

Joel Kattelus

# Apuvälinehiireen liitettävän silmänräpäyskytkimen suunnittelu ja toteutus

---

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

24.4.2018

|  |  |
|--|--|
| Tekijä<br>Otsikko  | Joel Kattelus<br>Apuvälinehiireen liitettävän silmänräpäyskytkimen suunnittelu ja toteutus |
| Sivumäärä<br>Aika  | 46 sivua + 3 liitettä<br>24.4.2018   |
| Tutkinto   | Insinööri (AMK)  |
| Tutkinto-ohjelma   | Sähkö- ja automaatiotekniikka  |
| Ammatillinen pääaine   | Elektroniikka  |
| Ohjaajat   | Yliopettaja Matti Fischer<br>Toimitusjohtaja Jussi Kujanpää                                |
| <p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa infrapuna-anturiin perustuva silmänräpäyskytkimen prototyyppi Quha Zono -apuvälinehiirelle. Työssä tutkittiin myös infrapunasäteilyn ominaisuuksia, sekä erityisesti sen turvallisuutta ja mahdollisia vaikutuksia silmään.</p> <p>Apuvälinehiirellä voidaan liikuttaa tietokoneen kohdistinta pään tai muun raajan liikkeiden avulla ilman fyysistä kontaktia. Napsautus voidaan toteuttaa erilaisilla lisälaitteilla, kuten puhalluskytkimellä tai viiveklikkauksella.</p> <p>Työn lähtökohtana oli olemassa olevan infrapuna-anturitekniikan soveltaminen silmänräpäyksen tunnistamiseen. Suunnittelun pääkriteereitä olivat pieni koko ja virrankulutus sekä varmatoimisuus.</p> <p>Infrapuna-anturi toteutettiin käyttämällä infrapunalediä sekä fototransistoria. Fototransistori mittaa silmältä takaisin heijastuvan infrapunavalon voimakkuutta, ja muodostaa sen mukaan päätelaitteelle käskyn klikkaustapahtuman suorittamisesta. Heijastuksen voimakkuus muuttuu silmän tilan mukaan.</p> <p>Infrapuna-anturilta tulevaa dataa käsiteltiin ohjelmoidulla PIC mikro-ohjaimella. Mikro-ohjaimelle suunniteltiin C-kielellä toteutettava ohjelma, joka sisälsi silmän tilaa seuraavan pääohjelman, sekä kalibrointifunktion, jolla kytkin on mahdollista kalibroida aina käytön alkaessa.</p> <p>Työn tuloksena oli valmis prototyyppi silmänräpäyskytkimestä, jonka kehittämistä ja tuotteistamista on tarkoitus jatkaa insinööriyön päätyttyä.</p> |  |
| Avainsanat   | apuvälinehiiri, infrapunasäteily, piirilevysuunnittelu, mikro-ohjain                       |

|   |  |
|---|--|
| Author<br>Title   | Joel Kattelus<br>Design and Execution of an Eyeblink Detector for a Gyroscopic Mouse |
| Number of Pages<br>Date   | 46 pages + 3 appendix<br>24 April 2018   |
| Degree  | Bachelor of Engineering  |
| Degree Programme  | Electrical and Automation Engineering  |
| Professional Major  | Electronics  |
| Instructors   | Matti Fischer, Principal Lecturer<br>Jussi Kujanpää, Managing Director               |
| <p>The purpose of this thesis work was to design and conceptualize an infrared sensor based eyeblink detector for Quha Zono -gyroscopic computer mouse. Additionally, the basic characteristics of the infrared radiation are presented, with evaluation of the safety of the radiation to the eye.</p> <p>Gyroscopic mouse allows the user to move the cursor using only movements of the head or some other limb. The clicking can be executed with different attachments, such as a puff switch or delayed clicking function.</p> <p>The starting point of this work was to apply the existing infrared sensor technology for detecting the eyeblink.</p> <p>Infrared sensor was implemented using an infrared LED and a phototransistor. The phototransistor measures the reflection coming back from the eyes surface or an eyelid, depending on the state of the eye. Using the measurement data, the sensor then produces an output for the Zono mouse to execute the clicking event. A prototype PCB was then designed and built using Autodesk Eagle PCB design software.</p> <p>A PIC microcontroller was used to process the data coming from the infrared sensor. A C-based program was written for the microcontroller, which included a main program monitoring the state of the eye, and a calibration function which can be run any time when deploying the eyeblink detector.</p> <p>The result of this work was a working prototype of an eyeblink detector, of which further development and productization will continue in the future.</p> |  |
| Keywords  | infrared, microcontroller, sensor, PCB design  |

## Sisällys

|     |                                       |    |
|-----|---------------------------------------|----|
| 1   | Johdanto                              | 1  |
| 2   | Quha Zono -apuvälinehiiri             | 2  |
| 3   | Infrapunasäteily                      | 4  |
| 3.1 | Infrapuna-anturi                      | 5  |
| 3.2 | Infrapunasäteilyn vaikutukset silmään | 8  |
| 3.3 | Säteilylle altistumisen raja-arvot    | 12 |
| 3.4 | Esimerkkilaskutoimitukset             | 16 |
| 4   | Piirilevyn suunnittelu ja toteutus    | 20 |
| 4.1 | Infrapuna-anturin suunnittelu         | 21 |
| 4.2 | Komponenttien vertailu ja valinta     | 23 |
| 4.3 | Piirilevyn suunnittelu                | 27 |
| 5   | Ohjelman suunnittelu ja toteutus      | 29 |
| 5.1 | Mikro-ohjain                          | 29 |
| 5.2 | Silmänräpäyskytkimen ohjelma          | 30 |
| 5.3 | Virrankulutukseen vaikuttavat tekijät | 37 |
| 6   | Prototyypin testaaminen               | 40 |
| 7   | Yhteenveto                            | 43 |
|     | Lähteet                               | 45 |
|     | Liitteet                              |    |
|     | Liite 1 Prototyypilevyn piirikaavio   |    |
|     | Liite 2 Kuvat piirilevyistä           |    |
|     | Liite 3 Prototyypilevyn virrankulutus |    |

## Lyhenteet ja käsitteet

|                           |  |
|---------------------------|--|
| A/D                       | <i>Analog to Digital.</i> Analogia-digitaalimuunnin.   |
| ACGIH                     | <i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists.</i> Amerikkalainen työhygieenikkojärjestö.                   |
| Bolometri                 | Laite jolla mitataan sähkömagneettisen säteilyn tehoa.   |
| Datalehti                 | Dokumentti joka tiivistää komponentin tekniset ominaisuudet ja toiminnot.  |
| Elohopealämpömittari      | Nestepohjainen lämpömittari jonka mittanesteenä käytetään elohopeaa.   |
| Fotokemiallinen reaktio   | Valon aiheuttama kemiallinen reaktio.  |
| Fotoni                    | Fotoni eli valokvantti on sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen.   |
| Gyroskooppi               | Laite, jolla voidaan mitata kulmanopeutta.   |
| I/O                       | <i>Input/Output.</i> Sisään- ja ulostulo.  |
| ICNIRP                    | <i>International Commission for Non-Ionizing Radiation Projection.</i> Kansainvälinen ionisoimattoman säteilyn toimikunta. |
| Infrapunasäteily          | Ihmissilmälle näkymätöntä lämpösäteilyä.   |
| IR                        | <i>Infrared.</i> Infrapuna.  |
| IR-LED                    | <i>Infrared Light Emitting Diode.</i> Infrapunavaloa säteilevä loistediodi.  |
| Ksenonlamppu              | Erittäin kirkasta valoa tuottava kaasupurkauslamppu.   |
| Lasiprisma                | Optinen laite jolla voidaan hajottaa valoa valospektrin väreihin.  |
| LED                       | <i>Light Emitting Diode.</i> Loistediodi.  |
| Operaatiovahvistin        | Komponentti joka vahvistaa kahden sisääntulonsa välistä jänniteeroa tietyllä vahvistuskertoimella.                         |
| Oskillaattori             | Yleisnimitys kaikille jaksollisesti värähteleville järjestelmille.   |
| SMD                       | <i>Surface-Mount Device.</i> Pintaliitoskomponentti.   |
| Sähkömagneettinen säteily | Valonnopeudella tyhjiössä etenevää jaksottaista sähkö- ja magneettikentän värähtelyä.                                      |
| USB                       | <i>Universal Serial Bus.</i> Universaali sarjaväyläarkkitehtuuri.  |
| UV                        | <i>Ultraviolet.</i> Ultravioletti.   |
| Valosähköinen ilmiö       | Ilmiö jossa metalliin osuva valo saa elektroneja irtoamaan metallista.   |
| VIA                       | <i>Vertical Interconnect Access.</i> Läpivienti jolla voidaan liikkua piirilevyn eri kerrosten välillä.                    |

## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoitteena oli konseptoida Quha Zono -apuvälinehiireen liitettävän silmänräpäyskytkimen prototyyppi, sekä luodun konseptin testaaminen järjestelmätasolla. Suunniteltavan konseptin pääkriteereitä olivat pieni ja kevyt koko, pieni virrankulutus sekä varmatoimisuus. Konseptoinnin keinoja olivat teoriaustan selvittäminen, piirilevysuunnittelu sekä ohjelmointi. Tavoitteena oli valmis prototyyppi jonka kehitystä ja tuotteistamista voidaan jatkaa insinööriyön valmistuttua. Työ tehtiin toimeksiantona Quha Oy:lle.

Quha Zono -apuvälinehiirellä voidaan liikuttaa tietokoneen kohdistinta ilman käsiä esimerkiksi pään liikkeillä. Silmänräpäyskytkin mahdollistaisi hiiren napsautuskomennon muodostamisen apuvälinehiirelle silmää räpäyttämällä ilman fyysistä kontaktia. Silmänräpäyskytkin olisi erityisesti hyödyllinen käyttäjille, jotka eivät fyysisestä rajoitteesta johtuen kykene käyttämään fyysisiä painikkeita. Infrapunatekniikalla toteutettu kytkin voi mahdollistaa käytön myös muillakin keinoilla, kuten tunnistamalla posken tai suun liikkeitä. Infrapunasäteilyyn perustuvia katseohjainjärjestelmiä on kehitelty ennenkin esimerkiksi ajoneuvojen turvallisuuden parantamiseksi. Tässä työssä kehitettiin silmän välittömään läheisyyteen sijoitettava anturi, jota ohjataan ohjelmoitavalla mikro-ohjaimella.

Työn kirjallinen raportti koostuu teoriaosuudesta sekä teknisestä toteutuksesta kertovista luvuista. Seuraavassa luvussa esitellään lyhyesti apuvälinehiiri, johon silmänräpäyskytkin ollaan suunnittelemassa. Kolmannessa luvussa käydään läpi infrapunasäteilyn turvallisuutta ja sen mahdollisia vaikutuksia silmään. Järjestelmän turvallisuutta arvioidaan käyttäen nykyisistä voimassaolevista turvallisuusohjeista saatavilla olevia säteilyn raja-arvoja. Neljäs ja viides luku kuvailevat silmänräpäyskytkimen suunnittelun vaiheita piirilevysuunnittelun ja ohjelmallisen toteutuksen kannalta.

## 2 Quha Zono -apuvälinehiiri

Quha Zono on suomalaisen Quha Oy:n kehittämä langaton apuvälinehiiri (kuva 1). Se on kehitetty mahdollistamaan sujuva tietokoneen käyttö erityisesti henkilöille, jotka eivät fyysisestä rajoitteesta johtuen pysty käyttämään tavallista tietokonehiirtä. Apuvälinehiiri on mahdollista asettaa erilaisten kiinnikkeiden avulla käyttäjän päähän, ranteeseen, jalkaan tai mihin tahansa muuhun sopivaan paikkaan. Laitteen toiminta perustuu gyroskooppiin, joka mahdollistaa kohdistimen liikuttamisen seuraamalla käyttäjän pään tai raajan liikkeitä. Laite toimii kaikilla tietokoneilla ja se on mahdollista liittää myös Android-laitteeseen, kuten tablettiin tai älypuheliimeen. [1.]



Kuva 1. Quha Zono apuvälinehiiri [1].

Quha Zoonon kytkettävillä lisälaitteilla voidaan helpottaa apuvälinehiiren käyttöä erityisesti käyttäjille, joilla on erilaisia fyysisiä rajoitteita. Lisälaitteet mahdollistavat napsautuksen eli kohdistimen osoittaman kohteen valitsemisen Quha Zonolla monella eri tavalla. Esimerkiksi puhalluskytkimellä (kuva 2, s.3) on mahdollista suorittaa napsautus kontaktittomasti puhaltamalla suun eteen asetettavaan mikrofoniin kaltaiseen anturiin. Puhalluskytkin on saatavilla myös suuhun asetettavalla pillillä. Myös erilaisia fyysisiä painikkeita on saatavilla käytettäväksi esimerkiksi jalalla tai sormella. Viivenapsautuksella voidaan nimensä mukaisesti tehdä viiveellä tapahtuva napsautus. Viivenapsautus aktivoituu, kun kohdistinta pidetään määrätyn

aikaa paikallaan. [1.]



Kuva 2. Quha Zono yhdistettynä Sento puhalluskytkimeen [1].

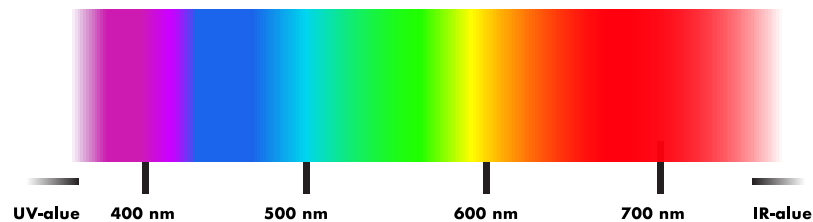
Insinööriyön alkuperäisessä suunnitelmassa ehdotettiin silmänräpäyskytkimen suunnittelua hyödyntäen infrapuna-anturia. Ajatus infrapuna-anturin käytöstä perustuu infrapunavalon heijastumiseen eri tavalla sarveiskalvolta ja silmäluomelta. Hypoteesi on, että sarveiskalvo heijastaa valoa voimakkaammin kuin silmäluomi sen väristä ja kosteasta pinnasta johtuen. Tällöin suljettaessa silmä takaisin heijastuneen infrapunavalon voimakkuus muuttuisi, ja tätä voimakkuuden muutosta voitaisiin lukea visuaalisella sensorilla kuten fotodiodilla tai -transistorilla. Toisenlainen ratkaisu voisi olla esimerkiksi kamera, joka seuraa silmien liikettä. Kameran käyttö kuitenkin todennäköisesti vaatisi suurta laskentatehoa ja prosessointia kuvan tulkitsemiseksi, mikä ei välttämättä sovellu kovin hyvin pienikokoiseen mukana pidettävään laitteeseen. Infrapunasensoria myös käytetään monessa vastaavalla tavalla toimivassa laitteessa, ja se olisi myös todennäköisesti kameraa edullisempi ratkaisu. Infrapuna-anturin käyttö mahdollistaisi kytkimen käytön myös muillakin keinoilla, kuten esimerkiksi tunnistamalla posken tai suun liikkeitä. Varsinaisia silmänräpäyskytkimiä tai -tunnistimia on kehitetty ennenkin, mutta ne ovat olleet suurikokoisia tai muuhun tarkoitukseen suunniteltuja. Seuraavassa luvussa käydään läpi tarkemmin infrapunasäteilyn ominaisuuksia ja sitä, mitä



tulee ottaa huomioon silmän lähelle sijoitettavaa anturia suunniteltaessa.

### 3 Infrapunasäteily

Ihminen on koko olemassaolonsa ajan altistunut optiselle säteilylle joko esimerkiksi auringon, tulen tai muun lämpösäteilyn vaikutuksesta. Infrapunasäteilyn eli IR-säteilyn (IR) tieteellinen tutkiminen aloitettiin kuitenkin vasta 1800-luvulla, kun Sir William Herschel alkoi tutkimaan auringon säteilystä heijastetun värispektrin lämpötehoa. Herschel heijasti värispektrin pöydälle lasiprisman avulla ja mittasi heijastuneiden värien (kuva 3) lämpötilaa elohopealämpömittarilla. Tulokset osoittivat, että mitattaessa violettia sekä punaista värispektrin aluetta lämpötila nousi. Herschel myös päätteli, että punaisen spektrin jälkeen värispektrissä esiintyi ”näkyvätöntä valoa”, joka myöhemmin nimettiin infrapunasäteilyksi. Hän myös osoitti, että tämä näkyväntön valo heijastui ja taittui samaan tapaan näkyvän valon kanssa. [2, s. 5–6.]



Kuva 3. Näkyvän valon spektri [3, (mukaillen)].

Alkuvaiheessa infrapunasäteilyn tutkimukset olivat erittäin epätarkkoja. Mittaus- tekniikka ja tutkimustarkkuus paranivat huomattavasti 1880-luvulla, kun bolometri, sähkömagneettisen säteilyn tehoa mittaava laite, keksittiin. Infrapunasäteilyn tutkimukset edistyivät edelleen 2000-luvulla, kun infrapunaspektriä opittiin luonnehtimaan huomattavasti tarkemmin käyttäen hyödyksi valosähköistä ilmiötä. [2, s. 5-6.]

Infrapunasäteily on sähkömagneettisen säteilyn osa-alue, jonka aallonpituus ulot-

tuu näkyvästä punaisesta valosta (700 nm) mikroaaltotasolle (1 mm) saakka. Kaikki kohteet lähettävät jonkinasteista infrapunasäteilyä eri voimakkuudella lämpötilan funktiona. Jos kohde on tarpeeksi kuuma, se voi tuottaa myös näkyvää valoa, kuten esimerkiksi liekki, jossa eri lämpötilat visualisoituvat eri väreinä. Myös ihmisen iho säteilee infrapunavaloa, mutta sen lämpö ei riitä näkyvän valon tuottamiseen. Ihon säteilemää infrapunasäteilyä on kuitenkin mahdollista tarkastella lämpökameran avulla. Infrapunasäteilyn aallonpituus on pidempi kuin näkyvän valon, ja se on siten näkymätöntä ihmissilmälle. [4.]

Infrapunasäteily voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen taulukon 6 mukaisesti [5].

Taulukko 1. Infrapunasäteilyn osa-alueet

| Säteily                | Lyhenne | Aallonpituus              |
|------------------------|---------|---------------------------|
| lähi-infrapunasäteily  | IR-A    | 780—1 400 nm              |
| keski-infrapunasäteily | IR-B    | 1 400—3 000 nm            |
| kaukoinfrapunasäteily  | IR-C    | 3 000 — $1 \cdot 10^6$ nm |

Infrapunasäteilyä hyödynnetään tekniikassa moniin eri käyttötarkoituksiin. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi tietokonehiiri, kaukosäädin, liiketunnistin, lämpökamera sekä erilaiset lämmittimet [6]. Esimerkiksi kaukosäätimessä on infrapuna LED, jolla lähetetään binäärimuotoinen nopea pulssisarja television vastaanottimelle. Televisiossa on vuorostaan infrapunavastaanotin, joka tunnistaa tietyllä taajuudella lähetetyn infrapunasäteilyn ja tulkitsee kaukosäätimen lähettämän binäärisarjan.

### 3.1 Infrapuna-anturi

Infrapuna-anturilla eli IR-anturilla on mahdollista mitata esimerkiksi kohteen etäisyyttä, liikettä tai lämpötilaa. Se koostuu yleensä kahdesta pääkomponentista, jotka ovat infrapunavaloa lähettävä loistediodi IR-LED ja vastaanottimena toimiva fotodiodi tai -transistori. [7.]

## Loistediodi

Loistediodi tai LED on yksinkertainen puolijohdekomponentti, joka lähettää näkyvää tai näkymätöntä säteilyä johdettaessa siihen sähkövirtaa. Loistediodissa puolijohteen materiaali ja käytettävä pinnoite määräävät säteilyn aallonpituuden. Perinteinen näkyvää valoa lähettävän loistediodin spektri on aallonpituusalueella 450–650 nm. Näkymätöntä infrapunasäteilyä lähettävän IR-ledin spektri on yleensä alueella 800–1 500 nm. [5.]

## Fotodiodi

Fotodiodi on puolijohdekomponentti, joka kykenee muuntamaan valon sähkövirraksi. Kytettäessä diodi päästösuuntaan se johtaa virtaa tavallisen ledin tapaan, mutta estosuuntaan kytkettäessä se alkaa johtamaan vasta kun fotodiodille kulkeutuu riittävästi fotoneita, eli valoa. Fotodiodi voi toimia tietyllä aallonpituusalueella, kuten esimerkiksi infrapuna-alueella (700 nm–1 mm) tai normaalin näkyvän valon alueella (400–700 nm). Fotodiodi toimii parhaiten sovelluksissa, joissa sen täytyy ainoastaan havaita infrapunavalon olemassaolo eikä tarkemmin määrittää sen voimakkuutta. [8.]

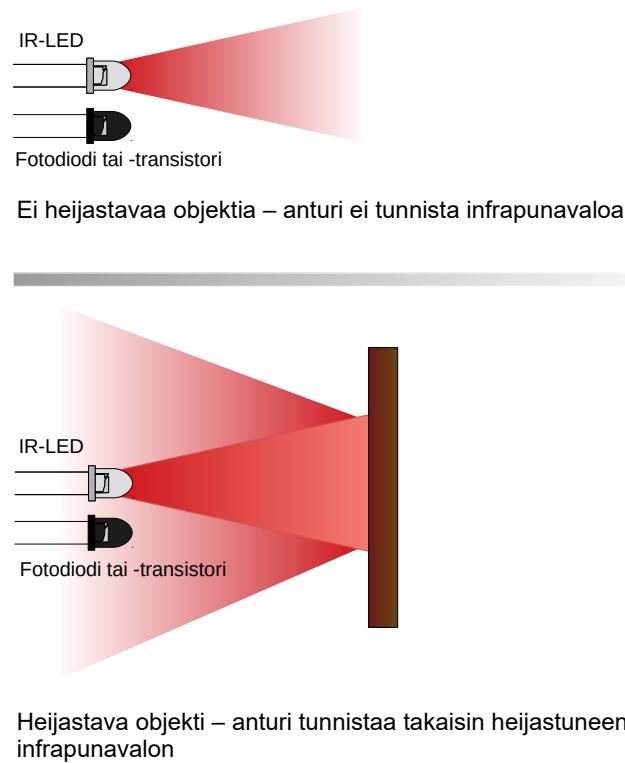
## Fototransistori

Fototransistori on fotodiodin tapaan puolijohdekomponentti, jota käytetään muuntamaan valo sähkövirraksi. Fototransistori käyttää transistoria valon muuntamiseksi sähkövirraksi tai jännitteeksi, jolloin sen ulostulo vahvistuu. Tämä tekee fototransistorista herkemmän, mutta hidastaa sen toimintaa verrattuna fotodiodiin. [9.] Herkkyytensä ansiosta fototransistori sopii hyvin sovelluksiin, joissa halutaan määrittää kohteesta heijastuneen infrapunavalon voimakkuus.

## Infrapuna-anturin toimintaperiaate

IR-anturi mittaa infrapunasäteilyn heijastumista valonlähteeltä takaisin vastaanottimelle (kuva 4). Takaisin heijastuneen säteilyn määrä vaikuttaa vastaanottimena käytettävän fotodiodin tai -transistorin ulostulojännitteeseen, jolloin esimerkiksi kohteen etäisyyttä voidaan arvioida matemaattisesti laskemalla. [7.] Infrapuna-anturi voidaan toteuttaa myös siten, että IR-LED ja fotodiodi on sijoitettu vastakkain. Tällöin esimerkiksi kappaletavara-automaatiojärjestelmässä kappaleen tullessa liukuhihnalla lähettimen ja vastaanottimen väliin, infrapunasäteen matka vastaanottimelle estyy ja järjestelmä saa tietoonsa kappaleen sijainnin.

Myös monen katseohjainjärjestelmän toiminta perustuu juuri infrapunasäteilyyn ja sen heijastumiseen. Valo tuotetaan infrapunaledillä, jolloin se on täysin huomaamaton eikä häiritse käyttäjää. Kameraa avuksi käytävissä järjestelmissä kohdistettaessa infrapunavaloa silmään sarveiskalvo heijastaa infrapunavaloa muodostaen niin sanottuja heijastuspisteitä. Heijastuspisteet näkyvät kameran kuvissa pieninä valopisteinä, joita seuraamalla saadaan tietoa silmän asennosta ja liikkeistä. [10, s. 5.]



Kuva 4. Infrapuna-anturin toimintaperiaate [7, (mukaillen)].

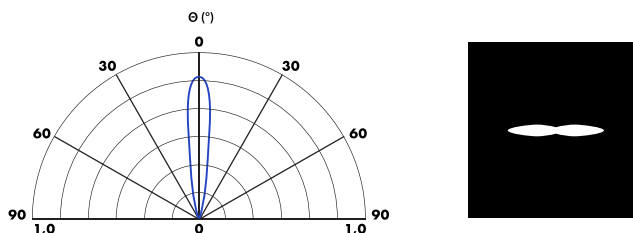
### 3.2 Infrapunasäteilyn vaikutukset silmään

Infrapunasäteily on käytännössä näkymätöntä lämpösäteilyä, joten sen aiheuttama mahdollinen vahinko aiheutuu pääosin kudosten ylikuumenemisesta, mikä johtaa solujen tuhoutumiseen. Absorboituessaan kudoksiin IR-säteily aiheuttaa muutoksia atomien värähdystiloissa, mikä aiheuttaa kudoksen lämpenemisen. Pahimmillaan tämä voi aiheuttaa lopullista haittaa näkökyvylle. Pelkästään IR-säteilylle altistuminen kuitenkin ei aiheuta fotokemiallista reaktiota, joka voi syntyä esimerkiksi liiallisen UV-säteilyn vaikutuksesta. [5.]

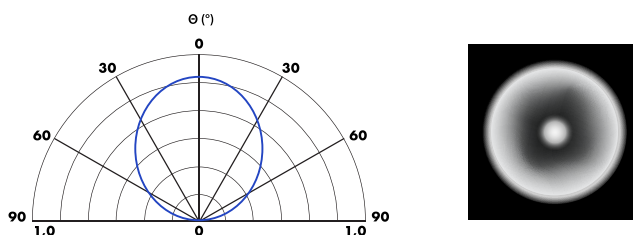
Ihmisen silmä on aikojen saatossa sopeutunut hyvin suojautumaan liialliselta intensiiviseltä optiselta säteilyltä (erityisesti UV-säteily ja infrapunasäteily). Ihminen on myös oppinut käyttämään suojavaarusteita, kuten hattuja ja silmäsuojai-

mia, suojatakseen ihoa ja silmiään säteilyltä. Normaalisti silmän automaattinen sulkeutumisrefleksi estää kirkkaisiin tai haitallisiin valonlähteisiin, kuten esimerkiksi aurinkoon tai hitsatessa esiintyvään valokaareen katsomisen. Infrapunavalo ei kuitenkaan aiheuta tällaista reaktiota, koska valo ei ole näkyvää. [10.]

Suunniteltaessa järjestelmää, jossa kohdistetaan infrapunavaloa silmään, tulee erityisesti ottaa huomioon valonlähteen ominaisuudet. Valonlähteenä voi olla kapeakeilainen lasersäde tai laajemman keilan valodiodi. Kuvissa 5 ja 6 on havainnollistettu säteen hajoamista laser- sekä LED -tyypin säteilylähteistä. Kuvista voidaan päätellä, miksi laserdiodi on vaarallisempi silmälle verrattuna valodiodiin. Kuvasta 5 nähdään, kuinka lasersäteen keila on huomattavasti kapeampi ja suorastaan pistemäinen verrattuna ledin laajaan ja pyöreähköön säteilykeilaan. Kuvan oikeassa laidassa on havainnollistettu laserdiodin säteilyn pientä pinta-alaa. Kuvasta 6 taas nähdään, kuinka valodiodin säteilemä energia puolestaan leviää nopeasti suurelle alalle. Kuvan oikeassa laidassa havainnollistetaan valodiodin säteilyn suurehkoa nopeasti laajenevaa pinta-alaa. Säteilytehon lisääntyminen lisää myös valodiodin säteilyvaaraa, mutta säteilyä ei voi fokusoida verkkokalvolle yhtä pieneksi pisteeksi kuin laserin säteilyä. Säteilykeilan lisäksi mahdolliseen vaaraan vaikuttaa myös valonlähteen säteilyteho sekä etäisyys. Monessa katseohjainjärjestelmässä infrapunavalo heijastetaan kauempaa, kuten esimerkiksi tietokoneen näytön päältä. Päähän sijoitettavissa järjestelmissä anturi on huomattavasti lähempänä silmää verrattuna kaukotoimiseen järjestelmään. Mahdollisia vaikutuksia tutkiessa on huomioitava myös valonlähteiden määrä, joka voi vaihdella runsaasti järjestelmäkohtaisesti. Joissain järjestelmissä käytetään lukuisia ryhmitettyjä ledejä, kun taas toisissa vain yhtä yksittäistä loistediodia. Montaa valonlähdettä käytettäessä kuvaan saadaan voimakkaampia heijastuksia ja valopisteitä. [10.]



Kuva 5. Laserdiodin säteen hajoaminen [5, (mukaillen)].



Kuva 6. Valodiodin säteen hajoaminen [5, (mukaillen)].

### Silmän rakenne ja infrapunasäteilyn aiheuttamat vaarat

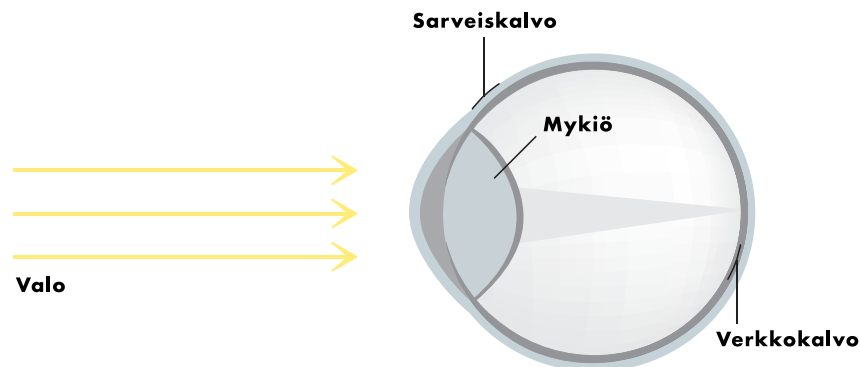
Ihmisen silmämuna on halkaisijaltaan noin 2,4 cm:n kokoinen pallo (kuva 7). Silmän uloin kerros on nimeltään kovakalvo, joka muuttuu silmän etuosassa läpinäkyväksi sarveiskalvoksi. Värikalvo eli iiris sijaitsee välittömästi sarveiskalvon takana, ja sen keskellä on mustuainen eli pupilli. Värikalvo säätelee mustuaisen kokoa, ja siten silmään pääsevän valon määrää. Mustuainen on suurimmillaan pimeässä (noin seitsemän millimetriä), ja pienimmillään valoisassa (noin kaksi millimetriä). Värikalvon takana sijaitsee mykiö eli linssi, jonka takana on läpinäkyvä lasiainen, joka täyttää tilan mykiöltä verkkokalvolle saakka. Verkkokalvo on silmän taimmainen osa, johon muodostuu kuva katseltavasta kohteesta. [5.]

Infrapunasäteilyn vaikutukset silmälle riippuvat myös säteilyn aallonpituudesta. Alle 1 400 nm:n IR-säteily tunkeutuu pisimmälle silmään aina verkkokalvolle asti. Aallonpituudeltaan yli 1 400 nm:n säteily etenee ainoastaan sarveiskalvoon ja etukammionesteeseen ja yli 1900 nm:n säteily ainoastaan sarveiskalvoon. [5.]

Säteily siis tunkeutuu sitä syvemmälle, mitä lyhytaaltoisempaa se on. Tämä myös kumoaa ainakin osittain alussa (katso luku 2) esitetyn hypoteesin infrapunasäteilyn heijastumisesta sarveiskalvolta. IR-A alueen säteilyn tunkeutuessa pisimmälle silmään, silmän pinnasta ei tällöin välttämättä muodostu kovin voimakasta heijastusta.

Optisen säteilyn turvallisuusohjeet käsittävät yleisesti ainakin viisi erilaista optisen säteilyn potentiaalista haittavaikutusta silmälle intensiivisistä valonlähteistä:

1. ultraviolettisäteilyn valokemiallinen vahinko sarveiskalvolle (lumisokeus) ja mykiölle (kaihi) alueella 180–400 nm
2. lämpövahinko verkkokalvolle alueella 400–1400 nm
3. sinivalon aiheuttama valokemiallinen vahinko verkkokalvolle alueella 400–550 nm
4. lähi-infrapunasäteilyn aiheuttama lämpövahinko mykiölle alueella 800–3000 nm
5. lämpövahinko sarveiskalvolle alueella  $1400 - 1 \cdot 10^6$  nm. [5; 10.]



Kuva 7. Silmän rakenne [5; 11, (mukaillen)].

Normaaleille väriledeille ja lähi-infrapuna-alueen infrapunaledeille, joita käytetään enemmistössä infrapunakatseohjainjärjestelmistä, relevantteja ovat ainoastaan kohdat 2 ja 4. Valodiodista ei pitäisi säteillä havaittavaa ultraviolettisäteilyä tai sinivaloa, ja korkean aallonpituuden kaukoinfrapunasäteilyn energia on mitätön. 2.



kohdan lämpövahinko verkkokalvolle vaatii normaalisti tehokkaan ksenonlampun säteilytehoa, kun näkyvää valoa on havaittavissa ja altistuminen on määritelty kestämään alle kymmenen sekuntia. Altistuksen kestäessä kauemmin on olemassa erityinen verkkokalvon ja mykiön lämpövahingon kriteeri jatkuvalla altistukselle. Tämän vuoksi jokaisessa järjestelmässä tulisi arvioida vaaroja tapauskohtaisesti. [10.] Kuitenkaan yhtäkään ledin aiheuttamaa silmävammaa ei ole raportoitu tieteellisessä kirjallisuudessa, vaikka diodilasereiden aiheuttamia silmätapaturmia on sattunut useasti [5].

### 3.3 Säteilyle altistumisen raja-arvot

Moni kansallinen ja kansainvälinen organisaatio tarjoaa ohjearvoja optiselle säteilyle altistumiselle ja suosittelee erityisiä säteilyrajoja silmien ja ihon suojaaksi. Merkittävimpiä näistä ovat *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) Pohjois-Amerikassa sekä *International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP). [10.] Myös Euroopan unionissa on optisen säteilyn direktiivi, joka ohjaa käyttämään ICNIRP:n asettamia säteilyrajoja työpaikoilla. EU:n komissio esitteli vuonna 2006 direktiivin 2006/25/EY mukaiset altistumisen raja-arvot epäkoherentille optiselle säteilyle, jossa esitetään myös raja-arvot infrapunasäteilyle altistumiselle. Nämä raja-arvot on määritetty niin, että pysyttäessä näiden altistumisrajojen alapuolella silmässä estetään sinisen valon aiheuttamien fotokemiallisten vaurioiden syntyminen tai vastaavasti IR-säteilyn aiheuttamien lämpövaurioiden syntyminen. Seuraavaksi esitellyt raja-arvot ovat EU:n direktiivistä 2006/25/EY. [5.]

Sarveiskalvon palovammariski (harmaakaihi)

Säteilyvoimakkuuden ( $E$ ) raja-arvot sarveiskalvon palovamman muodostumiselle aallonpituusalueella 780–3 000 nm (IR-A ja IR-B) ovat seuraavat:

Altistumisajan ollessa lyhyt,  $t < 1000$  s (alle tuhat sekuntia), raja määritetään al-

tistusajan perusteella kaavan 1 mukaisesti [5; 11; 12].

$$E = 18\,000 t^{-3/4} W m^{-2} \quad (1)$$

$t$  on altistumisaika sekunteina.

Altistumisajan ollessa pitkä,  $t > 1000$  s (yli tuhat sekuntia), raja on kaavan 2 mukaan [5; 11].

$$E = 100 W m^{-2} \quad (2)$$

Käytettävän IR-ledin säteilyvoimakkuus voidaan laskea komponentin datalehdestä saatavilla arvoilla kaavalla 3 [11; 12].

$$E_e = I_e / d^2 \quad (3)$$

$I_e$  on IR-ledin säteilyteho (W/sr)

$d$  on IR-ledin etäisyys silmästä (m)

Ajettaessa IR-lediä jatkuvasti pulssitetulla signaalilla, painotettua säteilytehoa voidaan vertailla jatkuvasti päällä olevan säteilyn raja-arvoihin käyttäen pulssisuhteen keskiarvoja kaavan 4 ja 5 mukaisesti, kunhan yksittäisen pulssin säteilyteho ei ylitä raja-arvoja [11].

$$E_{e \text{ time avg}} = E_{e \text{ pulssi}} \cdot D \quad \text{kun} \quad (4)$$

$$D = t_{\text{pulssi}} / t_{\text{jakso}} \quad (5)$$

$t_{\text{pulssi}}$  on IR-ledin päälläoloaika sekunteina

$t_{\text{jakso}}$  on kokonaisjaksonaika sekunteina

## Verkkokalvon palovammariski

Määritettäessä raja-arvoja verkkokalvon palovammariskille pupillin halkaisija, säteilylähteen koko ja säteilyn aallonpituus ovat tärkeitä parametrejä. IR-A -alueella silmän visuaalinen ärsyke on erittäin matala. Se tarkoittaa, että silmän suojeleminen, joka suojaa normaalisti silmää sulkien sen automaattisesti, ei toimi. IR-A -alueen säteily ei myöskään aiheuta silmän iiriksen eli värikanavan supistumista, joten laskelmat tulee suorittaa täysin laajentuneen pupillin (7 mm) halkaisijaa käyttäen. [11.]

Valonlähde tarkentuu verkkokalvolle sarveiskalvon ja mykiön kautta, ja siten määrittelee valaistun alueen, jota säteily rasittaa. Täten säteilylähteen kulmakoko ( $\alpha$ ) korreloi silmän tarkennusalueen kanssa. Kulmakoolla tarkoitetaan näkyvän lähteen tietyllä katseluetaisuudella rajaamaa kulmaa, joka ilmaistaan radiaaneina. Näkyväksi lähteeksi kutsutaan kohdetta, joka muodostaa pienimmän mahdollisen kuvan verkkokalvolle [5]. Silmän fysiologisten rajoitusten perusteella voidaan määrittellä kulmakoon alaraja ( $\alpha_{min,eff}$ ) sekä yläraja ( $\alpha_{max}$ ) joka on aina 0,1 radiaania (verkkokalvolle heijastuva säteilykeila ei enää kasva suuremmalla kulmakoolla, katso taulukko 2). [11.]

Kulmakokoon ( $\alpha$ ) vaikuttavat säteilylähteen koko sekä sen etäisyys silmästä.

Kulmakoko lasketaan kaavalla 6 ja 7 [5; 11; 12]:

$$\alpha = Z / d \quad \text{kun} \quad (6)$$

$$Z = (l + w) / 2 \quad (7)$$

$Z$  on säteilylähteen keskimääräinen koko

$d$  on säteilylähteen etäisyys silmästä millimetreinä

$l$  on säteilylähteen aktiivisen alueen pituus millimetreinä

$w$  on säteilylähteen aktiivisen alueen leveys millimetreinä.

Kulmakoosta muodostetaan kerroin ( $C_\alpha$ ) taulukon 2 mukaisesti [5; 11].

Taulukko 2. Kulmakoon perusteella käytettävät kertoimet  $C_\alpha$  [5; 11].

| Altistumisaika        | $\alpha \leq 11$ (mrad)  | $11 < \alpha \leq 100$ (mrad) | $\alpha > 100$ (mrad)     |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| $t \leq 0.25$ s       | 11                       | $\alpha$                      | 100                       |
| $0.25$ s $< t < 10$ s | $11 \cdot \sqrt{t/0.25}$ | $\alpha \cdot \sqrt{t/0.25}$  | $100 \cdot \sqrt{t/0.25}$ |
| $t \geq 10$ s         | 11                       | $\alpha$                      | 100                       |

Lämpövaurio on myös riippuvainen säteilyn aallonpituudesta, joten niin sanottu lämpövauriopainotus  $R_\lambda$  määritetään seuraavasti kaavalla 8 [5; 11; 12]:

$$R_\lambda = 10^{(700 - \lambda / 500)} \quad (8)$$

$\lambda$  on käytetyn säteilylähteen aallonpituus

Kertoimien ollessa tiedossa altistumisen raja-arvo verkkokalvon palovamman ehkäisemiseksi lasketaan seuraavasti:

Altistumisajan ollessa lyhyt,  $t < 10$  us (alle kymmenen mikrosekuntia), raja määritetään kaavan 9 mukaan [5; 11; 12].

$$L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha} W m^{-2} sr^{-1} \quad (9)$$

Altistumisajan ollessa välillä  $10 \text{ us} \leq t \leq 10 \text{ s}$ , raja on kaavan 10 mukaan [5; 11; 12].

$$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_\alpha} W m^{-2} sr^{-1} \quad (10)$$

Altistumisajan ollessa pitkä,  $t > 10$  s (yli kymmenen sekuntia), raja on kaavan 11

mukaan [5; 11; 12].

$$L_R = \frac{6 \cdot 10^6}{C_\alpha} W m^{-2} sr^{-1} \quad (11)$$

Järjestelmän radianssia  $L_{IR}$  voidaan arvioida kaavalla 12 [11; 12].

$$L_{IR} \approx I_e \cdot R_\lambda / (Z)^2 \quad (12)$$

### 3.4 Esimerkkilaskutoimitukset

Tutkittaessa järjestelmän turvallisuutta tulee laskea kummankin riskitekijän raja-arvojen mukaan järjestelmän säteilyvoimakkuus  $E_e$  sekä radianssi  $L_R$  ja verrata niitä määritettyihin raja-arvoihin. Esimerkkilaskutoimituksissa käytetään yhden prototyypilevyssä käytetyn infrapunaledin ominaisarvoja. IR-ledin säteilytehoksi on ilmoitettu datalehdessä 65 mW/sr, kun sen läpi kulkee sadan milliampeerin virta. Mikro-ohjaimen ulostulonastan rajoituksista johtuen ledin läpi ajetaan kuitenkin todellisuudessa vain noin kuuden milliampeerin virta. Virtaa pystytään luotettavasti rajoittamaan sijoittamalla ledille sopivan kokoinen etuvastus. Täten pystytään myös oleellisesti pienentämään piirin virrankulutusta. Laskutoimituksissa käytetään 6 mA:n virralla ajettavan ledin säteilytehoa, joka on datalehden kuvasta arvioituna noin 6 mW/sr. Käytettävän IR-ledin säteilyn aallonpituus on 940 nm ja aktiivinen säteilylähteen alue kooltaan 2 mm x 2 mm. IR-ledin etäisyys  $d$  silmästä olkoon 5 cm sekä 1 cm, eli lasketaan säteilyteho kahdessa erilaisessa hypoteettisessa käyttötilanteessa. Altistusaika  $t$  on yli 1000 s, koska se vastaa myös varsinaisen lopputuotteen käyttöaikaa. Voidaan myös tutkia, mikä vaikutus järjestelmän turvallisuuteen on, kun lediä ajetaan lyhyillä pulsseilla sen sijaan, että se olisi jatkuvasti päällä. Prototyypilevyllä IR-LED on päällä kymmeniä tai satoja mikrosekunteja kerrallaan, ja poissa päältä noin kymmenen millisekuntia. Valittakoon esimerkin pulssisuhteeksi  $200 \mu s / 10 ms$ .

## Sarveiskalvon palovammariskin määrittäminen

Sarveiskalvon palovammalle altistumisen raja-arvo yli 1000 s altistumisajalla on kaavan 2 mukaan  $100 \text{ W m}^{-2}$ , jolloin laskettaessa IR-ledin säteilyvoimakkuus säteilylähteen etäisyyden  $d$  ollessa 5 cm kaavalla 3:

$$\begin{aligned} E_e &= I_e / d^2 \\ &= 0,006 / (0,05)^2 \\ &= 2,4 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

saadaan arvo, joka on sallitun raja-arvon ( $100 \text{ W/m}^2$ ) sisällä. Järjestelmä on siis ohjearvojen mukainen, kun ledin etäisyys silmästä on 5 cm tai yli.

Pienennetään etäisyyttä  $d$  yhteen senttimetriin ja lasketaan uudelleen:

$$\begin{aligned} E_e &= I_e / d^2 \\ &= 0,006 / (0,01)^2 \\ &= 60 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

saatu arvo pysyy edelleen sallitun raja-arvon sisällä ja on siten ohjearvojen mukainen, mutta silmään kulkeutuva säteilyvoimakkuus on kasvanut moninkertaisesti.

Käytettäessä pulssitettua signaalia IR-ledin keskimääräinen säteilyvoimakkuus voidaan määrittää pulssisuhteen perusteella kaavalla 4 ja 5.

IR-ledin etäisyyden silmästä ollessa 5 cm:

$$\begin{aligned} E_{e \text{ time avg}} &= E_{e, \text{pulssi}} \cdot D \\ &= 2,4 \cdot (0,0002/0,0102) \\ &= 0,047 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

keskimääräinen säteilyvoimakkuus on edelleen raja-arvojen mukainen, ja pulssi-

tettuna säteilyteho pienenee entisestään.

IR-ledin etäisyyden silmästä ollessa 1 cm:

$$\begin{aligned} E_{e \text{ time avg}} &= E_{e, \text{pulssi}} \cdot D \\ &= 60 \cdot (0,0002/0,0102) \\ &= 1,176 \text{ W/m}^2 \quad , \end{aligned}$$

keskimääräinen säteilyvoimakkuus jää selvästi alle raja-arvon, ja koska yksittäisen pulssin säteilyteho ei ylitä raja-arvoa, järjestelmä on ohjearvojen mukainen.

Verkkokalvon palovammariskin määrittäminen

Ensimmäisenä määritetään kulmakoko  $\alpha$  kaavan 6 ja 7 mukaan kun etäisyys  $d$  on 1 cm:

$$\begin{aligned} \alpha &= Z / d \\ &= 2 \text{ mm} / 10 \text{ mm} \\ &= 0,2 \text{ rad} = 200 \text{ mrad} \quad \text{kun} \end{aligned}$$

$$Z = (2 \text{ mm} + 2 \text{ mm}) / 2 = 2 \text{ mm} \quad ,$$

jolloin taulukon 2 mukaan kun  $t > 10$  s saadaan kertoimeksi  $C_\alpha = 100$ .

Tämän jälkeen lasketaan lämpövauriopainotus  $R_\lambda$  kaavan 8 mukaan:

$$\begin{aligned} R_\lambda &= 10^{(700 - \lambda / 500)} \\ &= 10^{(700 - 940 / 500)} \\ &= 0,33 \quad . \end{aligned}$$

Kaavan 11 mukaan määritetään irradianssin raja-arvo, kun altistusaika on yli 10 sekuntia ja  $C_\alpha = 100$ :

$$\begin{aligned} L_R &= \frac{6 \cdot 10^6}{C_\alpha} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \\ &\rightarrow \frac{6000}{100} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \\ &= 60 \text{ mW/mm}^{-2}/\text{sr}^{-1} . \end{aligned}$$

Järjestelmän radianssi  $L_{IR}$  voidaan arvioida kaavan 12 mukaan jolloin laskettaessa saadaan:

$$\begin{aligned} L_{IR} &\approx 0,006 \text{ W/sr} \cdot 0,33 / (2)^2 \\ &\approx 0,000495 \text{ W/mm}^{-2}/\text{sr}^{-1} \\ &\approx 0,495 \text{ mW/mm}^{-2}/\text{sr}^{-1} , \end{aligned}$$

joka pysyy raja-arvon ( $60 \text{ W/mm}^2/\text{sr}$ ) sisällä ja on siten ohjearvojen mukainen. Jos kohde on kauempana, sen muodostama kulmataajuus pienenee, jolloin säteilynvoimakkuuden raja-arvo kasvaa entisestään. Ei siis ole tarpeen laskea raja-arvoja suuremmilla etäisyyksillä.

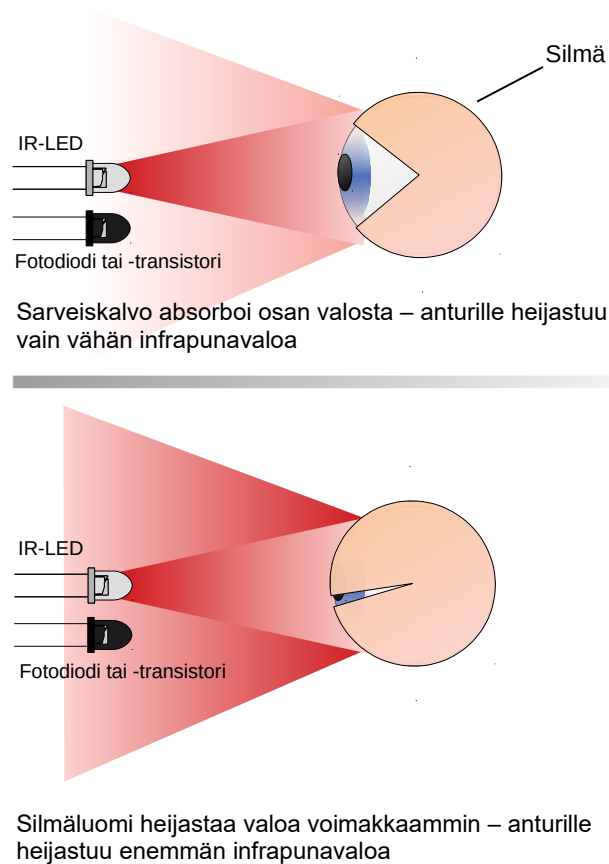


## 4 Piirilevyn suunnittelu ja toteutus

Silmänräpäyskytkimen toimintaa suunnitellessa sen keskeisimmät tehtävät jaettiin kolmeen vaiheeseen:

- silmänräpäyksen tunnistaminen anturilla
- signaalin digitaalinen käsittely ja suodatus
- napsautuskomennon toimittaminen päätelaitteelle.

Silmänräpäys on tarkoitus tunnistaa infrapuna-anturilla. Silmään heijastetaan infrapunasäteilyä IR-ledillä, ja silmältä palaavan säteilyn voimakkuutta mitataan fotodiodilla tai -transistorilla. Silmän tila, eli onko silmä auki vai kiinni, vaikuttaa takaisin heijastuvaan säteilyyn. Tilannetta havainnollistetaan kuvan 8 avulla. Fotodiodin tai -transistorin ulostulojalan jännite muuttuu sille kulkeutuneen infrapunasäteilyn voimakkuuden mukaan. Kun infrapunasäteilyä ei ole havaittavissa lainkaan, komponentin ulostulojännite on lähellä nollaa riippuen tilan muun valaistuksen voimakkuudesta. Komponentin vastaanottaessa runsaasti infrapunasäteilyä, sen johtavuus paranee ja ulostulojännite kasvaa. Säteilyn heijastuksessa tapahtuu muutos, kun avoinna oleva silmä suljetaan. Tätä muutosta pyritään tulkitsemaan fotodiodin tai -transistorin avulla. Muutoksen tulee olla tarpeeksi suuri, että sitä pystytään tulkita luotettavasti. Infrapuna-anturin suunnittelun onnistumisella on siten merkittävä rooli prototyypin toiminnan kannalta.



Kuva 8. Infrapunavalon heijastuminen sarveiskalvon tai silmäluomen pinnalta.

#### 4.1 Infrapuna-anturin suunnittelu

Infrapuna-anturi on pääpiirteittäin yksinkertainen laite, mutta signaali on altis häiriöille ulkomaailmasta. Esimerkiksi aurinko lähettää voimakasta infrapunasäteilyä, jolle altistuessaan anturi voi alkaa käyttäytyä ei-toivotulla tavalla. Tällöin IR-ledin lähettämä säteily sekoittuu auringon säteilyyn, ja anturin lukema ei ole enää luotettava. Toimintavarmuuden parantamiseksi voidaan kehittää suodatusta esimerkiksi ohjelmallisesti, tai käyttää fyysistä suodatinta kuten päivänvaloa suodattavaa filmiä. Signaalin digitaalinen käsittely ja suodatus on mahdollista toteuttaa ohjelmoitavalla mikro-ohjaimella. Mikro-ohjain toimisi myös koko kytkimen "aivoi-

na” ohjaamalla kaikkea kytkimen toimintaa.

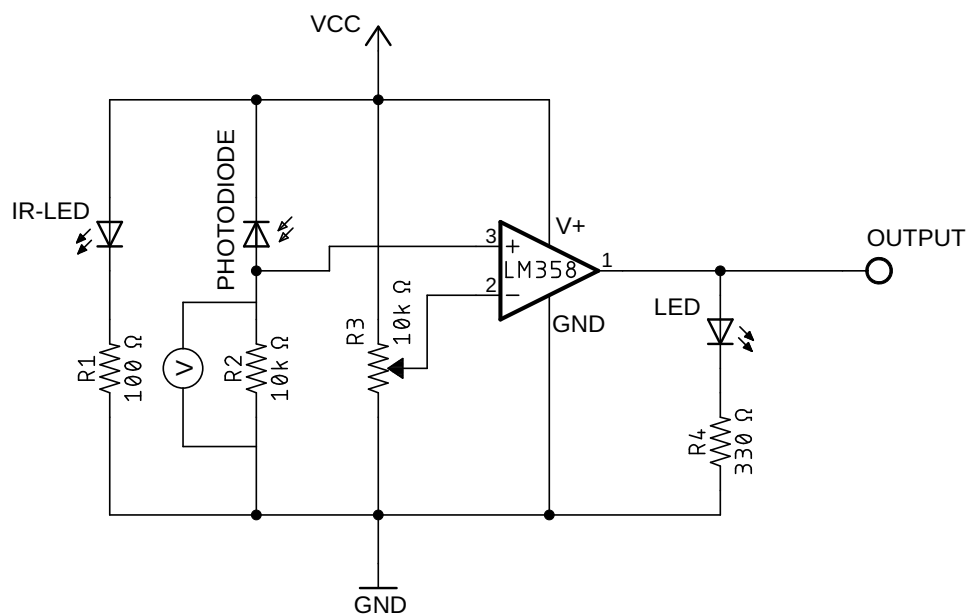
Infrapunasäteilyn lähettämiseen sekä vastaanottamiseen tarvitaan tarkoituksenmukaiset komponentit. Yleisimmät komponentit ovat IR-LED (säteilyn lähettämiseen) ja fotodiodeja tai -transistori (säteilyn vastaanottamiseen). Olemassa on myös niin sanottuja yhdistelmäantureita, jotka sisältävät molemmat komponentit valmiiksi koteloidussa ratkaisussa. Yhdistelmäanturin etuja voivat olla esimerkiksi helpotettu asennus ja suuntaus, ja että anturin komponentit toimivat varmasti yhdessä. Yhdistelmäanturin käyttö voi kuitenkin asettaa myös tiettyjä rajoitteita, kuten valmiin kotelon aiheuttamat kokorajoitukset ja komponenttien suuntaus sekä etäisyys toisistaan, joita ei pysty muuttamaan.

Komponenttien valinta voi osoittautua usein haastavaksi, sillä saatavilla olevien komponenttien ja eri valmistajien määrä on suuri. Komponentit voivat erota fyysiseltä kooltaan ja muodoltaan, tai sähköisiltä ominaisuuksiltaan, esimerkiksi säteilytehon ja valokeilan kulman suhteen. Yhtä oikeaa komponenttia on vaikea valita pelkästään datalehden tietojen mukaan, joten päätettiin tilata lukuisia erilaisilla ominaisuuksilla varustettuja komponentteja. Ensimmäiseen tilaukseen valittiin IR-LED:ejä ja fotodiodeja, sekä muutama yhdistelmäanturi. Tarkoituksena oli löytää mahdollisimman sopivat komponentit silmänräpäyskytkimen anturiin.

Anturi on tarkoitus kiinnittää käyttäjän silmän eteen siten, että se ei häiritse normaalia tietokoneen käyttöä tai asetu liiaksi näkökentän eteen. Yksi kiinnitysvaihtoehto on esimerkiksi silmälasien sanka, jolloin anturi tulisi korkeintaan muutaman senttimetrin etäisyydelle silmästä. Toinen vaihtoehto on ns. joutsenkaulalla aseteltava erillinen anturi, jonka voisi sijoittaa jopa kymmenen senttimetrin päähän silmästä. Optimaalinen tilanne olisi, että kumpikin konfiguraatio voitaisiin toteuttaa samalla anturilla. Koska anturin sijoituspaikka voi vaihdella, tulisi komponenttien soveltua havaitsemaan säteilyä myös pidemmältä etäisyydeltä.

Tilattujen komponenttien soveltumista anturiin selvitettiin yksinkertaisen infrapuna-anturi -kytkennän avulla (kuva 9). Fotodiodeja kytkettiin estosuuntaan siten, että infrapunavaloa havaitessaan se alkaa johtamaan sähköä. Fotodiodin

ulostulo kytkettiin operaatiovahvistimen (LM358) ei-invertoivaan sisääntuloon. Operaatiovahvistimen invertoivaan sisääntuloon kytkettiin säätövastus. Säätövastuksen tarkoituksena on asettaa vertailujännite operaatiovahvistimelle. Operaatiovahvistin toimi tässä tapauksessa komparaattorina siten, että fotodiodin ulostulon ylittäessä säädetyn vertailujännitteen, operaatiovahvistimen ulostulo aktivoituu ja syöttää noin neljän voltin suuruisen ulostulojännitteen. Ulostuloon kytkettiin merkkivalo antamaan visuaalinen tieto ulostulon aktivoitumisesta.



Kuva 9. IR-anturin testikytkennän kytkentäkaavio.

#### 4.2 Komponenttien vertailu ja valinta

Kuvan 9 kytkentää käyttäen, testattava IR-LED sekä fotodiodi asetettiin vierekkäin siten, että suora säteily komponenttien välillä pystyttiin estämään, mutta mahdollinen heijastus pystyttiin havaitsemaan. Testaus tehtiin normaalissa työhuonevalaistuksessa (loisteputki), koska se vastaa parhaiten myös tulevan mahdollisen lopputuotteen käyttöympäristöä. Fotodiodin ulostulojalkaan kytkettiin jännitemit-

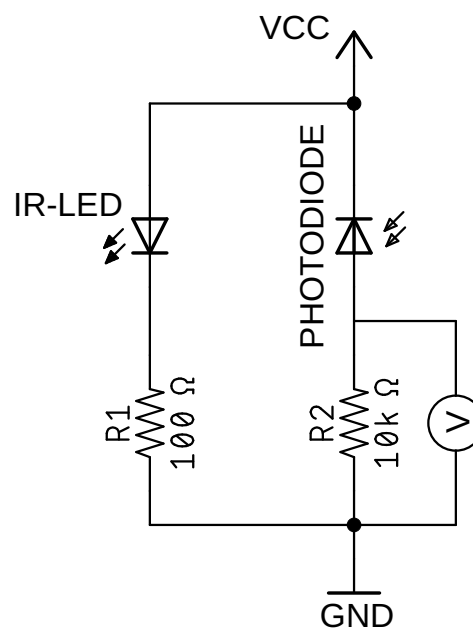
tari, jotta sen jännitettä pystyttäisiin mittaamaan heijastuksen muuttuessa. Vertaillessa antureita heijastuksen havaitsemista testattiin erilaisilla materiaaleilla, kuten kämmenellä (iho), kopiopaperilla sekä heijastavalla muovilla ja metallilla. Testauksen yhteydessä silmänräpäyskytkimen ideaa päätettiin myös kokeilla osoittamalla anturilla silmään, ja tarkkailemalla aktivoituuko silmän suljettaessa operaatiovahvistimen ulostuloon kytketty merkkivalo. Silmänräpäykseen reagoi ainoastaan yksi koulun komponenttivarastosta löytynyt fototransistori. Hyvin nopeasti myös huomattiin, että lähes kaikki testattavista valodiodeista osoittautuivat käyttökelvottomiksi sovelluksessa, sillä ne eivät reagoineet heijastuneeseen infrapunavaloon juuri ollenkaan. Fototransistori kuitenkin reagoi heijastuksiin kiitettävästi. Parhaiksi IR-LEDiksi fototransistorin kanssa osoittautuivat suuritehoisimmat ledit, koska niillä saatiin aikaan voimakkain silmältä palaava heijastus. Myös valmiita yhdistelmäantureita testattiin, joista ainakin yksi osoittautui toimivaksi.

Kun fotodiodit osoittautuivat testissä käyttökelvottomiksi, päätettiin tilata uusi pelkästään fototransistoreista koostuva testierä tarkempia mittauksia varten. Ensimmäisen testin fototransistori oli halkaisijaltaan 5 mm, joka on varsinaista prototyyppiä ajatellen hieman iso. Tilaukseen valittiin ainoastaan halkaisijaltaan 3 mm:n kokoisia fototransistoreita.

### Tarkemmat mittaukset

Kun tilatut fototransistorit saapuivat, päätettiin mitata tarkemmin fotodiodin ja fototransistorin eroavaisuuksia heijastuksen havaitsemisessa. Aiempaa kuvan 9 kytkentää muokattiin poistamalla kytkennästä operaatiovahvistin sekä merkkivalo (kuva 10), sillä niitä ei enää tarvittu. Jälleen IR-LED sekä fotodiodi tai -transistori asetettiin vierekkäin siten, että vastaanottimelle pääsi kulkeutumaan ainoastaan heijastettu infrapunavalon. Infrapunavalon lähettimenä käytettiin IR-LEDiä, jonka linssi oli halkaisijaltaan 3 mm ja ilmoitettu maksimisäteilyteho 65 mW/sr. Komponentit asetettiin 5 cm:n ja 10 cm:n etäisyyksille himmeästä mutta hyvin heijastavasta alumiinilevystä. Komponenttien tilaa mitattiin myös ilman heijastavaa

objektia. Oskilloskoopin mittapää kytkettiin fototransistorin tai -diodin ulostulojalkaan, josta saadaan taulukoissa 3, 4 ja 5 esitettävät jännitteiden muutokset eri etäisyyksillä verrattuna tilanteeseen, jossa takaisin heijastavaa pintaa ei ole. Maksimiulostulo on 5 voltia, ja mitä positiivisesti suurempi ulostulon muutos on, sitä paremmin anturi havaitsee heijastunutta valoa. Mitattavien fototransistorien ja -diodien linssin halkaisija oli joko 3 mm tai 5 mm. Lähtökohtaisesti isompi linssi on herkempi havaitsemaan säteilyä isomman pinta-alan vuoksi. Fototransistorien ja diodien lisäksi mitattiin myös kaksi valmiiksi koteloitua anturia. Pienikin eroavaisuus komponenttien suuntauksessa voi vaikuttaa merkittävästi mittaustulosten tarkkuuteen, joten tuloksia ei voida pitää täysin luotettavina, vaan enemmänkin suuntaa antavina.



Kuva 10. IR-anturin tarkemmissa mittauksissa käytetty kytkentä.

Fotodiodien mittaukset (taulukko 3) vahvistivat alustavat havainnot, että niiden herkkyys ei riittänyt heijastusten havaitsemiseen oikeastaan lainkaan.

Taulukko 3. Mittaustulokset fotodiodeilla.

| Fotodiodei (nr.) | Ø (mm) | Ei obj. (V) | Δ 5 cm (V) | Δ 10 cm (V) |
|------------------|--------|-------------|------------|-------------|
| 1                | 5      | 0,000       | 0,060      | 0,060       |
| 2                | 3      | 0,010       | 0,050      | 0,050       |
| 3                | 5      | 0,000       | 0,140      | 0,060       |
| 4                | 5      | 0,000       | 0,180      | 0,100       |
| 5                | 5      | 0,000       | 0,100      | 0,060       |
| 6                | 3      | 0,000       | 0,060      | 0,060       |

Fototransistorin mittaukset (taulukko 4) osoittivat, että transistorin vahvistus vaikuttaa selkeästi heijastuksien havaitsemiseen. Mittaukset varmistivat, että anturi kannattaa suunnitella käyttäen pääkomponentteina juuri IR-lediä ja fototransistoria.

Taulukko 4. Mittaustulokset fototransistoreilla.

| Fototransistori (nr.) | Ø (mm) | Ei obj. (V) | Δ 5 cm (V) | Δ 10 cm (V) |
|-----------------------|--------|-------------|------------|-------------|
| 1                     | 3      | 0,120       | 2,830      | 0,700       |
| 2                     | 3      | 0,970       | 3,830      | 2,140       |
| 3                     | 3      | 0,120       | 2,630      | 0,740       |
| 4                     | 3      | 0,040       | 4,760      | 0,020       |
| 5                     | 3      | 0,120       | 2,830      | 0,740       |
| 6                     | 3      | 0,040       | 2,760      | 1,260       |
| 7                     | 3      | 0,320       | 0,700      | 0,060       |
| 8                     | 5      | 0,560       | 4,240      | 1,590       |

Yhdistelmäantureista ainoastaan anturi numero 1 pärjäsi hyvin mittauksissa. Sen mittaustulokset (taulukko 5) ovat hyvin lähellä parhaiden fototransistorien arvoja, ja se siten sopisi teknisiltä ominaisuuksiltaan hyvin anturiin.

Taulukko 5. Mittaustulokset yhdistelmäantureilla.

| Anturi (nr.) | Ei obj. (V) | $\Delta$ 5 cm (V) | $\Delta$ 10 cm (V) |
|--------------|-------------|-------------------|--------------------|
| 1            | 0,080       | 4,760             | 3,190              |
| 2            | 0,100       | 0,400             | 0,080              |

Parhaiten mittauksissa pärjänneet komponentit kirjattiin muistiin ja niitä tilattiin lisää, jotta niitä voidaan testata mahdollisesti myöhemmin prototyyppiin piirilevyllä. Prototyyppiin valmistuttua komponenttien soveltuvuutta voisi tarkastella vielä esimerkiksi virrankulutuksen kannalta.

#### 4.3 Piirilevyn suunnittelu

Mittausten jälkeen tiedettiin anturin osalta suunnilleen minkälaisia komponentteja ja prototyyppiin tulisi. Ennen piirilevyn suunnittelun aloittamista valittiin kuitenkin vielä prototyyppissä käytettävän mikro-ohjaimen malli. Mikro-ohjaimeksi valittiin PIC-tyypin kahdeksannastainen mikro-ohjain. Piirilevyyn päätettiin myös lisätä painonappi, joka voitaisiin ottaa käyttöön esimerkiksi kalibrointipainikkeena. Muut käytettävät komponentit ovat perinteisiä yleiskomponentteja, esimerkiksi vastuksia ja kondensaattoreita. Suunnitteluun käytettiin AutoDesk Inc:n Eagle-piirilevynsuunnitteluohjelmaa, jolla on mahdollista piirtää piirikaavio sekä suunnitella komponenttien asettelu ja johtoteiden reititys.

Ensimmäiseksi prototyyppiä päätettiin suunnitella lopullista tuotetta suurikokoisempi testilevy. Testilevyllä pystyttäisiin varmistamaan, että suunniteltu piirikaavio toimii myös käytännössä. Suurempi koko helpottaa myös testausta sekä kokoonpanoa, sillä komponenttien koot pystytään pitämään helposti käsiteltävien kokoisina. Suunnittelu aloitettiin piirtämällä piirikaavio (liite 1), joka sisältää kaikki levyssä tarvittavat komponentit sekä niiden liitokset. Piirikaavio mukailee hieman ensimmäisissä infrapuna-anturin mittauksissa käytettävää piiriä (kuva 9), mutta operaatiovahvistin korvataan mikro-ohjaimella. Piiri on pääpiirteittäin hyvin yksin-



kertainen, se sisältää ainoastaan vastuksia, kondensaattorin, infrapuna-anturiin tarvittavan IR-ledin ja fototransistorin, painonapin, pariston, mikro-ohjaimen sekä ohjelmointi- ja USB-riman.

Piirilevyn suunnittelussa käytettiin lähtökohtaisesti vain pintaliitoskomponentteja (SMD). Mikro-ohjain ja anturin komponentit fototransistori ja IR-LED toteutettiin through-hole eli läpiliitostekniikalla, jossa komponentin jalat tulevat piirilevyn läpi ja ne on mahdollista juottaa kummalta puolelta tahansa. Kaikki komponentit ja lähes kaikki johtotiet sijoitettiin piirilevyn etupuolelle. Levyn takapuolesta muodostettiin niin sanottu ground plane eli maataso. Maataso suodattaa häiriöitä ja helpottaa johtoteiden reititystä, koska komponentit pystytään kytkemään maatasoon suoraan läpiviennillä, eikä johtoreittejä joudu suunnittelemaan maadoituksen ehtoilla.

Läpiviennillä (VIA) voidaan liikkua piirilevyn etu- ja takapuolen välillä, jolloin esimerkiksi ahtaassa kohdassa signaali voidaan viedä levyn takapuolen kautta perille, ja palata sen jälkeen takaisin etupuolelle toisen läpiviennin kautta. Läpivienneillä voidaan myös jakaa suuritehoisen komponentin lämpöä piirissä, ja siten ehkäistä sen ylikuumentuminen. Monessa piirilevynsuunnitteluohjeessa kuitenkin suositellaan käytettävän mahdollisimman vähän läpivientejä, koska ne lisäävät valmistuskustannuksia ja vievät mahdollisesti tilaa muilta komponenteilta ja siten kasvattavat levyn kokoa.

Suunniteltaessa komponenttien sijoitusta levyllä hyvä tapa on sijoittaa ensimmäisenä liittimet ja painikkeet levyn reunoille. Esimerkiksi USB-liitin ei ole kovin helposti käytettävissä levyn keskellä. Samalla voidaan sijoittaa paljon tilaa vievät komponentit kuten paristokotelo, jolle ei lähtökohtaisesti ole kovin montaa mahdollista sijoituspaikkaa levyllä. Seuraavaksi sijoitettiin mikro-ohjain levyn keskelle. Mikro-ohjaimen kytketään lähes kaikki levyn komponentit, joten keskeinen sijoituspaikka helpottaa johtoteiden reititystä.

Kun piirikaavio sekä sijoittelu ovat valmiina, ajetaan ohjelmistolla testit, joilla varmistetaan, että piirissä olevat komponentit ovat varmasti kytketty oikein, eikä esi-

merkiksi päällekkäisyyksiä johtoteissä tai komponenttien juotospinnoilla ole. Jos ongelmia ei tule esiin, luodusta sijoittelusta tehdään GERBER-tiedostot, jotka ovat käytännössä kuvia piirilevyn eri materiaalikerroksista. Tiedostot lähetetään piirilevyvalmistajalle, joka valmistaa piirilevyt tiedostojen pohjalta ja lähettää valmiit levyt takaisin asiakkaalle.

Valmiit piirilevyt testataan sähköisesti yleensä jo tehtaalla, mutta niiden saapuesssa ne on hyvä käydä yleismittarilla läpi. Liitteessä 2 on kuva valmiista tehtaalta tulleesta piirilevystä ilman komponentteja, sekä kuva valmiiksi ladotusta levystä. Piirilevy on kooltaan 53 mm x 41 mm. Kun komponentit on juotettu kiinni, voidaan aloittaa piirilevyn käyttö. Seuraavaksi prototyypin mikro-ohjaimelle tulee suunnitella ohjelma, joka ohjaa koko silmänräpäyskytkimen toimintaa.

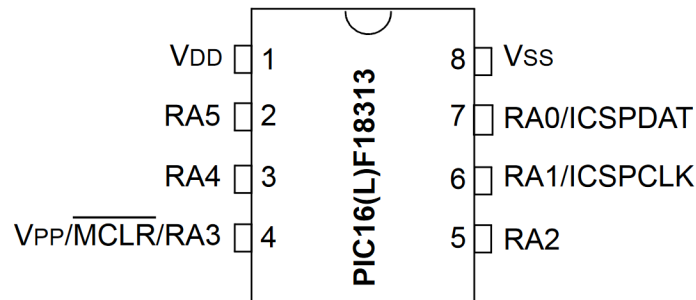
## **5 Ohjelman suunnittelu ja toteutus**

Tämä luku käsittelee silmänräpäyskytkimen ohjelman suunnittelua sekä toteutusta. Luvussa kerrotaan myös mikro-ohjaimen käytöstä ja toiminnasta. Ohjelman perimmäinen tarkoitus on ohjata mikro-ohjaimen ulostuloja sekä käsitellä sisään tulevaa dataa. Suunniteltua ohjelmaa kuvataan selvittäen ohjelman toiminta pääpiirteittäin vuokaavion avulla. Ohjelma toteutetaan C-kielellä.

### **5.1 Mikro-ohjain**

Mikro-ohjaimella on mahdollista käsitellä infrapuna-anturilta saatavaa signaalia, sekä ohjata koko levyn toimintaa. Ohjattavia ulostuloja ovat IR-LED, fototransistori ja päätelaitteelle menevä napsautuskäsky. Sisään tulevaa dataa ovat fototransistorin sekä kalibrointipainikkeen ulostulot. Tarkoitukseen sopii erinomaisesti PIC-mikro-ohjain, joka sisältää A/D-muuntimen, ajastimen sekä tarpeeksi sisään- ja ulostuloliittimiä. Mikro-ohjain on käytännössä minitietokone, joka sisältää yleensä mikroprosessorin, ohjelma- sekä datamuistia ja I/O-portteja. Nykyään moni mikro-ohjain sisältää myös esimerkiksi A/D-muuntimen, ajastinpiirin tai reaaliaikakellon.

Prototyypilevyssä käytetään Microchip Technology Inc:n valmistama kahdeksannasta "PIC16LF1831" mikro-ohjainta (kuva 11). Se sisältää 3,5 kB ohjelmuistia, mikroprosessorin 8 MHz kellotaajuudella, A/D-muuntimen, kolme ajastinta sekä kuusi I/O-porttia [13].



Kuva 11. PIC16LF18313 mikro-ohjaimen piirroskuva [13].

Ennen mikro-ohjaimen käyttöönottoa tutustuttiin valmistajan tarjoamaan niin sanottuun datalehteen, joka sisältää kaikki tiedot mikro-ohjaimen ominaisuuksista ja käytöstä. Datalehdestä esimerkiksi selviää, mitä toimintoja mikro-ohjaimen jokainen nasta sisältää, sekä miten mikro-ohjaimen sisäinen ajastin toimii. Mikro-ohjaimen käyttö aloitettiin testaamalla käytettäviä toimintoja ohjelmointirajapinnassa. Apuna käytettiin myös Proteus 8 -simulaatioympäristöä, joka mahdollistaa binäärimuotoon muutetun C-koodin simuloimisen piirissä. Kun mikro-ohjaimen toimintaan oli tutustuttu, aloitettiin varsinaisen ohjelman suunnittelu ja kirjoittaminen.

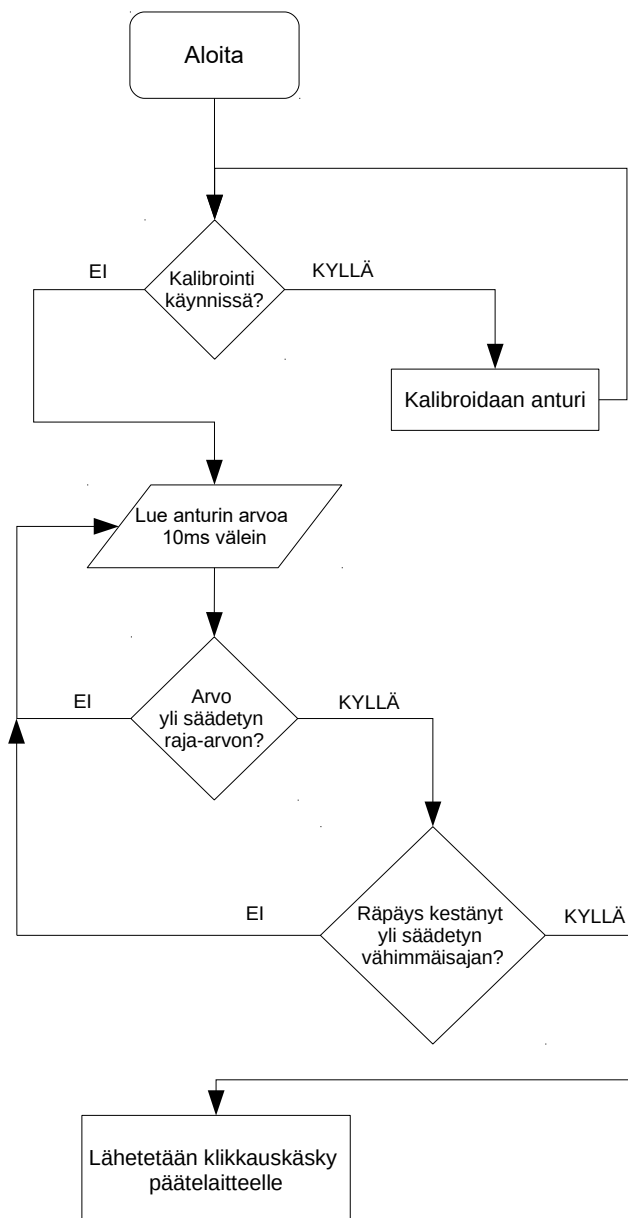
## 5.2 Silmänräpäyskytkimen ohjelma

Silmänpäpyskytkimen ohjelman tehtävä on määrittää fototransistorin ja IR-ledin avulla silmän tila, eli onko silmä auki vai kiinni. Tämä voidaan toteuttaa muodostamalla niin sanottuja algoritmeja, joilla fototransistorilta saatavia arvoja voidaan tulkita. Mikro-ohjaimen ajastinta hyödyntäen voidaan suorittaa anturin mittaustoi-  
menpide esimerkiksi 100 Hz:n taajuudella, jolloin ohjelma tarkistaa silmän tilan kymmenen millisekunnin välein. Ohjelman vastuulla on myös napsautuskomen-  
non toimittaminen päätelaitteelle, mikä saadaan aikaan muuttamalla apuvälinehii-

reen kytketyn prototyypilevyn lähtöliittimen tilaa. Kalibroimalla raja-arvot silmän eri tilojen tunnistamiseksi voidaan helpottaa kytkimen käyttöönottoa.

Valmis ohjelma tarkistaa kymmenen millisekunnin välein ensin kalibroitipainikkeen tilan. Jos kalibroitipainike on painettuna, ohjelma siirtyy kalibroitifunktioon, jossa silmän eteen asetetulla infrapuna-anturilla kalibroidaan raja-arvot silmänräpäyksen tunnistamiseksi. Kalibroitifunktiosta poistuttaessa palataan takaisin pääohjelmaan. Jos kalibroitipainiketta ei ole painettu, ohjelma siirtyy lukemaan anturin arvoa ja vertaa sitä kalibroimalla asetettuihin raja-arvoihin. Ohjelmassa on kaksi erityisen tärkeää raja-arvoa. Ensimmäinen arvo määrittää, onko silmä auki vai kiinni. Kun silmä on auki, fototransistorilta tuleva arvo on pienempi, ja silmän ollessa kiinni, arvo on suurempi. Jos arvo on määritettyä raja-arvoa suurempi tarpeeksi pitkään, silmän tulkitaan olevan kiinni ja ohjelma välittää napsautuskomennon päätelaitteelle. Jos silmän tulkitaan olevan auki, ohjelma jatkaa normaalisti anturin arvon lukemista. Toinen tärkeä raja-arvo on vaaditun silmänräpäyksen kesto. Napsautuskäskyä ei ole tarkoitus lähettää jokaisesta tahattomasta tai automaattisesta räpäyksestä, vaan räpäyksen tulee olla tarkoituksellinen. Tarkoituksellinen räpäys kestää hieman pidempään kuin tahaton räpäys, joten räpäyksen keston tulee olla tietyn mittainen, että se hyväksytään.

Ohjelman toiminta on esitelty yleisesti kuvassa 12 vuokaavion avulla.



Kuva 12. Ohjelman yksinkertaistettu vuokaavio.

### Ajastimen toiminta

Kun ohjelmassa halutaan mitata aikaa tietyllä tarkkuudella, voidaan käyttää hyödyksi mikro-ohjaimen ajastinta. Ajastinta ohjataan joko sisäisellä tai ulkoisella oskillaattorilla, jonka avulla määritetään mikro-ohjaimen prosessorin kellotaajuus.

PIC16LF18313 mikro-ohjaimen sisäinen oskillaattori on yhdistetty "TIMER0"-ajastimeen, joka laskee aikaa tai niin sanottuja "askelia" määritetyllä kellotaajuudella. Esimerkiksi 4 MHz taajuudelle asetettu ajastin laskee neljä miljoonaa askelta sekunnissa. TIMER0 on 8-bittinen ajastin, joka tarkoittaa, että ajastin voi laskea niin sanottuja "tapahtumia" ainoastaan 8-bittisen luvun maksimiarvoon 255:een asti, jonka jälkeen se pyörähtää ympäri ja aloittaa laskemisen alusta. Ajastimen pyörähtäminen aiheuttaa keskeytyksen eli niin sanotun "interruptin". Ohjelma voidaan ohjata jokaisella keskeytyksellä erityiseen keskeytysfunktioon. Keskeytysfunktioon siirtyessään ohjelma keskeyttää senhetkisen funktion suorittamisen ja palaa takaisin samaan kohtaan keskeytysfunktioista poistuttaessa. Ajastimen keskeytystaajuutta voidaan säätää esijakajan avulla. Esijakaja määrittää, montako askelta ajastimen tulee laskea, että yksi tapahtuma eli lasku täyttyy. Suurin esijakajan arvo on 256 ja pienin 1. Esijakajan ollessa 1 jokainen tapahtuma on sidonnainen yhteen askeleeseen. Jos esijakaja taas on 256, yhden tapahtuman suorittamiseen kuuluu 256 askelta. Ajastin voidaan myös asettaa aloittamaan laskeminen määrätystä luvusta nollan ja 255:n väliltä, millä voidaan edelleen tarkentaa ja säätää keskeytystaajuutta. [13.]

Jotta ohjelman toimintoja tai funktioita voidaan asettaa suoritettavaksi aina kymmenen millisekunnin välein, on asetettava ajastin siten, että se ajautuu keskeytykseen joka kymmenes millisekunti. PIC mikro-ohjaimissa käytettäessä sisäistä oskillaattoria ajastimen kellotaajuus, eli montako askelta ajastin laskee sekunnissa, on oskillaattorin taajuus jaettuna neljällä. Eli 4 MHz:n sisäisen oskillaattorin taajuudella ajastimen kellotaajuus on  $4 \text{ MHz} / 4 = 1 \text{ MHz}$ . Jos ajastin on asetettu laskemaan 4 MHz:n taajuudella, voidaan laskea tarvittava esijakajan arvo sekä aloitusarvo, joilla saadaan haluttu 10 ms:n keskeytystaajuus.

Esijakajan arvoksi on asetettu 256, ja sisäisen oskillaattorin taajuus on 4 MHz, jolloin ajastimen kellotaajuus on 1 MHz, yksi ajastimen tapahtuma tapahtuu tällöin 256  $\mu\text{s}$ :n välein. Ajastimen keskeytykseen tarvitaan 256 tapahtumaa, joten voidaan laskea  $256 \mu\text{s} \cdot 256 = 65\,536 \mu\text{s} \rightarrow 65.5 \text{ ms}$ . Keskeytys tulisi nyt joka noin 66:s millisekunti, joka liian hidas. Lasketaan esijakajan arvoa 64:ään, jolloin yksi

tapahtuma tapahtuu  $64 \mu\text{s}$ :n välein. Lasketaan jälleen  $64 \mu\text{s} \cdot 256 = 16\,384 \mu\text{s} \approx 16,4 \text{ ms}$ . Nyt päästään hyvin lähelle haluttua  $10 \text{ ms}$ :n keskeytystaajuutta, joten taajuus voidaan hienosäätää kohdalleen säätämällä ajastimen aloitusarvoa. Normaalitylanteessa ajastin alkaa laskemaan nolasta ylöspäin aina 256:een saakka. Voidaan laskea, montako  $64 \mu\text{s}$  kestävä tapahtumaa mahtuu kymmeneen millisekuntiin:  $10\,000 \mu\text{s} / 64 \mu\text{s} = 156,25 \approx 156$ . Eli ajastimen laskiessa 156 tapahtumaa on päästy  $10 \text{ ms}$ :iin ja ohjelma menee keskeytykseen. Ajastin täytyy siis asettaa aloittamaan laskeminen  $255 - 156 = 99$ :stä eteenpäin. Ajastin on nyt asetettu, ja ohjelma suorittaa keskeytysfunktion aina kymmenen millisekunnin välein.

### A/D-muuntimen toiminta

Mikro-ohjaimen nasta voidaan asettaa lukemaan nastalle tulevaa jännitettä. Fototransistori antaa ulos arvoja nollan ja lähdejännitteen väliltä riippuen siihen kohdistuneesta valon määrästä tai voimakkuudesta. Jotta näitä arvoja voidaan tulkita mikro-ohjaimella, voidaan käyttää siihen sisäänrakennettua A/D-muunninta, joka muuttaa analogisen jännitteen digitaaliseksi luvuksi. PIC16LF18313 mikro-ohjaimessa on 10-bittinen A/D-muunnin, mikä tarkoittaa, että muunnin pystyy tallentamaan lukuja 10-bittisen luvun maksimiarvon verran, eli väliltä 0 - 1023. A/D-muuntimen referenssi voidaan asettaa esimerkiksi siten, että pienin mahdollinen arvo (0) on mikro-ohjaimen  $V_{SS}$ -liittimeen kytketty jännite, ja suurin (1023)  $V_{DD}$ -liittimeen kytketty jännite (kuva 11). Tällöin esimerkiksi  $3 \text{ V}$ :n lähdejännitteellä voidaan laskea  $3 \text{ V} / 1023 = 0,0029 \text{ V}$ , jolloin yksi A/D-muuntimen askel vastaa noin kolmea millivolttia. Nyt esimerkiksi syötettäessä A/D-muuntimelle  $2 \text{ V}$  muuttuu se digitaaliseksi luvuksi  $2 \text{ V} / 0,0029 \text{ V} = 689,655 = 690$ .

Kun fototransistori ja IR-LED on asetettu silmän eteen, lediltä lähtevä infrapunasäteily heijastuu sarveiskalvolta osittain takaisin fototransistorille, ja mikro-ohjaimen A/D-muunnin lukee senhetkisen arvon. Suljettaessa silmä silmäluomi tulee sarveiskalvon eteen ja fototransistorille palaava heijastus muuttuu, tähän asti kaikis-

sa tapauksissa heijastuksen voimakkuus on kasvanut. Tämä muutos näkyy A/D-muuntimelle tulevassa jännitteessä, ja tätä eroa voidaan ohjelmallisesti mitata ja vertailla. Kalibroimalla anturi voidaan määrittellä arvot, joiden avulla silmän tiedetään olevan avoinna taikka suljettuna.

### Kalibroinnin toteutus

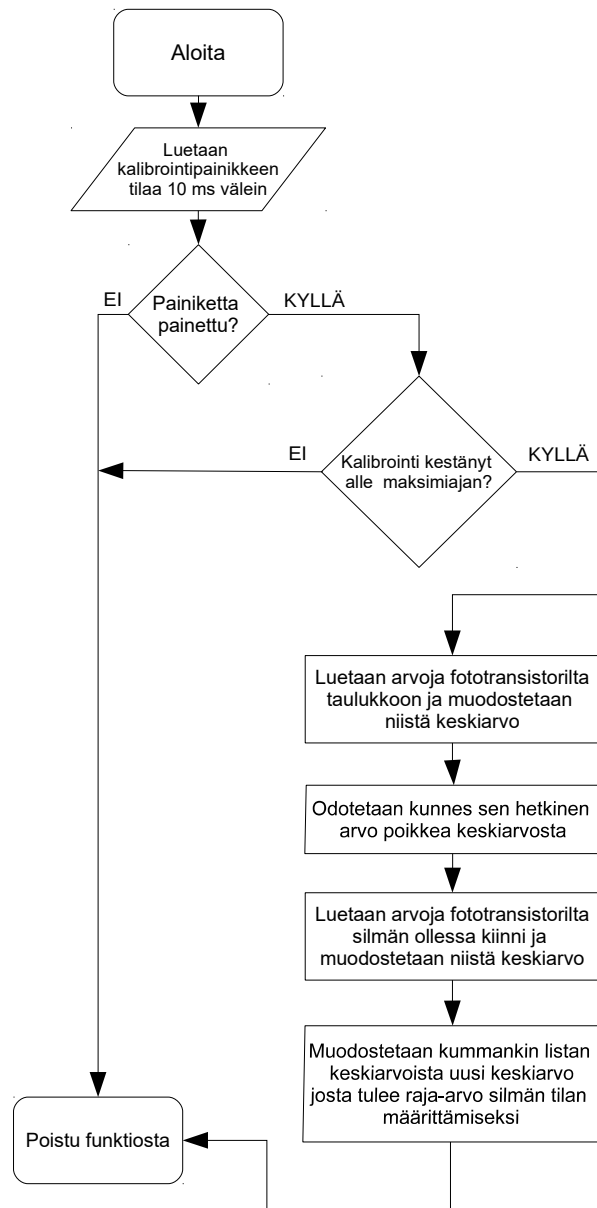
Prototyypipiirilevylle suunniteltiin kalibrointia varten painonappi, jota painamalla on tarkoitus suorittaa anturin kalibrointi. Kalibrointi tulee olla mahdollista suorittaa missä tahansa ohjelman vaiheessa ja tarvittaessa monta kertaa. Hyvän toimintavarmuuden takaamiseksi kalibrointi on hyvä suorittaa aina aloittaessa laitteen käyttö ja aina anturin paikkaa siirrettäessä. Kalibrointi olisi mahdollista toteuttaa myös automaattisesti ilman painonappia, esimerkiksi viiden minuutin välein.

Painonappia käytettäessä ohjelma tarkistaa jokaisella ajastimen keskeytyksellä (10 ms:n välein) painonapin tilan. Jos painonappia on painettu, ohjelma asettaa kalibroinnin päälle, jolloin normaali ajastimen keskeytysfunktio ei toteudu, ja ohjelma menee kalibrointifunktioon.

Kalibrointiohjelman alussa ohjelma mittaa ensin fototransistorilta tietyn määrän silmän senhetkisiä heijastusarvoja taulukkoon. Silmän tulee olla tässä vaiheessa auki. Taulukon arvoista muodostetaan keskiarvo, jonka jälkeen odotetaan, että silmän tila muuttuu poiketen muodostetusta keskiarvosta. Kun silmän tila muuttuu, eli silmä suljetaan, mitataan uudelleen tietty määrä senhetkisiä heijastusarvoja taulukkoon. Näistä arvoista muodostetaan jälleen keskiarvo. Nyt kahdesta muodostetusta keskiarvosta muodostetaan vielä keskiarvo, josta muodostetaan raja-arvo silmän tilalle. Ensimmäinen keskiarvo siis kertoo silmältä palaavan heijastuksen määrän sen ollessa auki, ja toinen silmän ollessa kiinni. Nyt kun silmä suljetaan, fototransistorille palaava heijastus ylittää viimeisestä keskiarvosta muodostetun raja-arvon, ja ohjelma tulkitsee silmän olevan kiinni.



Kalibroitiohjelman toimintaa havainnollistetaan myös vuokaavion 13 avulla.



Kuva 13. Kalibroinnin yksinkertaistettu vuokaavio

## Silmänräpäyksen keston määrittely

Ihminen räpäyttää silmäänsä automaattisesti eli tahattomasti noin 15 kertaa minuutissa. Yhden räpäyksen kesto on keskimäärin 100 - 150 millisekuntia. [14.] Apuvälinehiiren silmänräpäyskytkimen ei ole tarkoitus rekisteröidä tahattomia silmänräpäyksiä, joten nämä tulee suodattaa pois ohjelmallisesti. Käyttämällä mikro-ohjaimen ajastinta, jonka keskeytystaajuuden olemme määrittäneet kymmenen millisekunnin välein, voimme helposti suodattaa ei-halutut tahattomat räpäykset pois. Jos yhden tahattoman räpäyksen kesto on maksimissaan 150 millisekuntia, voidaan asettaa ehto, jonka mukaan silmän tulee olla kiinni vähintään kahdenkymmenen keskeytyksen ajan ( $10ms \cdot 20 = 200ms$ ) jolloin järjestelmä ei hyväksy räpäystä, jos se kestää alle 200 millisekuntia. Silmänräpäyksen keston voisi myös tilannekohtaisesti määrittää lisäämällä kalibrointifunktioon räpäyksen kestoa mittaava kohta, mutta prototyypin kannalta myös kiinteästi määritetty raja-arvo on toimiva.

### 5.3 Virrankulutukseen vaikuttavat tekijät

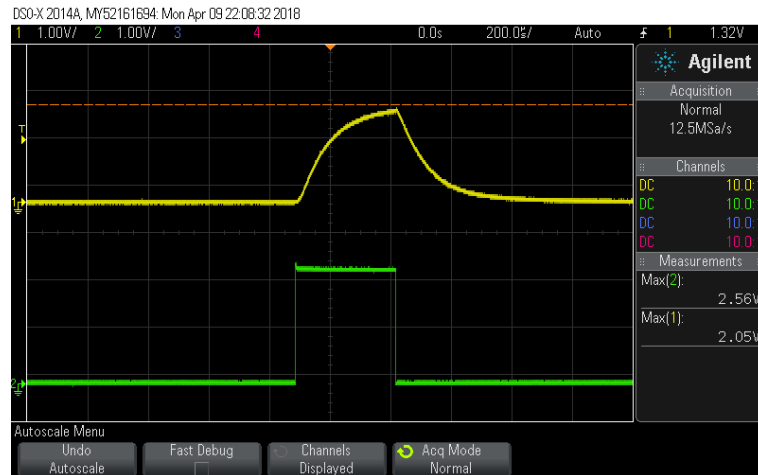
Silmänräpäyskytkimen virrankulutuksen tulee olla mahdollisimman alhainen, jotta se ei vaikuttaisi apuvälinehiiren käyttöaikaan tyhjentäen sen akkua liian nopeasti. Tavoitteena on, että kytkimen virrankulutukseksi saadaan noin 1 mA. Piirin todennäköisesti suurin virtaa kuluttava komponentti on IR-LED, jonka läpi kulkevaa virtaa voidaan rajoittaa etuvastuksella. Prototyypilevyllä etuvastuksen kooksi määritettiin 220 ohmia, jolloin kolmen voltin lähdejännitteellä ledin läpi kulkisi 6 mA:n virta. Virrankulutuksen kannalta optimaalinen tilanne olisi löytää sellainen IR-LED, joka pystyisi tuottamaan mahdollisimman suuren säteilytehon mahdollisimman pienellä virralla. Jos säteilyteho on liian pieni, infrapuna-anturi ei välttämättä toimi halutulla tavalla, jolloin silmältä palannut heijastus ei ole tarpeeksi vahva luotettavaan silmänräpäyksen tunnistamiseen. Jos IR-ledin tarvitsema virta on liian suuri, mikro-ohjaimen virransyöttö ei välttämättä riitä ledin käyttämiseen. Suuri virta myös luonnollisesti tarkoittaa suurempaa virrankulutusta, jota nimen-

maan pyritään pienentämään.

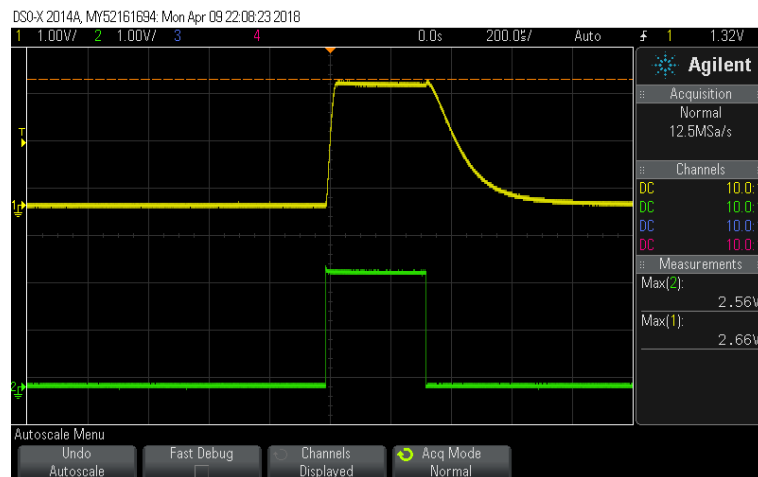
Yksi tapa pienentää IR-ledin käyttämää kokonaisvirtaa on ajaa lediä pulssitetulla signaalilla. Pulssitettaessa signaalia LED on päällä vain pienen hetken, esimerkiksi fototransistorin nousuajan verran. Pulssittaminen voi parhaimmillaan pienentää virrankulutusta ratkaisevasti. IR-ledin nousuaika, eli se aika minkä aikana ledin kirkkaus nousee päälle kytkettäessä huippuunsa, on erittäin nopea, noin 15 ns:n luokkaa riippuen komponentista. Lediä voitaisiin pulssittaa esimerkiksi 20 ns kerrallaan, jolloin LED ehtii varmasti nousta täyteen kirkkauteen ennen sen sammumista.

Myös vastaanottimen eli fototransistorin nousuaika vaikuttaa olennaisesti valittuun pulssitaajuuteen. Fototransistorin nousuaika, eli se aika, mikä fototransistorin ulostulon nousemisessa kestää valoa havaitessa, on yleensä huomattavasti hitaampi verrattuna esimerkiksi fotodiodiin. Työssä käytettyjen fototransistoreiden datalehdessä ilmoitettu nousuaika on noin 15  $\mu$ s:n luokkaa. Nousuaikaan vaikuttaa myös komponentin läpi ajettu virta, sekä transistorille heijastuvan valon intensiteetti. Kuvassa 14 ja 15 on oskilloskoopilla mitattu valmiin prototyyppiin fototransistorin ulostulosta, eli liitteen 1 piirikaaviossa esitetyn R4 vastuksen yli mitattu jännitteen nousuaika keltaisella. Oskilloskoopin kuvissa siis vaaka-akseli kuvaa aikaa ja pystyakseli jännitettä. Vihreä signaali kuvaa 200  $\mu$ s:n mittaisella pulssilla ohjatun IR-ledin jännitettä. Kuvassa 14 fototransistorille heijastuneen infrapunasäteilyn määrä on pienempi, kun taas kuvassa 15 heijastuneen infrapunasäteilyn määrä on erittäin korkea. Fototransistorille heijastuneen säteilyn voimakkuutta voidaan arvioida tarkastelemalla kuvissa näkyvää jännitelukemaa  $Max(1)$ . Kuvis-  
ta voidaan erityisesti havaita, että kuvassa 14 fototransistorin ulostulojännite on noussut huippuunsa vasta kun 200  $\mu$ s:n mittainen IR-ledin pulssi on sammumassa. Kuvan perusteella ei voida myöskään tietää, olisiko jännite vielä noussut entisestään ennen ledin sammumista. Kuvasta 15 taas huomataan, että fototransistorin ulostulojännite nousee lopulliseen arvoonsa lähes välittömästi samaan aikaan kun IR-LED kytkeytyy päälle. Mittauksella voidaan arvioida käytettävän fototransistorin nousuaikaa käytännössä, jonka avulla voidaan lopulta määrittää tarvittava

## IR-ledin pulssinpituus.



Kuva 14. Fototransistorin nousuaika ja ulostulojännite vastaanottaessa vain vähän heijastusta (keltaisella). Vihreä kuvaaja on lediä ajava pulssi.



Kuva 15. Fototransistorin nousuaika ja ulostulojännite vastaanottaessa maksimaalisen heijastuksen (keltaisella). Vihreä kuvaaja on lediä ajava pulssi.

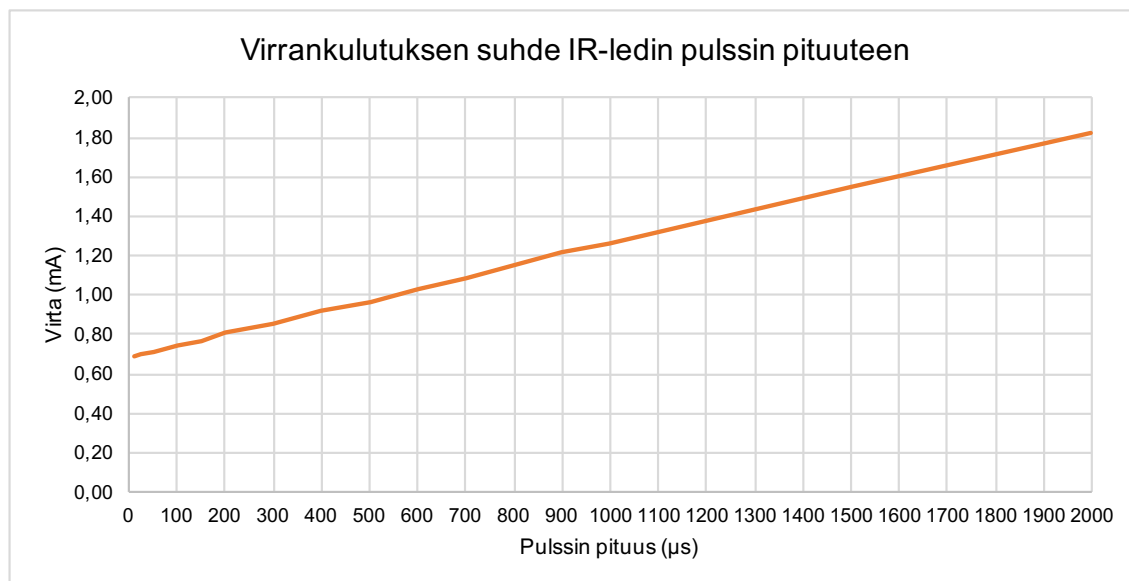
Seuraavaksi voidaan aloittaa prototyypin testaaminen. Samalla varmistetaan, että prototyypin virrankulutus on annettujen ohjeiden mukainen.

## 6 Prototyypin testaaminen

Prototyypin valmistuttua varmistetaan, että sen toiminta vastaa suunnitellun lopputuloksen toimintaa. Mittaamalla tarkistetaan, että prototyypin virrankulutus on tavoitearvon mukainen. Oskilloskoopin avulla voidaan varmistaa, että ohjelmassa määritellyt pulssinpituudet ja muut toiminnot ovat määritetty oikein. Mitataan myös IR-ledin läpi kulkeva virta, ja verrataan sitä etuvastuksen mitoituksella tavoiteltuun virtaan. Lopuksi testataan silmänräpäyskytkimen käytännön toimintaa lyhyesti pienen testiryhmän kesken, lähinnä keskittyen mahdollisiin eroavaisuuksiin kalibrointituloksissa, sekä kuinka nopeasti testihenkilöt oppivat laitteen käytön.

### Virrankulutuksen mittaaminen

Piirin keskimääräistä virrankulutusta mitataan kahdella laadukkaalla yleismittarilla sekä oskilloskoopilla. Yleismittari kytketään sarjaan pariston jälkeen, ja oskilloskooppi rinnan virranmittausvastuksen (katso liite 1) yli. Prototyypilevyn virrankulutusta mitattiin ohjattaessa IR-lediä eri pituisilla pulsseilla, jotta voidaan kartoittaa minkälainen virrankulutus on odotettavissa jos pulssinpituutta kasvatetaan tai pienennetään. Kuva 16 kuvaa piirin virrankulutuksen suhdetta IR-ledin päälläoloaikaan suoraan paristolta mitattuna Fluke 177-yleismittarilla. Tarkemmat mittaustulokset ovat kokonaisuudessaan liitteessä 3.

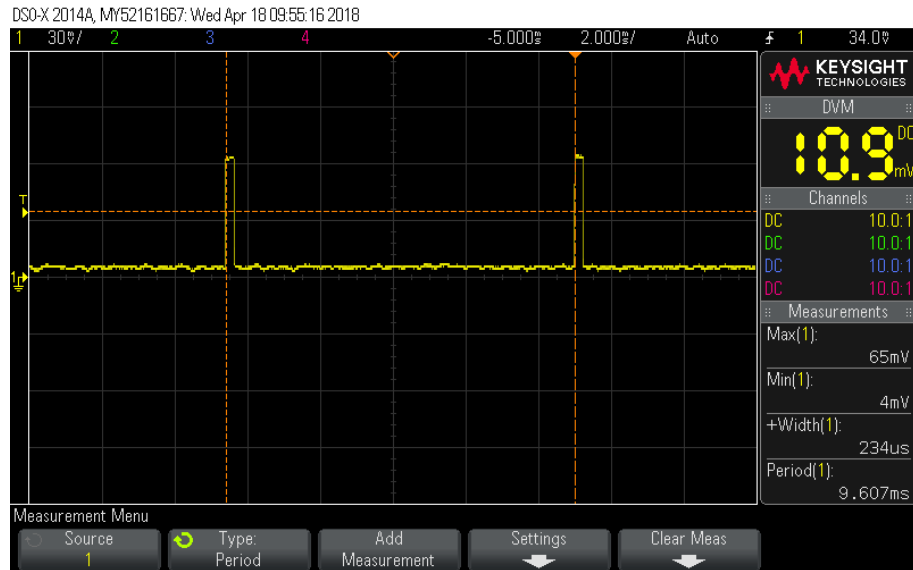


Kuva 16. Piirin virrankulutuksen suhde lediä ajavan pulssin pituuteen

Kuvaajasta voidaan päätellä, että pulssin kestäessä alle 500 µs, piirin kokonaisvirrankulutus pysyy alle tavoitellun yhden milliampeerin.

#### Ohjelman toiminnan arviointi mittaamalla

Oskilloskoopilla mittaamalla voidaan myös tarkistaa, että ohjelmassa määritelty pulssinpituus ja keskeytysväli toteutuvat, eli ohjelma toimii varmasti oikein. Tarkistetaan myös, että IR-ledin virta on etuvastuksen mitoituksen mukainen. Kuvassa 17 on oskilloskoopilla mitattu jännitteen kuvaaja aikatasossa, kun IR-lediä ajetaan 200 µs:n pulssilla. Piirilevyn virranmittausvastuksen yli mitattu maksimijännite (kuvassa 17 Max(1)) on IR-ledin päällä ollessa 65 mV ja kun IR-LED on poissa päältä minimijännite Min(1) on 4 mV, eli ledin käyttämä virta on  $(0,065 \text{ V} - 0,04 \text{ V}) / 10 \Omega = 6,1 \text{ mA} \approx 6 \text{ mA}$ , joka on sama kuin etuvastuksella mitoitettu tavoitevirta. IR-ledin pulssinpituus (kuvassa 17 +Width(1)) on muutaman kymmenen mikrosekunnin heittoa lukuun ottamatta tavoiteltu 200 µs, ja keskeytysväli (kuvassa 17 Period(1)) on erittäin lähellä tavoiteltua kymmentä millisekuntia.



Kuva 17. Oskilloskoopin näytönkaappaus mitatessa piirin jännitettä 10 ohmin mittavastukselta.

### Valmiin prototyypin testaaminen

Kun sekä piirilevy että ohjelma valmistuivat, sen toimintaa testattiin ensin oma-toimisesti. Prototyyppi toimi muuten hyvin, mutta sen ohjelma vaati hieman hienosäätöä. Kun ohjelma saatiin hiottua toimivaksi, silmänräpäyskytkimen toimintaa testattiin viiden (5) henkilön testiryhmässä. Työn aikataulurajoitusten vuoksi testit ovat vain suurpiirteisesti toteutettuja, ja tarkempia analyyskejä tuloksista ei suoriteta. Valmis prototyyppi kytkettiin apuvälinehiireen USB-johdolla, ja apuvälinehiiri yhdistettiin tietokoneeseen. Testihenkilöille kerrottiin lyhyesti laitteen toiminnasta ja mitä tulnaisiin testaamaan. Apuvälinehiiri asetettiin testihenkilön päähän, ja silmänräpäyskytkin aseteltiin silmän alapuolelle osoittamaan silmää kohti alaviistosta. Seuraavaksi suoritettiin kalibrointi, jonka etenemistä seurattiin tietokoneen terminaali-ikkunasta. Kun kalibrointi oli suoritettu, testihenkilölle annettiin tehtäväksi avata internet selain ja käynnistää vapaavalintainen video YouTube-videopalvelusta apuvälinehiirtä ja silmänräpäyskytkintä käyttäen. Jos testihenkilö onnistui, lisätehtäväksi annettiin videon äänen mykistäminen ja videon pysäyttäminen.

Kaikki testihenkilöt onnistuivat tehtävissä hyvin. Haasteita aiheutti kytkimen vaikea sijoittelu ja oikean kohdistuskulman säilyttäminen. Testihenkilöiden huomattiin myös liioittelevan silmänräpäystä, ja osalle silmän räpäyttäminen oli hieman vaikeaa. Kalibroitaessa ei tullut esiin merkittäviä kalibrointitulosten eroavaisuuksia testihenkilöiden välillä, suurin kalibrointiin merkittävä tekijä oli huoneen valaistus, joka pyrittiin pitämään muuttumattomana koko testien suorittamisen ajan.

## 7 Yhteenveto

Tämän työn tavoitteena oli konseptoida apuvälinehiireen liitettävä silmänräpäysanturin prototyyppi. Prototyyppi toteutettiin hyödyntämällä olemassa olevaa infrapuna-anturitekniikkaa ja ohjelmoitavaa mikro-ohjainta käyttäen. Työn rajauksesta ei alun perin tehty kovin tarkkaa, jotta työn aikana opittua tietoa pystyttäisiin soveltamaan mahdollisimman tehokkaasti. Käytettäväksi suunniteltu aika oli riittävä, mutta ajan jakaminen työn eri osa-alueisiin oli haastavaa. Työ sisälsi monipuolisesti haasteita sekä teoreettisen taustatyön osalta, että myös varsinaisen tuotekehityksen kannalta.

Suunniteltu silmänräpäyskytkimen prototyyppi oli onnistunut ja saatiin toimimaan halutulla tavalla. Prototyypipiirilevyllä onnistuttiin toimittamaan napsautuskäsky päätelaitteelle, sekä yhdessä ohjaamaan päätelaitteen kanssa ohjaamaan tietokoneita ja esimerkiksi kirjoittamaan tekstiä. Piirilevyn suurehkon koon vuoksi tarkkoja testejä prototyypin toimintavarmuudesta oli vaikea suorittaa, mutta prototyypin soveltuvuutta pystyttiin kuitenkin löyhästi testaamaan pienen testiryhmän kesken. Testien tapahtuessa normaalissa työhuonevalaistuksessa prototyyppi toimi odotetusti ja testihenkilöt oppivat sen käytön nopeasti.

Prototyypin suurin heikkous tällä hetkellä on alttius auringon valon aiheuttamille häiriöille. Esimerkiksi kalibrointi ei välttämättä toimi halutulla tavalla, jos laite on suorassa auringonpaisteessa. Osittain tämä ongelma ratkeaa, jos seuraava prototyyppi rakennetaan osittain suljettuun koteloon. Ohjelmaa ajatellen ainakin kalibroinnin toimintavarmuutta sekä digitaalista häiriönsuodatusta voidaan paran-



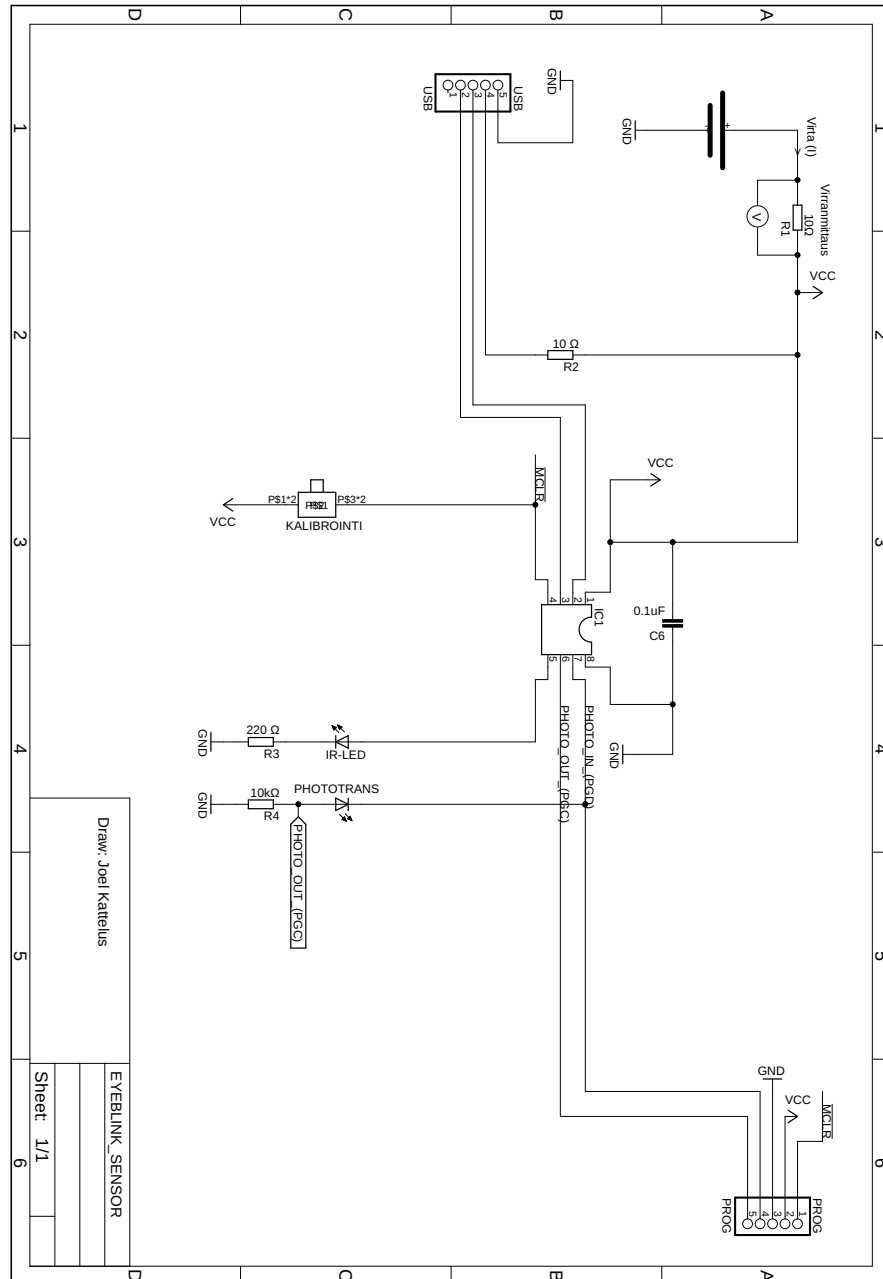
nella entisestään. Piirilevyn kannalta seuraava askel olisi pienentää sen kokoa merkittävästi siten, että se mahtuisi noin 1 x 2 cm kokoiseen koteloon. Hyödyllistä olisi myös etsiä mahdollisimman vielä nykyistä paremmalla säteilyteho/virta-suhteella toimiva IR-LED, joka mahdollistaisi vahvan heijastuksen silmäluomelta fototransistorille kuluttamatta kuitenkaan liikaa virtaa.

## Lähteet

- 1 Quha Zono. 2013. Verkkoaineisto. Quha Oy.  
<<http://www.quha.com/products-2/zono/>>. Luettu 17.4.2018.
- 2 C. Eugene Moss – Ronald J. Ellis – Wordie H. Parr – William E. Murray. Biological Effects of Infrared Radiation. Switzerland. 1982.
- 3 Why are there only six fundamental colors: red, orange, yellow, green, blue, and violet?. 2012. Verkkoaineisto. Carnegie Mellon Robotics Academy.  
<<http://wtamu.edu/~cbaird/sq/2012/12/04/why-are-there-only-six-fundamental-colors-red-orange-yellow-green-blue-and-violet/>>. Luettu 17.4.2018.
- 4 Biological Effects of Infrared Radiation. 2001. Verkkoaineisto. Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing National University of Singapore. <<https://crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/rsmain.htm>>. Luettu 17.4.2018.
- 5 Ultravioletti- ja lasersäteily. 2009. Verkkoaineisto. Säteilyturvakeskus STUK. <<https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/ultravioletti-ja-lasers%C3%A4teily-kirja-luku-8.pdf/>>. Luettu 17.4.2018.
- 6 Mihin käytetään infrapunavaloa?. 2015. Verkkoaineisto. Suomen Akatemia. <<http://www.aka.fi/fi/tietysti/kysy-tieteesta/mihin-kaytetaan-infrapunavaloa/>>. Luettu 17.4.2018.
- 7 What is an IR Sensor. 2015. Verkkoaineisto. Carnegie Mellon Robotics Academy. <[http://education.rec.ri.cmu.edu/content/electronics/boe/ir\\_sensor/1.html](http://education.rec.ri.cmu.edu/content/electronics/boe/ir_sensor/1.html)>. Luettu 17.4.2018.
- 8 Aaltonen, Juha – Kousa, Seppo – Stor-Pellinen, Jyrki. Elektroniikan perusteet. Suomi. 2004.
- 9 Recent advances in polymer phototransistors. 2015. Verkkoaineisto. Royal Society of Chemistry. <<http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/py/c5py01373a#!divAbstract>>. Luettu 17.4.2018.
- 10 Exploration of safety issues in Eyetracking. 2008. Verkkoaineisto. Communication by Gaze Interaction (COGAIN). <<http://wiki.cogain.org/images/c/c8/COGAIN-D5.4.pdf>>. Luettu 17.4.2018.
- 11 Eye Safety of IREDs used in Lamp Applications - Application Note AN090. 2016. Verkkoaineisto. OSRAM Opto Semiconductors GmbH.

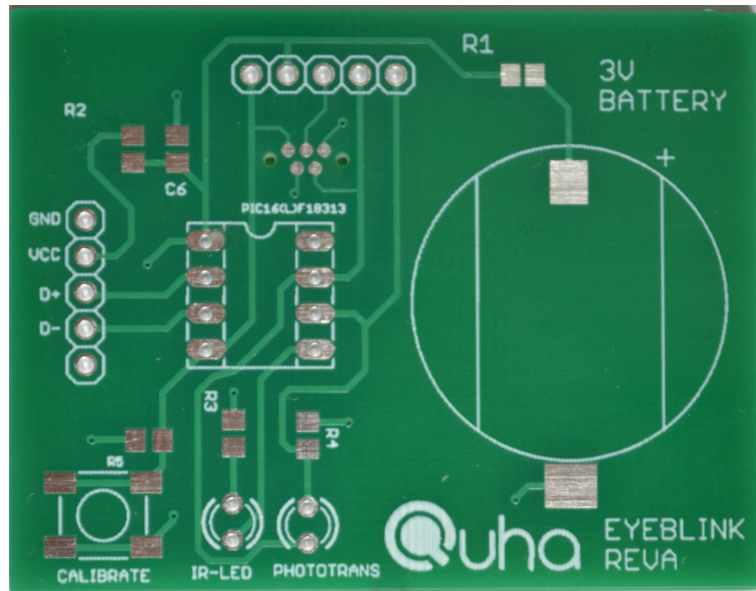
- <[https://www.osram.com/os/applications/application-notes/application\\_notes\\_infrared\\_emitters\\_detectors\\_sensors.jsp](https://www.osram.com/os/applications/application-notes/application_notes_infrared_emitters_detectors_sensors.jsp)>. Luettu 17.4.2018.
- 12 Eye Safety for Proximity Sensing Using Infrared Light-emitting Diodes – Application Note AN1737. 2016. Verkkoaineisto. Renesas Electronics Corporation. <<https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/an17/an1737.pdf>>. Luettu 19.4.2018.
- 13 PIC16F18313. 2017. Verkkoaineisto. Microchip Technology Inc. <<https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F18313>>. Luettu 17.4.2018.
- 14 Blink and you miss it!. 2006. Verkkoaineisto. University College London. <<http://www.ucl.ac.uk/media/library/blinking>>. Luettu 17.4.2018.

# 1 Prototyypilevyn piirikaavio

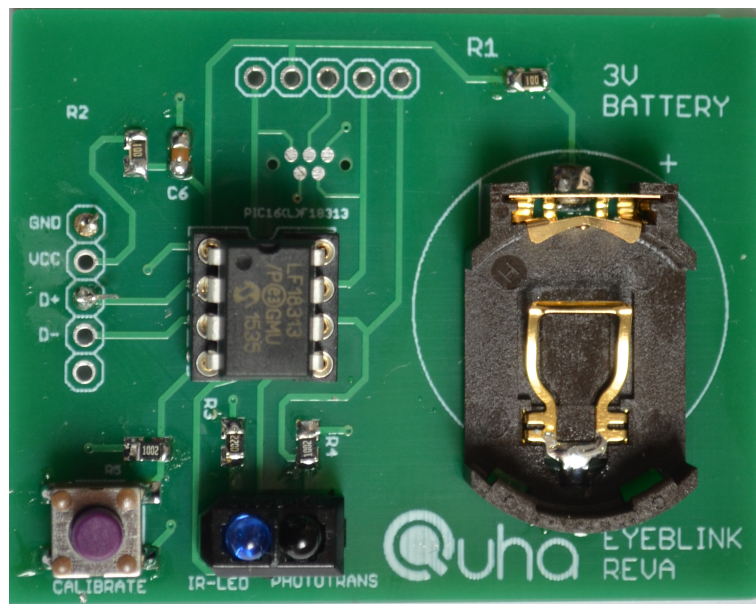


Kuva 18. Eagle-piirilevynsuunnitteluohjelmalla suunniteltu prototyypilevyn piirikaavio.

## 2 Kuvat piirilevyistä



Kuva 19. Tehtaalta tullut valmis piirilevy ilman komponentteja.



Kuva 20. Piirilevy juotettuna ja valmiina käyttöön.

### 3 Prototyypilevyn virrankulutus

Taulukko 6. Kahdella eri mittarilla mitatut mittaustulokset piirin virrankulutuksesta IR-ledin eri pulssinpituuksilla.

| Mittari →           | HP34401A             | FLUKE 177            |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| Mittauskohta →      | Paristo              | Paristo              |
| Pulssin pituus (μs) | Kokonaisvirta I (mA) | Kokonaisvirta I (mA) |
| 10                  | 0,68                 | 0,69                 |
| 25                  | 0,69                 | 0,70                 |
| 50                  | 0,70                 | 0,71                 |
| 100                 | 0,73                 | 0,75                 |
| 150                 | 0,76                 | 0,77                 |
| 200                 | 0,79                 | 0,81                 |
| 300                 | 0,84                 | 0,85                 |
| 400                 | 0,90                 | 0,92                 |
| 500                 | 0,95                 | 0,97                 |
| 600                 | 1,02                 | 1,03                 |
| 700                 | 1,07                 | 1,09                 |
| 800                 | 1,13                 | 1,15                 |
| 900                 | 1,20                 | 1,22                 |
| 1000                | 1,24                 | 1,26                 |
| 1500                | 1,53                 | 1,55                 |
| 2000                | 1,80                 | 1,82                 |