frac{1}{2} \cdot 392 \text{ mV} + \frac{1}{2} \cdot 392 \text{ mV} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) = 392 \text{ mV} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \quad (4)$$

Vastuksien R_3 ja R_4 välisellä suhteella määritetään vahvistimen vahvistus. Sijoitetaan kaavaan 4 ulostulojännitteeksi vaadittava 5 V. Kaavoissa 5 ... 8 johdetaan vastusten R_3 ja R_4 välisen suhteen kaava.

$$5 \text{ V} = 392 \text{ mV} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \quad (5)$$

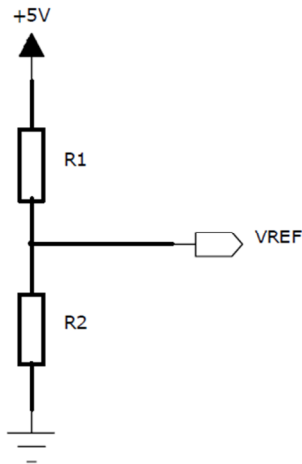
$$\rightarrow \frac{5 \text{ V}}{392 \text{ mV}} = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad (6)$$

$$\rightarrow \frac{5 \text{ V}}{392 \text{ mV}} - 1 = \frac{R_4}{R_3} \quad (7)$$

$$\rightarrow \left(\frac{5 \text{ V}}{392 \text{ mV}} - 1 \right) R_3 = R_4 \quad (8)$$

Päätetään vastusten R_1 ja R_2 arvoksi 10 k Ω ja vastuksen R_3 arvoksi 4,7 k Ω . Vastuksen R_4 arvoksi saadaan kaavalla 8 55,249 k Ω , joten vastuksena R_4 käytetään 100 k Ω :n säätövastusta. Tällöin vastusta säätämällä saadaan säädettyä myös mitattavan pH-alueen yläpäättä ja näin parannettua resoluutiota ja mittaustarkkuutta.

Kytkennässä tarvittava 392 mV:n referenssijännite saadaan käyttöjännitteestä kuvan 15 jännitteenjaolla.



Kuva 15. Jännitteenjako referenssijännitteelle

Referenssijännite on kuvassa 15 vastuksen R_2 yli vaikuttava jännite. Kaava 9 on jännitteenjaon kaava.

$$U_{REF} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{IN} \quad (9)$$

Tästä kaavasta saadaan ratkaistua kaava vastukselle R_1 . Se johdetaan kaavoilla 10 ... 14.

$$\frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{U_{IN}}{U_{REF}} \quad (10)$$

$$\rightarrow \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{R_2} = \frac{U_{IN}}{U_{REF}} \quad (11)$$

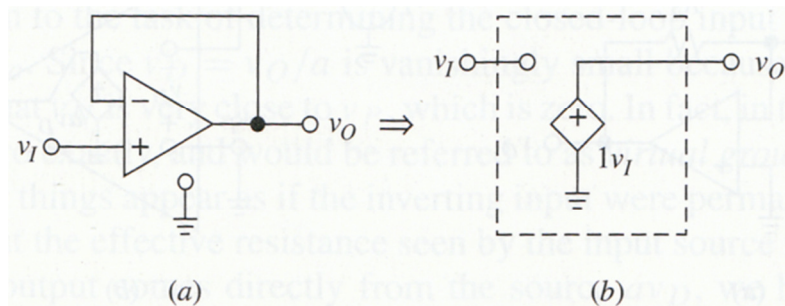
$$\rightarrow \frac{R_1}{R_2} + 1 = \frac{U_{IN}}{U_{REF}} \quad (12)$$

$$\rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{IN}}{U_{REF}} - 1 \quad (13)$$

$$\rightarrow R_1 = \left(\frac{U_{IN}}{U_{REF}} - 1 \right) R_2 \quad (14)$$

Vertaamalla kaavoja 8 (ks. edell. s.) ja 14 voidaan todeta, että ne ovat samat. Näin ollen voidaan valita samat vastusarvot, tässä tapauksessa vastuksen R_2 arvoksi 4,7 k Ω ja vastukseksi R_1 100 k Ω :n säätövastus. Kun referenssijännite on säätövastuksella sää-

dettävissä, voidaan mitattavan pH-alueen alapää säätää käyttäjän halutessa ylemmäs. Näin parannetaan mittausresoluutiota ja -tarkkuutta.

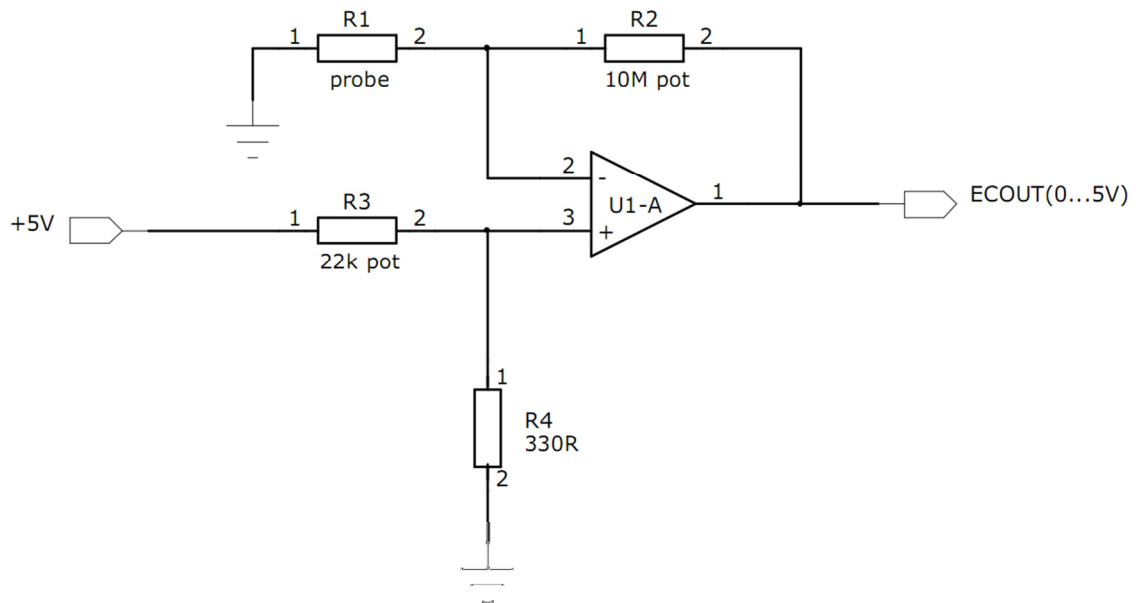


Kuva 16. Operaatiovahvistimella toteutettu jännitteenseuraja [25, s. 11]

Vastuksilla rakennettu referenssijännite vaikuttaa myös summaimen sisäänmenon resistanssiin. Koska on erittäin tärkeää, että summaimen sisäänmenojen vastusarvot ovat samat, täytyy referenssijännitepiirin ja summaimen sisäänmenovastuksen väliin lisätä jännitteenseuraja. Kuvassa 16 esitetyn, operaatiovahvistimella toteutetun jännitteenseurajan sisääntulo käyttäytyy kuin avoin piiri ja ulostulon impedanssi on 0Ω . Tämä tarkoittaa sitä, että jännitteenseuraja ei näy referenssijännitteelle ja summaimen kummassakin sisäänmenossa näkyy $10 \text{ k}\Omega$:n vastus. [15, s. 29; 25, s. 11, 12; 26; 27.]

5.7 Sähkönjohtavuuden mittaus

Laite mittaa kasteluveden - ja vesiviljelyssä vesialtaan - sähkönjohtavuutta. Koska sähkönjohtavuus on resistanssin käänteisluku, voidaan se mitata mittaamalla veden vastusarvo. Koska sähkönjohtavuusalueeksi halutaan $0 \dots 2 \text{ mS/cm}$, tarvitaan kytkentä, joka mittaa veden resistanssia alueella $500 \dots \infty \Omega$. Kuvassa 17 tämä on toteutettu ei-invertoivalla operaatiovahvistinkytkennällä.



Kuva 17. Sähkönjohtavuusanturin vahvistin

Ei-invertoiva operaatiovahvistin vahvistaa operaatiovahvistimen positiiviseen sisääntuloon syötetyn jännitteen kuvan 17 vastusten R_1 ja R_2 perusteella kaavan 15 mukaisesti.

$$U_o = U_i \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (15)$$

Kuvassa 17 ei-invertoivalle operaatiovahvistimelle syötetään vakiojännitettä, jonka vahvistus muuttuu vastuksena R_1 toimivan mittakärjen mukaan. Ulostulo kytketään mikrokontrollerin A/D-muuntimeen. Vahvistimen halutaan käyttäytyvän niin, että kun sähkönjohtavuus on 0 mS/cm, mikropiirin A/D-muunnin saa jännitearvon 0 V ja kun sähkönjohtavuus on 2 mS/cm, jännitearvo on 5 V. Tällöin koko A/D-muuntimen alue saadaan hyödynnettyä ja mittauksen resoluutio on mahdollisimman hyvä.

Kun sähkönjohtavuus on 0 mS/cm, vastuksen R_1 resistanssi on ääretön. Tällöin $V_o = V_i$. Säättämällä sisääntulojännite mahdollisimman pieneksi saadaan ulostuloonkin mahdollisimman pieni jännite. Vastukset R_3 ja R_4 mitoitetaan niin, että jännitteenjaolla sisääntuloon saadaan 0,1 V. Tällöin mikrokontrollerin 10-bittisen A/D-muuntimen resoluutioksi jää alle 2 μ S, kuten kaavassa 16 (ks. seur. s.) havainnollistetaan. Tämä tarkkuus on täysin riittävä.

$$\frac{2 \text{ mS}}{2^{10} \frac{5 \text{ V} - 0,1 \text{ V}}{5 \text{ V} - 0 \text{ V}}} = 1,993 \text{ } \mu\text{S} \quad (16)$$

Kun tiedetään, että referenssjännite on vastuksen R_4 yli vaikuttava jännite, voidaan jännitteenjaon kaavasta (kaava 9, s. 29) johtaa kaava vastukselle R_4 (kaava 17).

$$R_4 = \frac{R_3 \cdot U_{ref}}{U_i - U_{ref}} \quad (17)$$

Sisääntulojännite on 5 V ja referenssjännitteeksi halutaan 0,1 V. Päätetään vastuksen R_3 arvoksi 22 k Ω . Tällöin vastuksen R_4 arvoksi saadaan 448,98 Ω . Valitaan vastukseksi R_4 E-sarjan mukainen 330 Ω :n vastus ja korvataan vastus R_3 22 k Ω :n säätövastuksella. Näin referenssjännite saadaan viritettyä tarkasti 0,1 volttiin.

Kun sähkönjohtavuus on 2 mS/cm, halutaan vahvistimen sisääntulojännite vahvistaa niin, että ulostulossa näkyy 5 V. Tästä saadaan vahvistukseksi 50. Toisin sanoen kuvan 17 säätövastuksen R_2 tulee olla kaavan 15 mukaisesti 49-kertainen EC-proben mittamaan vastusarvoon verrattuna. Valitaan säätövastukseksi mahdollisimman iso vastus, jolloin laitteessa voidaan käyttää mahdollisimman montaa eri EC-probea. Olkoon R_2 arvoltaan 10 M Ω . [28, s. 77.]

5.8 Dataloki

Kasvatusmenetelmien parantamiseksi ja mahdollisten kasvatuksessa tapahtuneiden kömmähdyksien havainnollistamiseksi on usein tärkeää, että kasvatusolosuhteita voidaan analysoida jälkeenpäin. Tästä syystä laitteessa on datalokiominaisuus. Dataloki tallentaa mitatun datan yhdessä RTC-kellosta saadun aikaleiman kanssa joko laitteen sisäiseen *flash*-muistipiiriin tai ulkoiselle SD-kortille käyttäjän määrittämästä asetuksesta riippuen. Käyttäjä voi määrittää myös tallennusvälin. Kerätty data voidaan siirtää tietokoneella tarkasteltavaksi joko suoraan SD-kortilta tai laitteen USB-liitännän kautta.

Mikrokontrolleri käyttää tiedonsiirtoon sekä *flash*-muistipiiriin että SD-kortin kanssa SPI-väylää. Koska tietoa siirretään enemmän kuin yksi tavu kerrallaan, ei laitteita voida

ketjuttaa *daisy chain* -menetelmällä, vaan mikrokontrollerilta täytyy ottaa erikseen SS-linja jokaiselle SPI-väylän orjalaitteelle.

5.9 Näyttö

Laitteessa on graafinen näyttö, jonka kautta käyttäjä ohjaa laitetta ja lukee mitattua dataa. Datalokin ansiosta käyttäjä voi tarkastella kasvatusprosessin etenemistä laitteen näytölle piirtyvillä kuvaajilla mitatuista suureista. Näyttö on kosketusnäyttö, joten myös laitteen ohjaaminen tapahtuu näytön kautta.

5.10 Hälytys

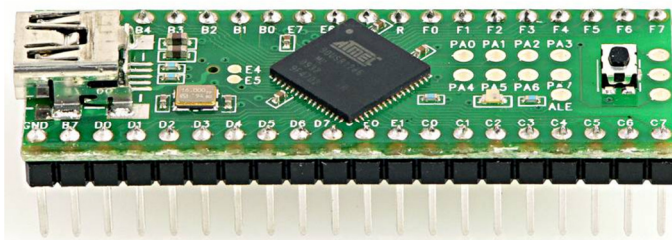
Laitteessa on paikallinen hälytys ledillä ja piezosummerilla. Hälytys laukeaa, kun jokin käyttäjän asettamista raja-arvoista ylitetään. Käyttäjä voi asettaa laitteen asetuksista, annetaanko hälytyksessä äänimerkkiä.

6 Testaaminen, käytännön ongelmat ja lopullinen toteutus

Työ oli opinnäytetyöksi laaja, eikä aika riittänyt lopulta toteutuksen saattamiseen valmiiksi. Osa laitteen toiminnoista, kuten kuvassa 21 (ks. s. 36) esitetty RTC-piiri, saatiin fyysisesti toteutettua ja suuri osa laitteen ohjelmistosta koodattua, mutta työn toteutuksessa ilmeni ongelmia, jotka lopulta söivät liikaa aikaa. Tällaisia ongelmia oli mm. ohjelmointialustan epävakaas sekä pH- ja EC-anturit, joiden kohdalla suunniteltu vahvistinpiiri toimi odotetusti, mutta anturit toimivat joko arvaamattomasti tai olivat kokonaan rikki, eikä niiltä voitu lukea järkeviä mittaustuloksia.

Toiminnan epävakaas oli täysin sattumanvaraista, sillä laitteen ohjelmisto saattoi kaataa käytännössä missä tahansa kohdassa, tai se saattoi olla kaatumattakin. Ongelmaan etsittiin ratkaisua koodista, mutta ainakaan raportin painoon mennessä ohjelmallista virhettä ei oltu löydetty. Myös joidenkin osien kuten hiilidioksidianturin löytäminen osoittautui haasteelliseksi ja aikaa vieväksi tehtäväksi. Tarjolla olevat edulliset hiilidioksidianturit eivät sovellu kasvihuonemittauksiin, sillä niiden mitta-alue alkaa usein 2000 ppm:stä, kun kasvihuoneen kannalta kiinnostava alue on 0 ... 2000 ppm. Kalliimpia vaihtoehtoja löytyi, mutta ne olivat aavistuksen liian kalliita.

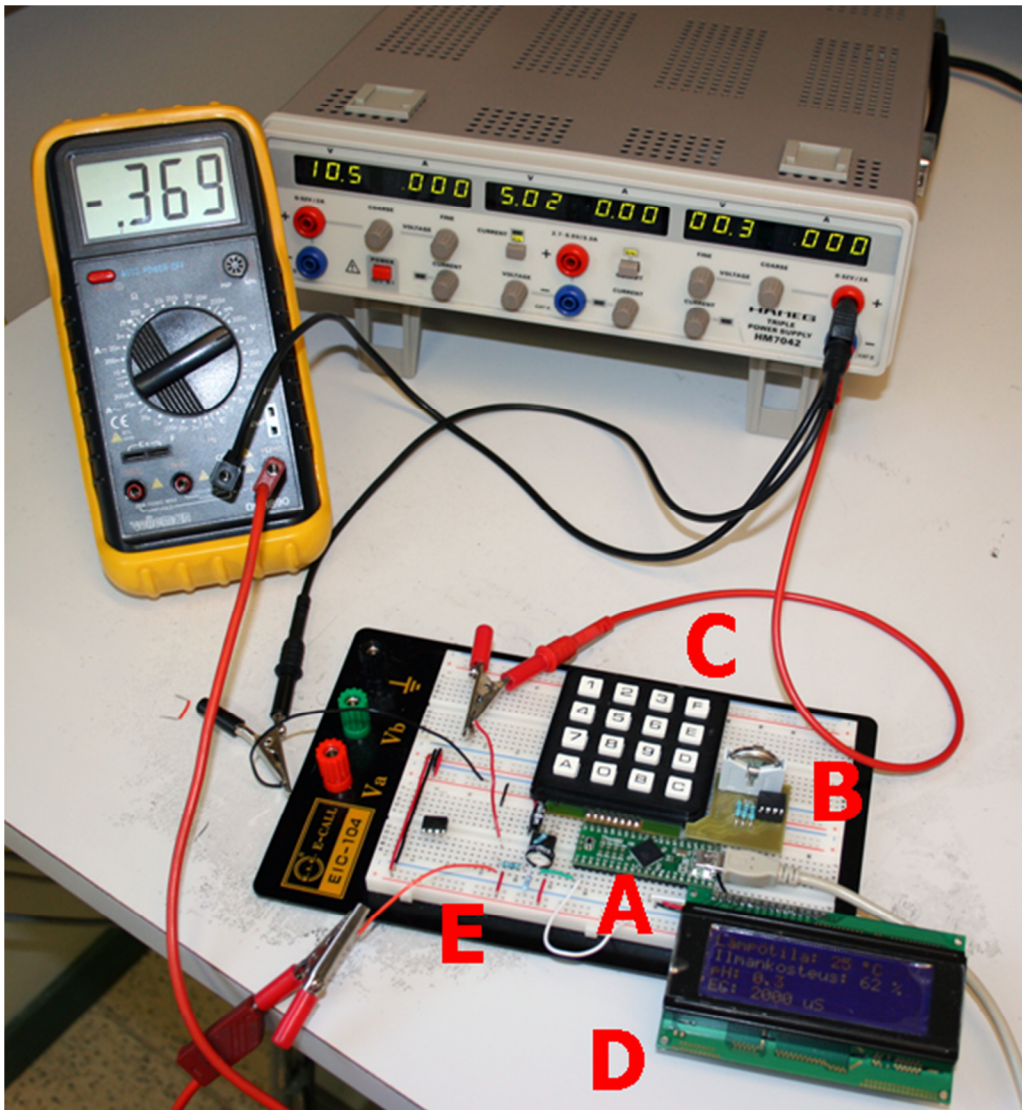
Ohjelmiston koodauksessa on käytetty C-kieltä ja koodia on testattu kuvassa 18 esitellyllä Teensy++ 2.0 -alustalla, jossa on mikrokontrollerina Atmel AT90USB1286. Myös ohjelmiston koodauksessa ilmeni toisinaan aikaa vieviä ongelmia jotka osaltaan hidastuttivat laitteen valmistumista.



Kuva 18. Teensy++ 2.0 -alusta [29]

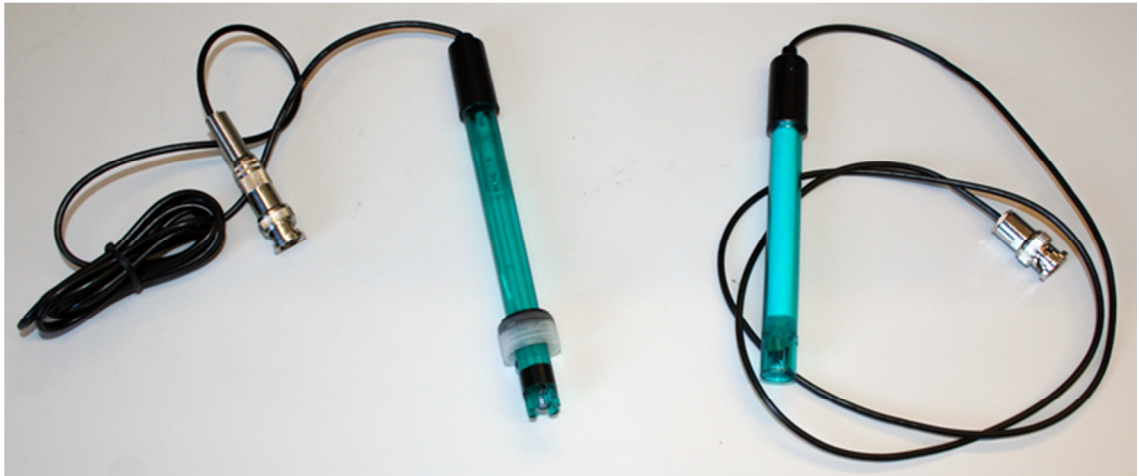
Anturit ja muut laitteeseen tulevat osat testattiin tai testataan liittämällä ne Teensy++ 2.0:aan koekytkentälevyllä. Kuvassa 19 (ks. seur. s.) on havainnollistettu laitteen tes-

tausta. Kuvassa on Teensy++ 2.0 (A), RTC-piiri (B), 4 x 4 matriisinäppäimistö (C) ja alphanumeerinen LCD-näyttö (D). Lisäksi kuvassa on käynnissä pH-anturille suunnitellun vahvistinpiirin (E) testi. Näppäinmatriisi ja LCD-näyttö toimivat väliaikaisratkaisuna jonka tulee korvaamaan varsinaisessa laitteessa graafinen kosketusnäyttö.



Kuva 19. Laitteen testausta

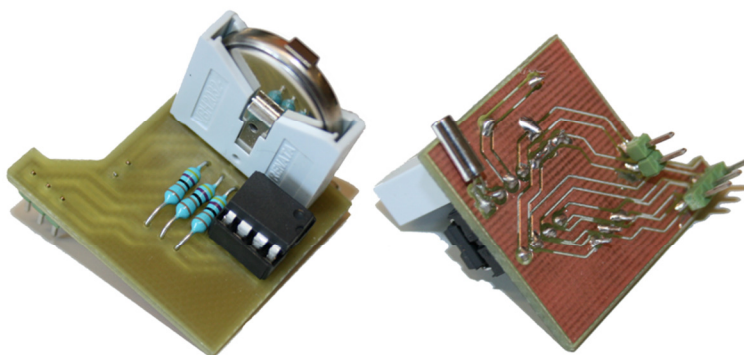
Kuvassa 19 nähdään, kuinka pH-elektrodin vahvistinkytkentä toimii. Kytkeentään syötetään -369 mV, ja laite antaa mitatuksi pH-arvoksi 0.3. Täytyy huomata, että vahvistimen säätövastuksia ei ole kalibroitu testiä varten.



Kuva 20. pH- (vas.) ja EC-anturi (oik.)

Kun kytkentään liitettiin kuvassa 20 vasemmalla esiintyvä pH-anturi, kytkentä ei toiminut lainkaan. pH-anturilta ei saatu minkäänlaista jännitesignaalia vahvistimella tai ilman. Mittausta yritettiin Teensyn, yleismittarin ja oskilloskoopin avulla.

Kuvassa 21 esiintyvä RTC-piiri on lopulliseen laitteeseen tuleva kytkentä, mutta levyn tämä versio on suunniteltu liitettäväksi koekytkentälevylle yhdessä Teensy++ 2.0 -alustan kanssa. Se ottaa käyttöjännitteensä koekytkentälevyn kiskosta ja liitetään suoraan Teensy++ 2.0:n I²C-väylään ilman hyppylankoja, kuten kuvassa 19 (ks. edell. s.) on tehty.



Kuva 21. RTC-piirin testilevy ylä- (vas.) ja alapuolelta (oik.)

Laite on tarkoitus koteloida kuvan 22 (ks. seur. s.) sähkökaappiin. Kaapin oveen tulee kosketus-näyttö, jonka kautta laitteen ohjaaminen tapahtuu. Kaapin alalaidassa on aukko, jonka läpi ohjattavat laitteet voidaan kytkeä kaapin sisälle tuleviin pistorasioihin.



Kuva 22. Laitteen kaappi

Laitetta ei ehditty saada valmiiksi raportin painoon mennessä. Tarkoituksena olisi saada ensin valmiiksi fyysiset testipiirit - kuten kuvan 21 RTC) lämpötila- ja kosteusanturin, pH- ja EC-vahvistimien sekä datalokin osalta. Datalokipiirilevy sisältää SD-muistikorttipaikan ja *flash*-muistipiirin. Samalla jatkuu edullisempien osien etsintä ja ohjelmistokoodin kirjoitus. Kun antureiden ja muiden elementtien ja testilevyjen toiminta on todettu, suunnitellaan lopullinen piirilevy. Lopullista piirilevyä ei kuitenkaan kannata tai voida toteuttaa ennen kuin kaikki halutut komponentit on löydetty. Jotta ohjelmistosta tulisi aidosti helppokäyttöinen ja looginen, on sen kehitystä jatkettava fyysisen laitteiston valmistuttua käytännön kasvatustoiminnan aikana.

Sähköturvallisuuteen ja lupiin liittyvien seikkojen johdosta luvussa 5.1 suunniteltu tasajännitelähde tullaan korvaamaan laitteen tässä versiossa valmiilla jännitelähteellä. Lisäksi tämän version lopullisessa piirilevyssä tulee olla liitäntä myös GSM-moduulille (USART) sekä tässä vaiheessa käyttämättä jääville mikrokontrollerin AD-muuntimille ja muille I/O-porteille, jotta jatkossa laitteeseen olisi mahdollisimman helppo liittää lisäominaisuuksia.

7 Laitteen jatkokehittely

Laitteeseen on tarkoitus kehittää lisäominaisuuksia ja siitä on tarkoitus kehittää useampia malleja:

- GSM-moduulin laajempi käyttö ja hyödyntäminen: Tekstiviestihälytysominaisuuden lisäksi laitteeseen on kehitteillä ainakin mahdollisuus käyttää tekstiviestejä laitteen ohjaukseen: tiedustella laitteelta mitattuja minimi-, maksimi-, keski-, tai reaaliaikaisia arvoja tai muuttaa asetusarvoja. Myös moduulin 3G-ominaisuuksia voisi hyödyntää mahdolliseen käyttöliittymään, jossa myös mm. datalokia tai webkamerakuvaa kasvatustilasta voi seurata reaaliajassa sekä matkapuhelimella että tietokoneella.
- Versio, jossa antureiden ja keskusyksikön välinen kommunikaatio tapahtuu langattomasti (ZigBee).
- Versio, jossa on Ethernet-liitäntä ja tätä kautta mahdollisuus laitteen hallintaan joko lähiverkossa tai internetissä.
- Integroimalla webkamera järjestelmään saadaan järjestelmän etäkäyttöön luotettavuutta, kun käyttäjällä on raajan mitatun datan lisäksi myös visuaalinen yhteys kasvatustilaan.
- Bluetooth?
- Varsinaisen järjestelmän rinnalle mahdollista kehittää laitteita säätämään mm. vedenpinnankorkeutta ja ilmankosteutta tuoteperheeksi tai yhdeksi kokonaisvaltaiseksi ratkaisuksi hoitamaan koko kasvatusprosessin.

Varsinaisen laitteen kehittämisen lisäksi tärkeää olisi tietokonepohjaisen sovelluksen kehittäminen. Laitteen datalokin keräämä mittadata siirretään tietokoneelle joko USB-liitännällä tai verkossa, ja tietokoneohjelma laatii siitä mm. kasvatuspäiväkirjaa ja graafisia esityksiä. Ohjelman kasvatuspäiväkirjassa voisi olla myös ns. opastava ominaisuus. Käyttäjä voisi syöttää ohjelmaan kasvattamansa kasvin tiedot, kuten lajin ja lajikkeen sekä käytetyn kasvatusmenetelmän ja ohjelma hakisi joko ohjelman sisäisestä tai internetpohjaisesta tietokannasta optimi- ja raja-arvot, kasvukausien pituudet ja muun tarvittavan tiedon. Käyttäjä voisi myös itse luoda ohjelmaan profiiliin haluamillaan arvoilla tai muokata olemassa olevia profiileja ja arvoja.

Samoin ohjelmassa voisi olla tietopankkinsa eri ravinteista ja näin ohjelma voisi opastaa käyttäjää annostelevaan käytössä olevaa ravinneliuosta oikean määrän eri kasvuvaiheissa. Internetpohjaisessa ratkaisussa etuna olisi mahdollisuus yhteisölliseen toimintaan: Käyttäjät voisivat lukea ja tutkia toistensa jakamia kasvatuspäiväkirjoja ja levittää esim. hyväksi havaittuja arvoja ja menetelmiä.

8 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa ominaisuuksiensa, käytettävyytensä ja hintansa puolesta harrastuskäyttöön soveltuva kasvihuoneenohjausjärjestelmä, joka mittaa kasvihuoneessa tai sisäpuutarhassa kaikki kasvin kasvuun vaikuttavat suureet, vertailee niitä käyttäjän asettamiin raja-arvoihin ja ohjaa erillisiä säätölaitteita vertailun perusteella. Lisäksi järjestelmän tuli sisältää hälytys- ja datalokitoiminnot.

Alkuperäisenä suunnittelulähtökohtana oli suunnitella kasvien kasvatuksessa apuna toimiva laite puutarha-alaa opiskelevalle ja harrastavalle ystävälle, mutta aihe vaikutti niin hyvältä, että siitä tuli opinnäytetyö. Samalla pitkän visioinnin tuloksena laitteeseen kaavailut ominaisuudet lisääntyivät ja monimutkaistuivat. Lopulta suunnitteilla oli järjestelmä, joka olisi ominaisuuksiltaan ja hinnaltaan niin kilpailukykyinen, että sitä voisi markkinoida harrastelijoille ja sen ympärille voisi jopa perustaa yrityksen.

Tämä johti auttamatta siihen, että järjestelmä oli lopputyöksi aivan liian laaja, ja aihetta olisi joko pitänyt rajata tai laitetta yksinkertaistaa. Toisaalta pitkän ideointi- ja kypsyttelyajan ansiosta moni seikka järjestelmässä on keritty miettimään pidemmälle, useampaan kertaan tai suunnittelemaan jopa kokonaan uudestaan ja tätä kautta järjestelmästä on karsiutunut pois monia suunnittelun heikkouksia jo ennen prototyypin valmistumista. Toisin sanoen valmistuessaan laite tulee olemaan parempi kuin mitä se olisi ollut valmistuessaan ajallaan.

Laitteen toteutus jäi kesken osittain siksi, että edellä mainittuja toimenpiteitä ei tajuttu tehdä riittävän ajoissa ja osaksi käytännön toteutuksessa ilmenneiden aikaa vievien ja osittain täysin arvaamattomien ja yllättävien ongelmien ja hidasteiden takia. Toteutus on kuitenkin raportin painoon mennessä hyvässä vauhdissa ja järjestelmä valmistunee viimeistään syksyllä.

Kun suurin osa kaavailuista komponenteista on hankittu, järjestelmästä vaikuttaa olevan tulossa hintansa puolesta riittävän edullinen valmistaa, jotta sitä olisi mielekästä markkinoida harrastajille. Tosin järjestelmä on hieman alkuperäisiä kaavailuja kalliimpi. Ominaisuuksiensa ja käytettävyytensä puolesta järjestelmää on mahdotonta arvioida ennen kuin laite on fyysisesti valmis ja käytössä. Kuitenkin järjestelmä vaikuttaa val-

miiden osiensa osalta lupaavalta ja sen jatkokehittäminen tuntuu järkevältä. Jatkokehittelyyn jää mm. erilaiset langalliset ja langattomat etäohjaus- ja -valvontamenetelmät ja anturien tekeminen langattomiksi.

Lähteet

- 1 Alm, Gustaf & Palmstierna, Inger. Kasvihuonekirja. Porvoo: WSOY, 1995.
- 2 Diffusion and Osmosis. (WWW-dokumentti.) The Biology Corner.
<<http://www.biologycorner.com/bio1/diffusion.html>>. Luettu 20.12.2010.
- 3 Van Patten, George F. Gardening Indoors with Soil & Hydroponics. Van Patten Publishing, 2008.
- 4 Koivunen, Taina (toim.). Tehokkaasti kasvihuoneesta. Helsinki: Opetushallitus, 1997.
- 5 Kasvin osat. (WWW-dokumentti.) Ruokatieto.
<http://opetus.ruokatieto.fi/Suomeksi/Nuoret/Luonto/Kasvien_biologiaa/Kasvin_osat>. Luettu 19.4.2010.
- 6 Yhteyttäminen ja hengitys. (WWW-dokumentti.) Ruokatieto.
<http://opetus.ruokatieto.fi/Suomeksi/Nuoret/Luonto/Kasvien_biologiaa/Yhteyttaaminen_ja_hengitys>. Luettu 19.4.2010.
- 7 Kasvien vedenotto. (WWW-dokumentti.) Ruokatieto.
<http://opetus.ruokatieto.fi/Suomeksi/Nuoret/Luonto/Kasvien_biologiaa/Kasvien_vedenotto>. Luettu 20.12.2010.
- 8 CO2 Now – CO2 Home. (WWW-dokumentti.) Pro Oxygen.
<<http://co2now.org>>. Luettu 2.5.2010.
- 9 E. James, Knoxfield. Agriculture Notes, Testing and interpretation of salinity and pH (AG0244). State of Victoria, Department of Primary Industries, 1995.
- 10 I²C-bus specification and user manual, Rev. 03 – 19 June 2007. Datalehti. NXP Semiconductors, 2007.
- 11 I2C Tutorial. (WWW-dokumentti.) Robot Electronics. <http://www.robot-electronics.co.uk/acatalog/I2C_Tutorial.html> . Luettu 26.4.2011.
- 12 The I²C-bus Specification, version 2.1. Datalehti. Philips Semiconductors, 2000.
- 13 Serial Peripheral Interface Bus. (WWW-dokumentti.) Wikipedia.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus>. Luettu 6.5.2011
- 14 SPI Interface in embedded systems. (WWW-dokumentti.) EE Herald.
<<http://www.eeherald.com/section/design-guide/esmod12.html>>. Luettu 6.5.2011.

- 15 Silvonen, Kimmo. Sähkötekniikka ja elektroniikka. 3., korjattu painos. Helsinki: Hakapaino Oy, 2005.
- 16 Glossary of Terms: Bridge Rectifier. (WWW-dokumentti.) TDK-Lambda. <http://de.tdk-lambda.com/public/kb_glossary_results.aspx?index=B>. Luettu 6.5.2011.
- 17 Wapedia - File: Smoothed Ripple.svg. (WWW-dokumentti.) Wapedia. <http://wapedia.mobi/en/File:Smoothed_ripple.svg>. Luettu 6.5.2011.
- 18 KA78XX/KA79XX 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator. Rev. 1.0.0. Datalehti. Fairchild Semiconductor, 2001.
- 19 Atmel AT90USB646/AT90USB647/AT90USB1286/AT90USB1287, versionumero 7593K-AVR-11/09. Datalehti. Atmel, 2009.
- 20 I²C-bus: TWI-bus. (WWW-dokumentti.) Telos EDV Systementwicklung GmbH. <<http://www.i2c-bus.org/twi-bus>>. Luettu 21.1.2010.
- 21 Maxim DS2482-100, Rev 8. Datalehti. Maxim Integrated Products, 2009.
- 22 Maxim DS1307, REV: 100208. Datalehti. Dallas Semiconductor, 2008.
- 23 Sharp S202S02, Sheet No.: D4-A02401EN. Datalehti. Sharp Corporation, 2004.
- 24 ChipCap – The Fully Calibrated Humidity and Temperature Solution. Datalehti. GE Sensing, 2008.
- 25 Franco, Sergio. Design with operational amplifiers and analog integrated circuits. 3rd ed., international ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2002.
- 26 How to Derive the Summing Amplifier Transfer Function. (WWW-dokumentti.) Mastering Electronics Design. <<http://masteringelectronicsdesign.com/how-to-derive-the-summing-amplifier-transfer-function/>>. Luettu 29.3.2011.
- 27 Donofrio, Bill. Convert your DMM to a pH meter. EDN, October 17, 2002, s. 96.
- 28 Sedra, Adel S. & Smith, Kenneth C. Microelectronic Circuits. Fifth edition. New York: Oxford University Press, 2004.
- 29 PJRC Store: Teensy++ USB Development Board. (WWW-dokumentti.) PJRC. <http://www.pjrc.com/store/teensypp_pins.html>. Luettu 10.5.2011.