



Anton Sizko

# Hammashoitokoneen langattoman jalkaohjaimen uudelleensuunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

28.12.2022

# Tiivistelmä

Tekijä:	Anton Sizko
Otsikko:	Hammashoitokoneen langattoman jalkaohjaimen uudelleensuunnittelu
Sivumäärä:	49 sivua + 6 liitettä
Aika:	28.12.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Elektroniikka
Ohjaajat:	Suunnittelupäällikkö Mika Luukkanen Lehtori Heikki Valmu

---

Insinöörityö kuvaa Planmeca Oy:lle tehtyä hammashoitokoneen langattoman jalkaohjaimen elektroniikan uudelleensuunnittelua. Tuotannossa olevan jalkaohjaimen yhdistetty radiolähetin ja mikroprosessori oli tulossa elinkaarensa päähän, mikä aiheutti akuutin tarpeen korvaavan ratkaisun etsimiselle.

Työn tavoitteena oli valita sopiva korvaaja radiopiirille ja uudelleensuunnitella jalkaohjaimen muu elektroniikka sen kanssa yhteensopivaksi. Suunnittelun lähtötietojen määrittämiseksi haettiin soveltuvat viranomaisvaatimukset lääkinnällisiä laitteita ja langatonta viestintää koskevista standardeista.

Korvaavan piirin valinnan myötä ohjaimen kommunikointitekniikka vaihtui Zigbeestä Bluetoothiksi. Vaihtunut protokolla edellyttää myös ohjaimen laiteohjelmiston uusi-  
mista, mikä kuitenkin rajattiin tämän työn ulkopuolelle.

Työn lopputuloksena oli uudistetun jalkaohjaimen piirikortti, joka voitaneen ohjelmis-  
tokehityksen ja hyväksyntätestaamisen myötä siirtää tulevaisuudessa tuotantoon.

Avainsanat: hammashoitokone, jalkaohjain, langaton viestintä, radio-  
tekniikka, Bluetooth, elektroniikkasuunnittelu, PADS

## Abstract

Author: Anton Sizko  
Title: Redesign of Wireless Dental Unit Foot Controller  
Number of Pages: 49 pages + 6 appendices  
Date: 28 December 2022

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering  
Professional Major: Electronics  
Supervisors: Mika Luukkanen, Design Manager  
Heikki Valmu, Principal Lecturer

---

This thesis describes the electronics redesign of a wireless dental unit foot controller for Planmeca Oy. The previous foot controller utilized a microcontroller with an integrated radio transceiver, which had been discontinued by its manufacturer. This necessitated finding a replacement component and subsequent redesign of the electronics.

An overview of international standards and legislation that govern the design and manufacturing of medical electrical equipment and wirelessly communicating devices is included in this report, since an understanding of such requirements was needed to choose the replacement radio component.

During this project the wireless communication technology of the foot controller was updated to from Zigbee to Bluetooth Low Energy. This requires comprehensive changes to the software of the controller, which are however left outside the scope of this thesis.

The results include the new electronics design, which encompass an updated schematic and printed circuit board layout files. The process of the electronics design is outlined in this report. The board design is ready to manufacture and can be tested for functionality after software development is completed.

Keywords: dental unit, foot controller, wireless communication, radio, Bluetooth, electronics design, PADS

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Planmeca ja projektin taustaa	2
3	Medikaalilaitteen hyväksynät ja langaton viestintä	4
3.1	Radioaallot, taajuusalueiden sääntely ja ISM-laitteet	7
3.2	Langattoman viestinnän vaikutus hyväksyntään	9
3.3	Radiolaittehyväksynnästä muutamilla kohdemarkkinoilla	11
4	Lähtötilanne uuden jalkaohjaimen suunnitteluun	14
4.1	Huomioita lähetystekniikan valinnasta jalkaohjainkäyttöön	14
4.2	Bluetooth Low Energy	16
4.3	Aiempi jalkaohjaimen elektroniikka	20
4.4	Antennisuunnittelu ja integroidut moduulit antenneilla	25
5	Komponentin valintaperusteet	29
5.1	Kysely valintakriteeristön laatimiseksi	29
5.2	Tyypillisen käyttötapauksen määrittely	35
5.3	Komponenttien arviointi kriteereittäin	36
6	Elektroniikkasuunnittelun toteutus	40
6.1	Signaalikartoitus ja komponentin valinta	40
6.2	PADS-suunnittelu ympäristö ja uuden komponentin luominen	41
6.3	Piirikaaviosuunnittelu	44
6.4	Piirilevysuunnittelu	45
7	Yhteenveto	48
	Lähteet	50

## Liitteet

Liite 1: ITU radiotaajuuksien aluejaot sekä ISM-taajuudet

Liite 2: Kyselyn kriteerien selitteet

Liite 3: Kyselyvastaukset

Liite 4: Pisteytysperusteet kriteereittäin

Liite 5: Ohjaimen elektronikan signaalikartoitus

Liite 6: Piirikaavio ja piirilevyn kerroskuvat

## Lyhenteet ja käsitteet

AFH	<i>Adaptive Frequency Hopping.</i> Bluetoothin taajuushyppelytekniikka.
BLE	<i>Bluetooth Low Energy.</i> Bluetooth-tiedonsiirtotekniikan versio.
CAD	<i>Computer-Aided Design.</i> Tietokoneavusteinen suunnittelu.
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing.</i> Tietokoneavusteinen valmistus.
CAN	<i>Controller Area Network.</i> CAN-väylä, automaatiiväylä.
EMC	<i>Electromagnetic compatibility.</i> Sähkömagneettinen yhteensopivuus.
EMI	<i>Electromagnetic interference.</i> Sähkömagneettiset häiriöt, eritoten radiotaajuiset häiriöt.
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum.</i> Hyppivätaajuinen hajaspektritekniikka.
FSK	<i>Frequency-Shift Keying.</i> Vaihtotaajuusmodulaatio tai taajuusavainnus.
GFSK	<i>Gaussian Frequency-Shift Keying.</i> Gauss-suodatettu vaihtotaajuusmodulaatio.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission.</i> Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio.
ITU	<i>International Telecommunication Union.</i> YK:n alainen kansainvälinen televiestintäliitto.
NiMH	Nikkelimetallihydridi. Yksi ladattavien akkujen teknologia.

PIFA	<i>Planar Inverted F-Antenna</i> . Piirilevytasolle toteutettu invertoitu F-antenni
RF	<i>Radio Frequency</i> . Radiotaajuus, esim. radiotaajuinen kommunikointi eli RF-kommunikointi.
SAR	<i>Specific Absorption Rate</i> . Ominaisabsorptionopeus. Kudokseen imeytyvän sähkömagneettisen säteilytehon mitta, W / kg.
SMD	<i>Surface-Mount Device</i> . Pintaliitoskomponentti, jota varten piirilevyyn ei tarvitse tehdä reikiä.
SRD	<i>Short-range Device</i> . Lyhyen kantaman radiolaite, kuten Bluetooth tai Wi-Fi-laite.

# 1 Johdanto

Tämä insinööri työ koskee Planmeca Oy:lle tehtyä hammashoitokoneen langattoman jalkaohjaimen elektroniikan uudelleensuunnittelua. Tuotannossa olevan jalkaohjaimen mikrokontrolleri integroidulla radiopiirillä oli tulossa elinkaarensa päähän, mikä aiheutti akuutin tarpeen korvaavalle komponentille. Työn tavoitteena oli valita sopiva korvaaja radiopiirille ja uudelleensuunnitella jalkaohjaimen aiempi elektroniikka sen kanssa yhteensopivaksi. Korvaavan piirin valinnassa langattoman kommunikoinnin toteutustapaa oli mahdollista tarkastella uudelleen ja modernisoida ohjainta tältä osin. Ohjaimen akkukäyttöisyyden vuoksi muun muassa uudempien radiomoduulien matalampi virrankulutus oli kiinnostuksen kohteena.

Työn pääpainoarvo oli laitesuunnittelussa, mutta koska sille asetetaan myös radiolaitteena sekä lääkintälaitteen osana viranomaisvaatimuksia, niiden tarkastelu ja taustoitus oli olennaista suunnittelun lähtötietojen ja rajoitteiden määrittämiseksi. Käytössä olevien resurssien vuoksi työn laajuus rajattiin tietoisesti jalkaohjaimen langattomaan lähetin-vastaanotintekniikkaan. Työssä ei siten otettu kantaa ohjaimen muuhun toiminnallisuuteen, kuten anturointiin, käyttöliittymään tai mekaaniseen toteutukseen, jotka säilyivät ennallaan.

Työ kuvaa RF-lähettimen lääkinnälliseen laitteeseen sisällyttämisen tuomia standardien ja hyväksyntäprosessin vaatimuksia, radiopiirin valintaa perustuneen sekä piirikortin elektroniikkasuunnitteluprosessia. Elektroniikkasuunnittelun ulkopuolisten asioiden, kuten viranomaisvaatimusten, kartoittaminen ja niiden vaikutus lopputulokseen olivat yllättävän merkittävä kokonaisuus. Lopputuloksena ovat kortin piirikaavio ja layout. Niistä valmistettavat prototyyppikortit ja niiden ohjelmointi ovat tätä insinööri työtä seuraava vaihe.



## 2 Planmeca ja projektin taustaa

Planmeca Oy on yksi maailman johtavista terveysteknologian laitevalmistajista, jonka tuotteita viedään yli 120 maahan ympäri maailmaa. Yrityksen tuotevalikoimaan kuuluvat digitaaliset hammashoitokoneet, CAD/CAM-ratkaisut, 2D- ja 3D-kuvantamislaitteet sekä niitä tukevat ohjelmistoratkaisut. Planmeca on alan suurin yksityisomistuksessa oleva hammasteknologiayritys ja osa Planmeca Groupia. Planmeca Groupiin kuuluvat yritykset työllistävät maailmanlaajuisesti lähes 4 500 henkilöä, ja niiden yhteenlaskettu liikevaihto vuonna 2021 oli 1,2 miljardia euroa.

Planmeca-hoitokone (kuva 1) on sähkökäyttöinen hammashoitolaite, joka koostuu potilastuolista, vesi- ja imupuolesta, varsistoista, instrumenteista, hoitovalaisimesta ja jalkaohjaimesta. Hoitokonekonfiguraatioita ja -malleja on useita. Koneen mukana on valittavissa langallinen tai langaton malli jalkaohjaimesta.



Kuva 1. Compact i5, yksi Planmecan hammashoitokonemalleista.

Jalkaohjain (kuva 2) on hammashoitokoneen osa, jolla hammaslääkäri voi ohjata muun muassa hoitokoneen potilastuolin asentoa sekä hoitoinstrumenttien toimintoja, kuten mikromoottorin (eli poran) kierrosnopeutta sekä veden ja ilman puhallusta hoidon aikana. Poran nopeutta ohjataan lineaarisesti tehonsäätövipua sivuttain työntämällä. Vivun painaminen alaspäin vaihtaa poran asetuksia. Pikavalinnat veden ruiskutukselle (spray) ja lastunpuhallukselle (chip blow) ovat saatavilla vivusta painamalla, joten lääkärin ei tarvitse poratessa siirtää jalkaa pois tehonsäätövivulta.

Jalkaohjaimen voidaan konfiguroida laajasti käyttöliittymän muitakin toimintoja, kuten hoitovalaisimen kytkeminen päälle ja pois, jopa klinikan oven aukaisu on mahdollista. Jalkaohjauksella molemmat kädet jäävät vapaaksi instrumenttien käyttöön ja lisäksi vältetään koskettamasta hoitokoneen ohjauspaneelia, mikä varmistaa hoitotapahtuman hygieenisyyden.



Kuva 2. Planmegan jalkaohjaimen langaton malli. Keskellä alhaalla on tehonsäätövipu ja päällä ohjainnappeja.

Jalkaohjaimen anturointi ja langaton kommunikointi ovat kuvattu kattavasti Ari Forsbergin insinööriyössä [1]. Jalkaohjain käyttää kapasitiivista mittausta sekä hall-antureita kytkimien asentojen tunnistukseen. Ohjausliikkeet välitetään

digitaalisena tietona Zigbee-radiolähettimen avulla hoitokoneen vastaanottiin. Langaton jalkaohjainmalli on akkukäyttöinen, mikä aiheuttaa rajoituksia elektroniikan tehonkulutukselle, kuten radiopiirin lähetysteholle.

Langattoman kommunikoinnin standardit, kuten Bluetooth ja Zigbee, ovat päivittyneet jalkaohjaimen alkuperäisen version ajoilta, joten kommunikointitekniikan vaihtaminen oli uudelleensuunnittelussa mahdollista. Esimerkiksi vähäkulutuksista Bluetooth Low Energy -standardia ei vielä aiemman ohjainversion aikaan ollut olemassa.

Kansalliset radiolaitteiden viranomaismääräykset asettavat tarkkoja vaatimuksia kaikille langattomasti kommunikoiville laitteille, joten lopputuotteen tuli olla radiolaittehyväksyttävissä useilla markkina-alueilla kansainvälisesti. Radiohyväksynnän analysoinnin yksi tavoite olikin välttää umpikuja, jossa valituksi tulisi sellainen tiedonsiirtotekniikka, joka on jollain tärkeällä markkina-alueella kielletty tai hankala hyväksyttävä. Aiemman ohjaimen radiolaittehyväksyntäprosessi oli myös omasta antennisuunnittelusta johtuen raskaaksi koettu, joten esihyväksytetyin radiomoduulin hyödyntämistä pidettiin lähtökohtaisesti parempana vaihtoehtona suoraviivaistaa lopputuotteen hyväksyntäprosessia.

### **3 Medikaalilaitteen hyväksynät ja langaton viestintä**

Lääkinnällisten eli medikaalilaitteiden ja -järjestelmien sähköisille ominaisuuksille, kuten sähköturvallisuudelle sekä sähkömagneettiselle yhteensopivuudelle, asetetaan vaatimuksia kansainvälisissä IEC:n (International Electrotechnical Commission) standardeissa. Laitteen tulee täyttää soveltuvien standardien sekä kansallisten säädösten vaatimukset, jotta sitä voidaan myydä kohdemarkkinalla.

Medikaalilaitteiden (medical electrical equipment) turvallisuuden päästandardissa IEC 60601-1 asetetaan vaatimukset laitteen käyttöturvallisuudelle (basic safety) sekä keskeiselle suorituskyvylle (essential performance), jotka määritellään seuraavasti:

3.10 Basic Safety: freedom from unacceptable RISK directly caused by physical HAZARDS when ME EQUIPMENT is used under NORMAL CONDITION and SINGLE FAULT CONDITION.

3.27 Essential Performance: performance of a clinical function, other than that related to BASIC SAFETY, where loss or degradation beyond the limits specified by the MANUFACTURER results in an unacceptable RISK". [2, s. 27–28.]

Käyttöturvallisuudella ja keskeisellä suorituskyyvällä on standardin näkökulmasta olennainen merkitysero. Standardin vaatimuksia onkin ajan myötä tarkennettu koskemaan pelkän käyttöturvallisuuden lisäksi myös suorituskyyvää. Esimerkiksi elämää ylläpitävien laitteiden tulee standardin [2, s. 14–15] puitteissa olla sekä turvallisia että haluttua lääkinnällistä vaikutusta (clinical function) tuottavia. Hengityskoneen sähköturvallisuus ei itsessään vielä takaa sen suorituskyyvää potilaan hengen ylläpitämisessä, joten vaatimukset ovat määritelty molemmille erikseen.

IEC 60601-1 [2, s. 44–45] velvoittaa valmistajaa tekemään riskianalyysin medikaalilaitteen toiminnallisuuksista ja sen turvallisuudesta siten, että ennakoitavat vikatilanteet on kattavasti tunnistettu ja niiden haitallinen vaikutus minimoitu (riskienhallinta). Laitteen tulee olla suunniteltu siten, että se on turvallinen normaalin käytön lisäksi yhden vian tapauksissa (single fault conditions) ja ennakoitavissa olevissa väärinkäytöissä. Siten laitteen turvallisuus nojaa vähintään kahteen, toisistaan riippumattomaan suojausmekanismiin, jolloin yhden suojauksen pettäessä jäljellä oleva suojaus takaa potilasturvallisuuden. Esimerkiksi sähköiskun vaaraa vastaan voidaan suojautua vahvistetulla eristyksellä ja kaikki kosketeltavat osat kattavalla suojavaadoituksella. Suojauksen teknisiä vaatimuksia ja testausta käsitellään standardissa kattavasti. Väärinkäytön mahdollisuus huomioidaan usein lisäämällä laitteen käyttöohjeeseen kieltoja, kuten tiloja, joissa laitetta ei saa käyttää.

Laitteen suorituskyyvälle (essential performance) pitää riskianalyysissä tunnistaa ja spesifioida rajat, joiden ulkopuolella vikaantumisen katsotaan aiheuttavan kohtuuttoman riskin [2, s. 46–47]. Näiden riskien kartoittaminen ja niiden estämiseksi tehdyt toimenpiteet on sisällytettävä riskianalyysiin. On

määrittelykysymys, minkälaiset riskit kunkin medikaalilaitteen kohdalla katsotaan pahimmassa tapauksessa mahdollisiksi. Esimerkiksi edellä mainittujen elämää ylläpitävien laitteiden tapauksessa vikatilanteessa riskinä voisi olla jopa potilaan kuolema.

Erillisen IEC 80601-2-60 -oheisstandardin [3, s. 10] mukaan hammashoitoon käytettävät laitteet ovat vapautettuja essential performance -vaatimuksista, mikäli valmistaja ei itse sellaisia aseta. Planmecan hammashoitokoneille sellaisia vaatimuksia ei ole asetettu, koska niillä annettavan hoidon ei katsota olevan kriittistä hengelle ja terveydelle. Standardin 60601-1 käyttöturvallisuusvaatimukset pätevät toki myös hoitokoneisiin sellaisinaan.

Medikaalilaitteen riskianalyysissä tulee siten tunnistaa kaikki käyttäjään tai potilaaseen kohdistuvat riskit, jotka voivat aiheutua laitteen fyysisistä ominaisuuksista. Käytännön riskejä ovat muun muassa vuotovirrat vikatilanteissa tai suoja-kuorten aukoista kosketeltavien jännitteisten osien aiheuttamat sähköiskun vaarat. Mekaanisia riskejä taas ovat esimerkiksi puristumisvaarat nivellettyjen tai liikkuvien osien väleissä. Näiden lisäksi erilaiset ohjelmistovirheet käyttöliittymässä tai ohjaimissa voivat olla potentiaalisia riskejä, jos jokin laitteen osa tai työkalu toimii odottamattomasti.

Langaton jalkaohjain mielletään 80601-2-60 -standardin [3, s. 25] mukaan osaksi hammashoitokonetta, joten se hyväksytetään hoitokoneen kanssa soveltuvine vaatimuksineen. Sitä koskee myös hoitokoneen yleiset EMC-vaatimukset, mutta ne jätetään laajuudessaan tämän tarkastelun ulkopuolelle. Langattoman jalkaohjaimen tapauksessa akkujen hyvin matalan jännitteen sekä suljetun rakenteen vuoksi sähköiskun riskiä ei käytännössä ole, paitsi mahdollisesti ladataessa, mikäli ei käytetä vaadittua laturia. Virheelliset ohjaukset tai radiotaajuiset häiriöt (EMI) puolestaan tuottavat teoreettisia riskitilanteita, jotka tulee huomioida. Virheellisiä ohjauksia voisi aiheutua mekaanisesta vikaantumisesta tai vaikkapa ohjelmointivirheestä. Ulkopuoliset radiotaajuiset häiriöt puolestaan saattaisivat väliaikaisesti lamauttaa tai sekoittaa ohjaimen, mutta vastaavasti ohjaimen oma radiolähetin voisi häiritä muita laitteita hoitotilassa. Käytettäessä

asianmukaista vakiintunutta lähetystekniikkaa radiopiirien ominaisuudet käytännössä estävät radiotaajuisten häiriöiden vaikutukset, koska laitteet ovat tältä osin tarkasti säädeltäviä.

Medikaalilaitteiden sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta eli EMC:stä (electromagnetic compatibility) säädetään täydentävässä standardissa IEC 60601-1-2 [4]. Päästandardi (60601-1) linjaa sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta vain, että laitteen valmistajan vastuulla on huomioida sähkömagneettisten häiriöiden tuottamat riskit laitteen toiminnalle [2, s. 208]. Tämän arvioinnin määräystenmukaisuus varmistetaan EMC-standardin linjauksissa, muun muassa emissio- sekä immunitetirajoilla, ja niitä vastaavilla mittauksilla annettuja raja-arvoja hyödyntäen. Testirajat asetetaan määritellyn käyttöympäristön (esim. sairaala) mukaisesti, jolloin yhteensopivuus muiden samassa ympäristössä olevien laitteiden kanssa varmistuu.

Vertailemalla EMC-standardin nykyisiä vaatimuksia aikaisemmissä versioissa esitettyihin, voidaan todeta medikaalilaitteiden sähkömagneettisten häiriöiden sietovaatimusten kasvaneen. Tämä on väistämätöntä, sillä nykyään on mahdollista välttää langattomasti kommunikoivien laitteiden käyttöä sairaaloissa ja muissa hoitoympäristöissä [4, s. 9]. Ilmiö on tuttu muualtakin: esimerkiksi aiempi matkapuhelimien käyttökielto matkustajakoneissa lennon aikana on nykyisellään poistunut, johtuen pitkälti uusien vaatimusten myötä paremmin suojatuista ja häiriönkestävämmistä laitteista.

### 3.1 Radioaallot, taajuusalueiden sääntely ja ISM-laitteet

Radioaallot ovat sähkömagneettista säteilyä ja muodostavat sen spektrin matalataajuisimman eli pisimmän aallonpituuden osan. Radioaaltojen aallonpituus vaihtelee tuhansista kilometreistä alle millimetriin, eli radioaallot kattavat taajuuudet muutamista hertseistä useaan terahertsiin. Radioaaltojen spektri puolestaan jaetaan osiin, joita ovat RF-aallot (alle 300 MHz), mikroaallot (300 MHz – 30 GHz), millimetriaallot (30–300 GHz) ja alimillimetriaallot (300 GHz – 3 THz). Määrittelijästä riippuen radioaallon käsitteen ylärajana on pidetty esimerkiksi

300 gigahertsiä, mutta kansainväliset säädökset sisällyttävät määritelmään myös alimillimetriaallot eli taajuudet kolmeen terahertsiin asti. [5, s. 9–10; 6, s. 7.]

Radioaallot, toisin kuin sitä korkeataajuisempi sähkömagneettinen säteily, eivät kykene kudosten molekyylien ionisoimiseen, vaan pelkästään lämmittävään vaikutukseen. Tätä lämmitysvaikutusta on hyödynnetty muun muassa myös mikroaaltouunin toiminnassa. [5, s. 10.] Vähäisten biologisten vaikutustensa myötä radioaallot soveltuvat hyvin eri toimintoihin, kuten tietoliikennekäyttöön, navigointiin ja viestintään. Radiolaitteen lähettämän tehon kudosaikutusta arvioidaan SAR-arvolla, eli ominaisabsorptionopeudella (Specific Absorption Rate). Se kuvaa radioaallostaa ihmisen kudoksiin imeytyvää tehoa, joka ei esimerkiksi lähellä kehoa käytettävillä laitteilla saa olla liian suuri sähkömagneettisen säteilyn lämmittävän vaikutuksen vuoksi. Sen yksikkö on W/kg. Kansainväliset säädökset antavat raja-arvoja SAR:lle taajuuden ja etäisyyden suhteen. [5, s. 271–273.]

SAR kiinnostaa eritoten matkapuhelinten ja puettavan elektroniikan tapauksissa, koska laite on hyvin lähellä kehoa, jopa kosketuksissa. Tämä pätee myös jalkaohjaimiin, sillä siinäkin käyttäjän raaja on lyhyen etäisyyden päässä radiolähettimestä. Pieniä, alle 100 milliwatin, lähetystehoja pidetään kuitenkin lähtökohtaisesti vaarattomina [5, s. 273], ja esimerkiksi Bluetooth-standardin sallima maksimiteho rajoittuu tähän.

Radioaaltojen spektrin äärellisyydestä johtuen eri käyttötarkoituksiin saatavilla olevat taajuudet ovat rajallinen luonnonvara ja riski häiriöistä useamman samanaikaisen käyttäjän vuoksi on ilmeinen. Siksi radiotaajuuksien käyttö on kansainvälisillä sopimuksilla säädeltyä. Radiotaajuuksien yhteiskäytöstä vastaa maailmanlaajuisesti YK:n alainen kansainvälinen televiestintäliitto ITU (International Telecommunication Union). Se on määritellyt kolme maantieteellistä käyttöaluetta radiotaajuuksien jaon eli allokation perustaksi (kartta liitteen 1 kuvassa 1). Maantieteellinen jako perustuu siihen, että useimmissa tapauksissa radiotaajuuksien käytöllä yhdellä alueella ei pysty häiritsemään samantaajuisia

käyttöä koko maailmassa, sillä esimerkiksi mikroaallot etenevät valon kaltaisesti suoraviivaisesti [5, s. 12]. Alueilla on samaa käyttötarkoitusta kohden eri radiotaajuuksia, joten yhdellä alueella hyväksytty, mutta maailmanlaajuisesti myytävä laite ei ole automaattisesti sallittu kaikkialla. Suureen osaan radiotaajuuksista vaaditaan lisäksi kansallisesti radiolupa (tai lisenssi).

ITU [6, s. 8] on kuitenkin määritellyt myös radiolaitteiden teolliseen, tieteelliseen ja lääkinnälliseen hyödyntämiseen tiettyjä ISM-taajuusalueita (Industrial, Scientific and Medical applications), jotka ovat pienitehoisille lähettimille radiolupavapaita, eikä niiden käyttöä siten kansainvälisesti erikseen rajoiteta. ISM-taajuuksien allokatiiossakin on maantieteellisiä eroja – kaikkia taajuuksia ei kaikkialla maailmassa voi vapaasti hyödyntää. Kaikkialla yhteisiä ISM-taajuuksia on kuitenkin olemassa useita. ISM-taajuusalueet on tarkemmin eritelty liitteen 1 taulukkoon 1.

Alun perin ISM-käytön piiriin ei kuulunut telekommunikointi, mutta lupavapaudesta johtuen nykyisellään taajuusaluetta hyödyntävät monet langattomat tiedonsiirtotekniikat, joista ehkä tutuimpia ovat Wi-Fi, Bluetooth ja Zigbee. Ne käyttävät tyypillisesti 2,4 GHz:n taajuusaluetta, mutta myös muitakin kaistoja. ISM-taajuuksien vapaasta hyödyntämisestä seuraa vääjäämättä se, että siellä toimivan laitteen tulee sietää hyvin samantaajuisia häiriöitä. ITU sääntelee ISM-käytöstä [6, s. 238] tarkemmin vain sen, että kunkin maan kansallisten säädösten tulee varmistaa, että häiriöt taajuusalueen ulkopuolella minimoidaan. Käytännössä esimerkiksi edellä mainitulla 2,4 GHz:n taajuudella tämä vaatimus on huomioitu säätämällä maksimirajat lähetysteholle ja lähetystaajuuden ulkopuolisille harhalähetille.

### 3.2 Langattoman viestinnän vaikutus hyväksyntään

Langattomasti kommunikoivaa laitetta koskevat turvallisuusvaatimusten lisäksi laajennetut EMC-vaatimukset, joita ovat esimerkiksi korkeampi laitteen oma säteilevien sähkömagneettisten häiriöiden sietokyky (*immuneetti*), mutta vastavasti mahdollisimman pieni häiriöiden tuotto (*emissiot*). Vaatimukset



määräytyvät muun muassa käytetyn lähetystekniikan, taajuusalueen ja lähetystehon perusteella. Medikaalilaitteiden standardien lisäksi radiolaitteita koskevat myös kansainväliset sekä kansalliset radiolaitesäädökset ja viestintäviranomaisien hyväksyntäprosessit, jotka voivat olla vaatimuksiltaan standardeja tiukempia.

Kansainvälisesti radiohyväksyntöjä sääteleviä viestintäviranomaisia on esimerkiksi Yhdysvalloissa FCC, Australiassa ACMA ja Japanissa MIC. Euroopan unionissa langattoman viestinnän lainsäädäntöä on jäsenvaltioissa harmonisoitu direktiivillä EEC (European Electronic Communications Code). ETSI (European Telecommunications Standards Institute) julkaisee yhdenmukaistettuja direktiivin täyttäviä standardeja radiohyväksynnöistä, joita ovat sitoutuneet noudattamaan EU ja ETA-alueiden maat sekä Sveitsi. ETSI ei kuitenkaan valvo radiospektrin käyttöä, se on kunkin jäsenvaltion viestintäviranomaisten vastuulla. Säännöillä pyritään suojaamaan alati kasvavan langattoman tiedonsiirtosektorin kasvu ja kaupallinen hyödyntäminen ilman, että muille käyttäjille aiheutuu häiriöitä.

On huomioitava, että medikaalilaitetta koskevat sähkömagneettisen yhteensopivuuden standardit riippumatta siitä, hyödyntääkö laite langatonta radiokommunikointia vai ei. Erilaisten johtuvien ja säteilevien häiriöiden minimointi ja vastavasti laitteen kyky sietää niitä ympäristössään ovat aina ehdoton vaatimus. Tarkemmat numeeriset rajat laitteen emissioiden ja immuniteetin osalta löytyvät EMC-standardista IEC 60601-1-2. Vielä tarkemmin säteilevän RF-taajuuden sähkömagneettisen kentän sietotestausta kuvataan erillisessä EMC-standardissa IEC 61000-4-3 [7].

Jalkaohjaimen aiemmat versiot olivat hyväksytetty myös kansallisten radiolaitesäädösten mukaisesti tarvittaville markkina-alueille, mutta radiopiirin tyyppiä vaihdettaessa hyväksynnät on uusittava.

### 3.3 Radiolaittehyväksynnästä muutamilla kohdemarkkinoilla

Planmecan hoitokoneiden merkittäviä markkina-alueita maailmanlaajuisesti ovat muun muassa ETA-maat, Iso-Britannia ja Australia sekä Lähi-idän valtioista Saudi-Arabia, Qatar ja Kuwait. Radiolaitestandardeja on maittain lukuisia ja ne jaotellaan yleensä käyttötarkoituksen ja taajuusalueen mukaan. Täten ennalta olisi hyvä tietää, mitä taajuutta tullaan hyödyntämään, sillä kaikkien vaihtoehtojen keskinäinen vertailu ei ole mielekäästä.

Jalkaohjaimen tapauksessa ei käytännössä ole syytä harkita muita kuin kansainvälisesti vapailla ISM-taajuuksilla toimivia vakiintuneita langattomia teknologioita, kuten Zigbeeta tai Bluetoothia. Niitä kutsutaan usein radiosäädöksissä lyhyen kantaman laitteiksi (short-range device tai SRD) ja laajakaistasiirtojärjestelmiksi (wideband transmission system). SRD:t ovat yleensä lisenssivapaita, koska niiden katsotaan häiritsevän muita laitteita hyvin epätodennäköisesti pienen lähetystehonsa takia. Siten niille on usein myös suoraviivaisempi hyväksyntäprosessi kaikkialla maailmassa. Laajalti käytettyinä niiden protokollat ovatkin pitkälti yhtenäistetty kansainvälisten radiosäädösten kanssa, helppokäyttöisyyden ja nopean suunnittelutyön edistämiseksi.

Muiden lisenssivapaiden teknologioiden, kuten LoRa-radiopiirien (Long Range) hyödyntäminen olisi hankalampaa, sillä kaikki niiden käyttämistä taajuuskais-toista eivät ole säännöstelyistä vapautettuja koko maailmassa. Sensoriverkkojen kommunikointiin tarkoitetun LoRa-tekniikan kantavuus on jopa kymmeniä kilometrejä, mutta tiedonsiirtonopeus on alhainen. Kumpikin näistä ominaisuuksista olisi haittatekijä jalkaohjaimessa. Pitkä kantama tarkoittaisi, että klinikakaympäristössä saman kuuluvuusalueen sisällä olisi lukuisia ohjaimia, ja toisaalta alhainen tiedonsiirtonopeus aiheuttaisi käyttöä hankaloittavaa viivettä, eli latenssia. Lisäksi LoRa:n käyttöön liittyy aikaikkunarajoitus – yksittäinen laite ei saa käyttää enempää kuin 1 % aktiivista lähetysaikaa [8, s. 22]. Tämä ei ole riittävä jalkaohjaimen sujuvan toiminnan takaamiseksi.

Euroopan unionissa radiolaitteen markkinoille saattamista sääntelee EU-direktiivi 2014/53/EU eli RED (Radio Equipment Directive). Siitä on johdettu lukuisia harmonisoituja standardeja, joista yhtä tai useampaa sovelletaan kaikkiin EU:ssa myytäviin radiolaitteisiin. Soveltuva standardi valitaan halutun taajuusalueen ja käyttötarkoituksen mukaan. 2,4 GHz:n taajuutta hyödyntävän radiolaitteen hyväksynnän määrittelee ETSI:n standardi EN 300 328 [9]. Standardissa annetaan numeeriset rajat muun muassa Bluetoothin kaltaisten teknologioiden maksimilähetytysteholle (20 dBmW eli 100 mW) ja modulointimenetelmästä riippuen esimerkiksi pulssisuhteelle sekä taajuushyppelyn hetkittäin varaamien kanavien kaistanleveydelle. Lisäksi standardi linjaa hyödynnettävän taajuusalueen ylä- ja alarajoista ja harhalähetteen maksimimäärästä.

Australiassa radiohyväksynnöistä vastaa ACMA (Australian Communications and Media Authority) ja radiolaitteita säädellään yleisesti *Radiocommunications Act 1992* -lailla. Se jakautuu koskemaan luokkalisenssejä (Class License) eri radiotaajuusalueille, joita tarkastelemalla löytyvät laitteen vaatimukset kunkin lisenssin puitteissa. ISM-taajuusalueella toimivaa lähetintä koskevat Australiassa luokkalisenssi *Radiocommunications (Low Interference Potential Devices) Class Licence 2015* [10]. Jos tarkastelemme edelleen Bluetoothia, se lukeutuu Australian luokkalisenssissä 2400–2483.5 MHz:n alueella toimiviin taajuushyppelylevien laitteiden luokkaan. Vaatimuksena on joko yhdenmukaisuus ETSI EN 300 328 standardin kanssa tai minimissään 15 hyppelytaajuutta. Australiassa tällaiselle laitteelle annetaan 500 mW tehoraja (eli 27 dBmW), joka on enemmän kuin edellä mainittu ETSI:n standardi sallii. [10, s. 17.]

Saudi-Arabiassa radiohyväksyntöjä säätelee CITC (Communications & Information Technology Commission). Bluetoothin tyyppistä ISM-taajuista lähetintä koskee spesifikaatio RI117: Specification for Data Communication Equipment operating in License-Exempt Frequency Bands [11, s. 5]. Käytännössä spesifikaatiossa säädetään laitteen yhteensopivuudesta eurooppalaisten standardien EN 300 328 ja EN 301 489-17 (EMC-standardi) kanssa. Myös Qatarissa sekä Kuwaitissa [12, s. 2; 13, s. 109] kansallinen vaatimus on yhdenmukaisuus EN 300 328 -standardin kanssa.

Iso-Britanniassa ja Pohjois-Irlannissa kansallinen Radio Equipment Regulations 2017 linjaa lainsäädännön yhteensopivuudesta Euroopan unionin 2014/53/EU-direktiivin kanssa. Radiolaitteiden vaatimukset määritellään kansallisessa laissa, mutta säädökset ovat käytännössä samat kuin EU:ssa. Menettely säilyi Britannian EU-erosta huolimatta. [14.] Britanniassa radiolisensointia valvoo Ofcom (Office of Communications), mutta sielläkin Bluetoothin kaltaiset tekniikat ovat lisenssivapaita.

Bluetoothin kaltaisen ISM-taajuisten tekniikan radiohyväksynät Australiassa, Saudi-Arabiassa, Qatarissa, Kuwaitissa ja Iso-Britanniassa nojaavat siis eurooppalaisiin standardeihin. Laitteen tulee radiosäädösten osalta näillä markkinoilla täyttää vain EU:n vaatimukset, mutta sähköturvallisuudesta ja muista laitehyväksynnöistä voi olla kansallisia määräyksiä. Yhtenäinen ETSI:n standardeihin pohjautuva lainsäädäntö sallii valmistajalle suoraviivaisemman hyväksyntäprosessin, kun vaaditut mittaukset ja soveltuvuuden osoittaminen kertaalleen hyväksytään useissa maissa. Kansainvälisesti myytävälle tuotteelle tämä puoltaa erittäin vahvasti ISM-taajuisten standardoidun tekniikan hyödyntämistä, mikäli erityisen painavaa syytä valita toisin ei ole.

Yhdysvalloissa radiolaittehyväksyntöjä valvoo ja säätelee telehallintovirasto FCC (Federal Communications Commission). Yhdysvallat eivät ole suuri markkina-alue Planmecan hoitokoneille, mutta FCC:n radiolaittevaatimuksia on silti hyvä tarkastella tässä yhteydessä, sillä Yhdysvaltojen säädökset ovat usein osa mikropiirivalmistajien tarjoamia esihyväksyntöjä.

Langatonta viestintää käsitellään Yhdysvaltojen laissa Code of Federal Regulations Title 47, jonka osiossa 15 C [15] säädetään Bluetoothin ja Zigbeeen kaltaisten lähetystekniikoiden sertifiointista. Siinä asetetaan vaatimuksia radiolaitteen rakenteesta, kuten antennista, lähetystaajuudesta ja -tehosta. Radiolaitteessa ei esimerkiksi saa olla käyttäjän vaihdettavaa antennia, eikä käyttäjän tule kyetä muutenkaan muuttamaan laitteen rakennetta toisenlaiseksi. Säädös määrää myös listan kiellettyjä taajuuksia, joille saa tulla vain vähäisiä harhalähetteitä (spurious emission) pienillä lähetystehoilla.

Laissa määrätään myös 2400–2483,5 MHz:n ja 5725–5850 MHz:n taajuusalueiden käytöstä taajuushyppiville laitteille. Hypittäviä kanavia tulee esimerkiksi olla minimissään 15 ja kanavien välillä tulee olla vähintään 25 kHz:n taajuusero. Maksimilähetysteho 2,4 GHz:n taajuuskaistalla on 1 watti, mikäli käytössä on vähintään 75 hypittävää kanavaa tai muuten 0,125 wattia. Esimerkiksi Bluetooth on näiltä osin yhdenmukainen FCC:n säädösten kanssa.

Yhdysvaltojen FCC tuntee lisäksi erillisen käsitteen moduulihyväksynnästä (modular approval) lopputuotteeseen sijoitettavalle radiopiirille. Siinä moduulia hyödyntävä tuote perii moduulin RF-hyväksynät suoraan, mikäli tietyt tekniset reunaehdot täyttyvät. Moduulihyväksynnän vaatimuksena on joukko moduulin rakenteellisia ominaisuuksia, kuten kiinteä asennus omalle piirilevyille, kiinteä tai muuten spesifioitu antennityyppi, radiopiirin suojakotelointi sekä oma virransyötön vakavointi. [16, s. 2–4.] Näillä pyritään estämään piirin väärinkäyttöä suuremmilla tehoilla tai eri tavalla säteilevällä antennilla, mikä ymmärrettävästi muuttaisi sen radioteknisiä ominaisuuksia. Moduulihyväksyntää ei voi saada, mikäli RF-osioon suunnitellaan oma antenni.

Euroopassa suoraa moduulihyväksyntää ei tunneta, mutta moduulien käyttö voi suoraviivaistaa hyväksyntäprosessia silti, sillä ne ovat kokonaisuudessaan varmemmin yhdenmukaisia radiolaitevaatimusten kanssa.

## **4 Lähtötilanne uuden jalkaohjaimen suunnitteluun**

### **4.1 Huomioita lähetystekniikan valinnasta jalkaohjainkäyttöön**

Planmecalla oli jo aiemmin laadittu esiselvitys jalkaohjaimen seuraavasta versiosta ja halutuista ominaisuuksista [17]. Siinä käsiteltiin myös langattoman kommunikoinnin kehittämistä ja vahvoiksi kandidaateiksi nousivat Bluetooth Low Energy (Bluetooth LE) sekä nykyinen Zigbee. Esiselvityksessä huomioitiin, että markkinoilla on runsaasti mikroprosessorin ja radiopiirin yhdistäviä järjestelmäpiirejä (System on Chip tai SoC), joista ainakin muutamien valmistajien RF-järjestelmäpiirit tukevat sekä Bluetoothia että Zigbeetä. Tällöin valinta niiden välillä

olisi teoriassa tarpeeton ja protokolla voitaisiin päättää pelkällä ohjelmistomuutoksella. Tämän työn haastattelututkimuksessa ei kuitenkaan ilmaistu tarvetta kahta tai useampaa protokollaa hyödyntävälle toteutukselle.

Etäohjaukseen tai -sensorointiin markkinoitavien lähetysohjelmojen ominaisuutena on usein mahdollisuus rakentaa erilaisia usean laitteen mesh-verkkoja, kuten Zigbeellä tehdään. Jalkaohjaukseen riittää kuitenkin lähetysohjelmo, joka on point-to-point eli yhden laitteen ja vastaanottimen välinen – tarvetta useammalle ohjaimelle ei ole.

Esiselvityksessä Bluetoothin merkittäväksi eduksi katsottiin taajuushyppelystä syntyvä hyvä häiriönsietokyky samantaajuisia häiriöitä vastaan (vaikkapa vahva Wi-Fi-signaali). Edellisen Zigbee-pohjaisen ohjaimen kanssa oli havaittu joissain tilanteissa useamman laitteen aiheuttamaa ruuhkaa ja siitä seuranneita lähettimen ja vastaanottimen paritusongelmia. Yksi syy oli staattinen Zigbee-kanava (yksi 16:sta), joka ei vaihtunut ristiriitatilanteessa automaattisesti, vaan tuli vaihtaa manuaalisesti hoitokoneen käyttöliittymän kautta. Useampi ohjain saattoi siis käyttäjän ymmärtämättä olla samalla kanavalla. Ongelma korostui pääasiassa yliopistoissa ja muissa opetustiloissa, joissa samassa huoneessa oli lähietäisyydellä useita jalkaohjaimia, ei niinkään klinikakäytössä eri hoitotilojen välillä.

Bluetooth LE:n verrattain lyhyt kantama, realistisesti kohtuullisilla lähetystehoilla noin 10 metriä, katsottiin oikeastaan eduksi, sillä hoitokoneen ja jalkaohjaimen välillä ei missään vaiheessa hoitotilannetta voisi syntyä kymmenien metrien etäisyyttä. Lyhyt kantama pienentää mahdollisuutta, että lähellä olevat laitteet häiriintyvät tai häiritsevät jalkaohjainta.

Edellisellä jalkaohjaimen suunnittelukierroksella Bluetooth hylättiin sen suuren lepotilan virrankulutuksen takia (väitetysti 200  $\mu$ A verrattuna Zigbeeen 3  $\mu$ A) sekä lepotilasta heräämisen aikaviiveen vuoksi (väitetysti useampi sekunti verrattuna 30 ms). Molemmat näistä havaituista ongelmista ovat Bluetooth LE:n myötä korjautuneet, ja protokolla vertautuu käytössä olevaan Zigbeehen näiltä osin

paremmin. Valmiita radiomoduuleita ei ilmeisesti alun perin hyödynnetty niiden korkean hintatason takia, moduulin maksaessa jopa 40 euroa kappaleelta. [1, s. 16–17.] Nykyisellään moduulien halventuneesta hintatasosta (halvimmillaan noin 5 euroa) johtuen olisi hankalaa saada merkittäviä kustannusetuja omalla, diskreetteihin komponentteihin perustuvalla toteutuksella.

Esiselvityksessä sivuttiin myös langattoman kommunikoinnin aiheuttamia vaatimuksia medikaalilaitteelle. Radiomoduulin *integroidulla* antennilla katsottiin todennäköisesti helpottavan radiolaittehyväksyntöjä merkittävästi. Uuteen jalkaohjaimen päätettiin edellä listatuista syistä etsiä ensisijaisesti Bluetooth Low Energy -pohjainen radiatoratkaisu, painottaen eritoten antennillisia moduuleita, mikäli sen poissulkevia suunnitteluvaatimuksia ei työn edetessä esiintyisi.

## 4.2 Bluetooth Low Energy

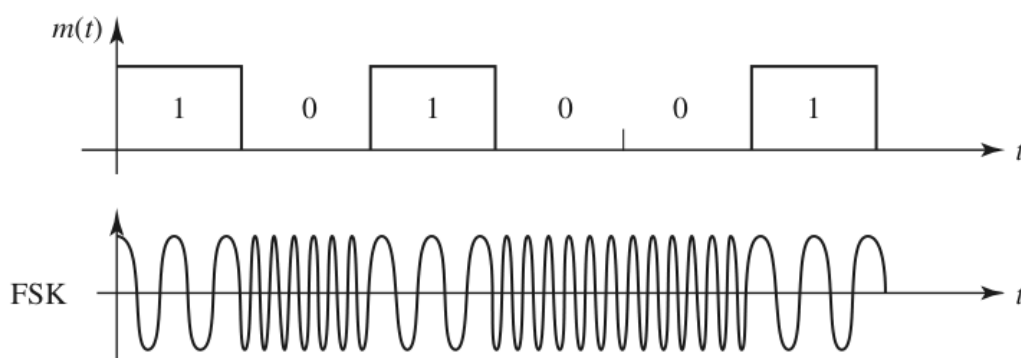
Bluetooth Low Energy on Bluetooth-tiedonsiirtotekniikan uudempien sukupolvien pieneen virrankulutukseen optimoitu versio. Se on ollut käytössä vuodesta 2010, Bluetooth versiosta 4.0 alkaen. Uuden version myötä kaikki aiemmat sukupolvet saivat yleisnimen Bluetooth Classic. Uusin julkaistu versio on 5.3 vuodelta 2021. Bluetooth Low Energy -versiot eroavat protokollatasolla Classicista, eivätkä ne siten ole suoraan yhteensopivia keskenään. Joillain valmistajilla on kuitenkin piirejä, jotka tukevat molempia versioita standardista.

Bluetoothin tekniset ominaisuudet ovat kattavasti selitetty sen lisensointia ja kehitystä hallinnoivan Bluetooth Special Interest Groupin (SIG) julkaisemassa spesifikaatiossa [18]. Bluetoothin fyysinen kerros (physical layer tai PHY) määrittelee sen radiotekniset parametrit, kuten käytettävät taajuudet ja modulaatiomenetelmän. Bluetooth LE hyödyntää vapaata ISM-taajuusaluetta 2400–2483,5 MHz, joka on jaettu 40 kanavaan, jonka kaistanleveys on 2 MHz. Kanavanumerointi ja kanavien keskitaajuudet ovat esitetty kuvassa 3. Kanavien tarkemman käytön määrittelee siirtoyhteyskerros (Data Link Layer). Bluetooth Classicissa saman taajuusalueen sisällä kanavia on 79 ja niiden kaistanleveys on 1 MHz. [19, s. 15–16.]

Channel Number	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Centre Frequency	2402	2404	2406	2408	2410	2412	2414	2416	2418	2420	2422	2424	2426	2428	2430	2432	2434	2436	2438	2440	2442	2444	2446	2448	2450	2452	2454	2456	2458	2460	2462	2464	2466	2468	2470	2472	2474	2476	2478	2480

Kuva 3. Bluetooth LE:n taajuusalueen 40 kanavaa ja niiden keskitaajuudet [19, s. 15].

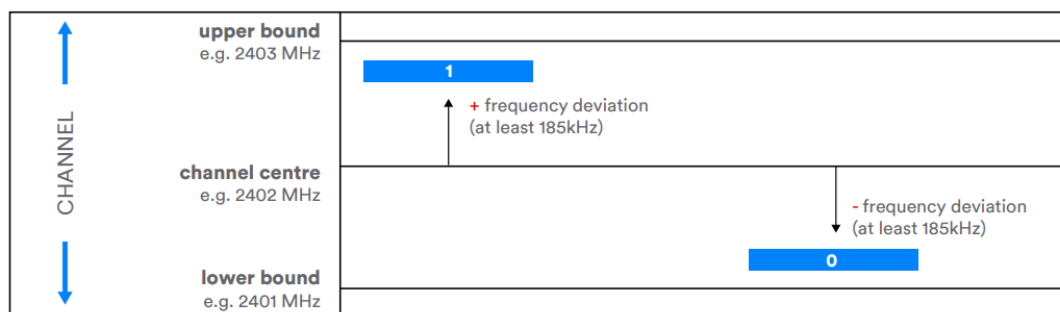
Bluetooth LE käyttää GFSK-modulaatiota (Gaussian Frequency-Shift Keying) [18, s. 2640]. Se on Gauss-suodatettua FSK-modulaatiota, joka mahdollistaa taoudellisemman spektrin käytön ja pienemmän tehontarpeen. FSK eli vaihtotaajuusmodulaatio tai taajuusavainnus on modulaatiomenetelmä, jolla voidaan välittää digitaalista tietoa radioaalloilla muuttamalla kantoaallon taajuutta amplitudin pysyessä samana. Sen analoginen vastine on FM-modulaatio. Vaihtotaajuusmodulaatiossa kantoaallon taajuutta vaihdellaan kahden tai useamman tunnetun taajuuden (tilan) välillä, nämä vastaavat lähetettävän bitin arvoja 0 tai 1. FSK-modulaation toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 4. Jos lähetettävä symboli sisältää useamman kuin yhden bitin informaatiota, hyödynnetään monitilaista modulaatiota. [19, s. 15; 20, s. 681–682.]



Kuva 4. FSK-modulaatio, jossa ylempänä esitetty binäärinen 0 tai 1 välitetään muuttamalla kantoaallon taajuutta kahden tunnetun tilan välillä [20, s. 682].



Bluetoothissa taajuusmodulaatio on binääristä: kantoaaltoa poikkeutetaan kunkin kanavan keskitaajuudesta vähintään  $\pm 185$  kHz (tai enemmän riippuen käytössä olevasta symboli- tai siirtonopeudesta) ala- tai ylärajataajuuteen, jotka vastaavat bittejä 0 ja 1 [18, s. 2641]. Tämä on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Bluetooth LE:n kanavakohtainen taajuusavainnus, jossa lähetettävän bitin arvoja 0 ja 1 kuvastaa ala- ja ylärajataajuus [19, s. 16].

Bluetooth Low Energy tukee kolmea sen fyysisessä kerroksessa määriteltyä siirtotilaa: LE PHY 1M, LE PHY 2M ja LE Coded PHY. PHY-kerroksessa puhutaan symbolinopeudesta, mutta koska Bluetoothin modulointi on binääristä, yksi symboli vastaa yhtä bittiä. Kaikkien BLE-laitteiden tulee tukea vähintään PHY 1M:ää, jossa on 1 Mbit/s siirtonopeus. Sillä voidaan protokollan viestikehyksen muut osat pois lukien siirtää informaatiota noin 800 kilobittiä sekunnissa. PHY 2M:n siirtonopeus puolestaan on 2 Mbit/s, josta informaatiota voi olla 1400 kilobittiä sekunnissa. Coded PHY:n siirtonopeus on myös 1 Mbit/s, mutta siinä viestikehykset sisältävät lisäksi virhekorjauskoodia, joka mahdollistaa suuremman maksimikantaman pienemmän siirtonopeuden kustannuksella. [18, s. 2636; 19, s. 15–17.]

Bluetoothissa on jo binäärisen modulaation myötä hyvä virheensietokyky, sillä bittien tilat erottuvat toisistaan laajan taajuuseronsa vuoksi hyvin. Vapaalla 2,4 GHz:n ISM-kaistalla toimivana tiedonsiirtotekniikkana Bluetoothin tulee kuitenkin sietää hyvin samantaajuisia signaaleja tai häiriöitä, joiden lähteitä voi olla runsaasti. Bluetooth-protokollassa häiriönsieto perustuu adaptiiviseen taajuushyppimiseen (Adaptive Frequency Hopping). Se pohjautuu hyppivätaajuiseen

hajaspektritekniikkaan (Frequency Hopping Spread Spectrum). Siinä lähetävä ja vastaanottava Bluetooth-laite vaihtavat jatkuvasti kanavaa, jolloin muiden laitteiden liikenne osuu harvoin samalle kanavalle. Lisäksi laitteet aktiivisesti välttävät kaikista ruuhkaisimpia kanavia kokonaan. Kanavavalintaa ohjaa Bluetooth-protokollan sisäinen algoritmi. [18, s. 285–286.]

Point-to-point-yhteydessä Bluetooth-laitteet kuittaavat viestit vastaanotetuksi. Mikäli kuittausta (acknowledgement tai ACK) ei tule, viestikehys lähetetään uudelleen. [18, s. 503.] Tämä tekee Bluetoothista hyvin varman tiedonsiirtotekniikan, ruuhkaisesta 2,4 GHz:n taajuusalueesta huolimatta.

Kuten aiemmin esitettiin, elektroniikan näkökulmasta Bluetooth LE:ssä on pitkälle optimoitu virrankulutus. Protokollan uusimmat versiot soveltuvat etenkin etäluettavien sensoreihin ja muihin patterikäyttöisiin laitteisiin. Harvoin viestivät laitteet hyödyntävät yleensä yhteydettömiä mainospaketteja (advertising packet), joita muut Bluetooth laitteet voivat vastaanottaa, mutta joita varten ei muodosteta erillistä yhteyttä eikä niitä siten kuitata vastaanotetuksi [19, s. 32]. Mainospaketteja kuitenkin lähetetään myös point-to-point-yhteyden muodostuksessa, sillä laitteiden tulee aluksi löytää toisensa ja vaihtaa muun muassa tunnisteita.

Kahden laitteen välisessä point-to-point-yhteydessäkin voidaan hyödyntää lepo-tiloja aina, kun laitteet eivät aktiivisesti viesti. Tällöin toinen laite spesifioidaan isäntälaitteeksi (central device) ja toinen renkilaitteeksi (peripheral device). Renki voi periaatteessa nukkua aina silloin, kun se ei lähetä mitään isännälle, joskin yhteyden ylläpitämiseksi sen on kuitattava tietyin väliajoin isännän kyselyt. Kuittauksille voidaan kuitenkin asettaa pitkäkin viive (peripheral latency), jonka aikana renki saa ohittaa kuittauksen ja nukkua. [19, s. 25–27.]

Bluetooth LE:n lähetysteholle on spesifikaatiossa [18, s. 2639] säädetty minimi- ja maksimiarvot, jotka ovat 0,01 mW (-20 dBmW) ja 100 mW (+20 dBmW). Ne ovat pitkälti yhteneväisiä ISM-taajuuksien kansainvälisten radiosäädösten

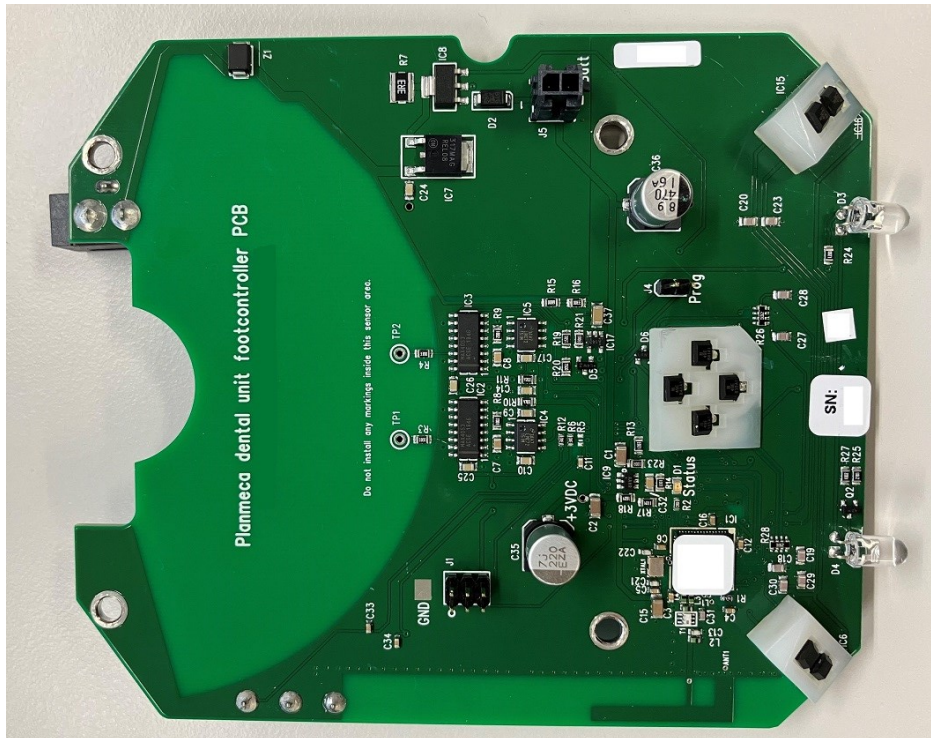
kanssa, mutta maakohtaisia eroavaisuuksia voi olla; ristiriitapauksissa kansallinen lainsäädäntö määrää käytön.

### 4.3 Aiempi jalkaohjaimen elektroniikka

Edellinen jalkaohjain oli kirjoitushetkellä jo yli 15 vuotta vanha, joten sen elektroniikan uudelleensuunnittelun motivaationa oli komponentin vanhentumisen vuoksi lisäksi mahdollisuus päivittää kommunikointitekniikkaa huomattavasti uudempaan ja korjata ohjaimessa esiintyneitä ongelmia.

Aiemmassa ohjaimessa oli käytössä Freescale Semiconductorin (nykyisin NXP Semiconductors) 8-bittinen MC13213-radiojärjestelmäpiiri. Järjestelmäpiiri sisältää HCS08-prosessorin (kellotaajuus 40 MHz), 60 kilotavua flash-muistia ja 4 kilotavua RAM-muistia sekä 802.15.4-standardin (muun muassa Zigbee) mukaisen lähetinvastaanottimen [21]. Modernit RF-järjestelmäpiirit ovat käytännössä kaikki 32-bittisiä ja sisältävät parhaimmillaan useita kymmeniä kertoja enemmän muistia käytöstä poistuvaan piiriin nähden.

Ohjaimen anturointi oli kuluvien osien minimoimiseksi tietoisesti toteutettu siten, etteivät liikkuvat osat ole mekaanisesti kosketuksissa toisiinsa. Anturointitekniikkaan ei ollut tiedossa muutoksia, sillä ohjaimen mekaaninen rakenne pysyisi samana eikä tuotantoprosessia siltä osin haluttu lähteä muuttamaan. Täten myös piirikortin muoto, mekaaniset kiinnitykset ja sensoripiirien sijainti säilyisivät samoina (kuva 6).



Kuva 6. Tuotannossa olevan jalkaohjaimen piirikortti. Nappien painalluksia tunnistavat hall-anturit ovat kiinnitetty muovisilla tukipaloilla haluttuun orientaatioon.

Ohjain käytti virtalähteenä kolmea nikkelimetallihydridiakkua (NiMH), joista säädettiin piirien käyttöjännite 3 V. Yksinkertainen ajastetulla vakiovirtalähteellä toteutettu latauspiiri oli sisälletty piirikortille. Tähänkään ei ollut tiedossa muutoksia, sillä 3 V käyttöjännite soveltuisi hyvin uudellekin prosessorille.

Ohjaimen anturointi perustuu analogisiin hall-antureihin, joilla tunnistetaan painikkeisiin upotettujen magneettien liike ja siten painallus. Virran säästämiseksi hall-antureiden käyttöjännitettä ohjataan tarpeen mukaan päälle ja pois prosessorin avulla. Tehonsäätövivun asento tunnistetaan piirilevyllä olevien mittaussektorien ja ohjaukskampeen kiinnitetyn levyn väliin muodostuvien tasokondensaattorien avulla. Sen kapasitanssi muuttuu kaksiulotteisen liikkeen funktiona. Levykondensaattorin kapasitanssille on yleisesti voimassa kaava 1 ja tässä käytettävä sensori hyödyntää yhtälön molempia geometrisia muuttujia. Kammen kiertyessä, kondensaattorien levyjen päällekkäisyys muuttuu kiertokulman myötä (pinta-ala) ja toisaalta kampea painettaessa levyjen välinen etäisyys muuttuu.

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

jossa  $C$  on kapasitanssi,  $\varepsilon_r$  suhteellinen permittiivisyys ja  $\varepsilon_0$  tyhjiön permittiivisyys,  $A$  pinta-ala ja  $d$  etäisyys levyjen välillä.

Varauspumppuun perustuvassa mittauspiirissä prosessori ohjaa 800 kilohertsin kanttiaallolla analogikytkimiä, jotka siirtävät kapasitiivisten sektorien varausta näytteistyskondensaattoreille. Niiden jännitteen avulla pystytään sitten päättelemään, onko vipu keskellä vai poikkeutettu enemmän oikean tai vasemman sektorin alueelle ja lisäksi tunnistetaan, onko vipua painettua alaspäin poikkeutuksen lisäksi.

Ohjain lähettää aktiivisessa ohjaustilassa komentoja hoitokoneelle 20 millisekunnin välein. Hoitokoneen lopullinen ohjaus tapahtuu vastaanottopäässä CAN-väylää pitkin. Lähetettävä komento muodostui siksi räätälöidystä 19 tavun Zigbee-viestikehyksestä, jonka sisällä oli 8 tavua CAN-muotoista ohjausdataa. Ohjausdata tuli säilyttää takaperin yhteensopivuuden vuoksi jatkossakin CAN-muotoisena, eli uusi lähetystekniikka välittäisi edelleen 8 tavun hyötykuormaa.

Planmecalla oli edellisestä ohjaimesta todettu vuosien varrella joitakin toiminnallisia ongelmia, jotka haluttiin uudelleensuunnittelussa korjata. Yksi ongelmista oli (kappaleessa 4.1 sivuttu) parituksen ja käytön aikaiset ristiriidat useamman jalkaohjaimen välillä, mitkä näyttäytyivät käyttäjille ohjaimen selittämättömänä toimimattomuutena. Tähän toivottiin toimintavarmaa ratkaisua, joka ilman käyttäjän väliintuloa automaattisesti ratkaisisi usean ohjaimen konfliktit. Käytössä ollut Zigbee-pohjainen ratkaisu kulutti myös suurehkon määrän tehoa vastaanotto- ja lähetystiloissa, joskin tehonkulutus oli suunnitteluhetkellä sen aikaisella lähetystekniikalla pyritty kiitettävästi minimoimaan.

#### Jalkaohjaimen tehonkulutus

Uuden piirivalinnan tueksi haluttiin tietää, kuinka paljon edellinen jalkaohjain kuluttaa tehoa kussakin toimintatilassaan ja siten kyetä arvioimaan, saataisiinko uudemmalla piirillä pidennettyä toiminta-aikaa latauskertojen välillä. Käytössä

olleen MC13213-järjestelmäpiirin tehonkulutus riippui osaltaan ohjelmoinnista, etenkin syvimässä lepotilassa, jossa piirin lähdöt lukitaan ohjelmallisesti haluttuun tilaan. Datalehden mukaan minimitehokulutukseen päästään vain ohjelmaa optimoimalla, muun muassa asettamalla kaikki lähdöt nolnaan ja sammuttamalla kellopiirit ja muut lohkot [21, s. 26].

Entuudestaan viimeisimmän ohjelmaversioiden jalkaohjaimesta ei ollut tehty tehomittauksia, eikä vanhentuneista kehitysympäristöistä johtuen ollut mahdollista tarkistaa prosessorin asetuksia lepotilassa. Jalkaohjaimen ja mikrokontrollerin virrankulutus päädyttiin mittaamaan oskilloskoopilla shunttivastuksilla toteutetun mitta-adapterin avulla (kuva 7). Virtamittaukset tehtiin koko ohjaimelle sekä erikseen pelkälle mikrokontrollerille. Jälkimmäisessä käyttöjännitteen johde katkaistiin piirilevyiltä ja shunttivastus asetettiin väliin. Virransyöttö koko jalkaohjaimelle sisälsi muun muassa akkujen jännitettä vakavoivan lineaariregulaattorin ja ohjaustiloissa anturi- ja käyttöpiirien käyttöjännitteen, joten sen kulutuksen tiedettiin olevan korkeampi, kuin pelkän mikrokontrollerin ja radiolähtimen.



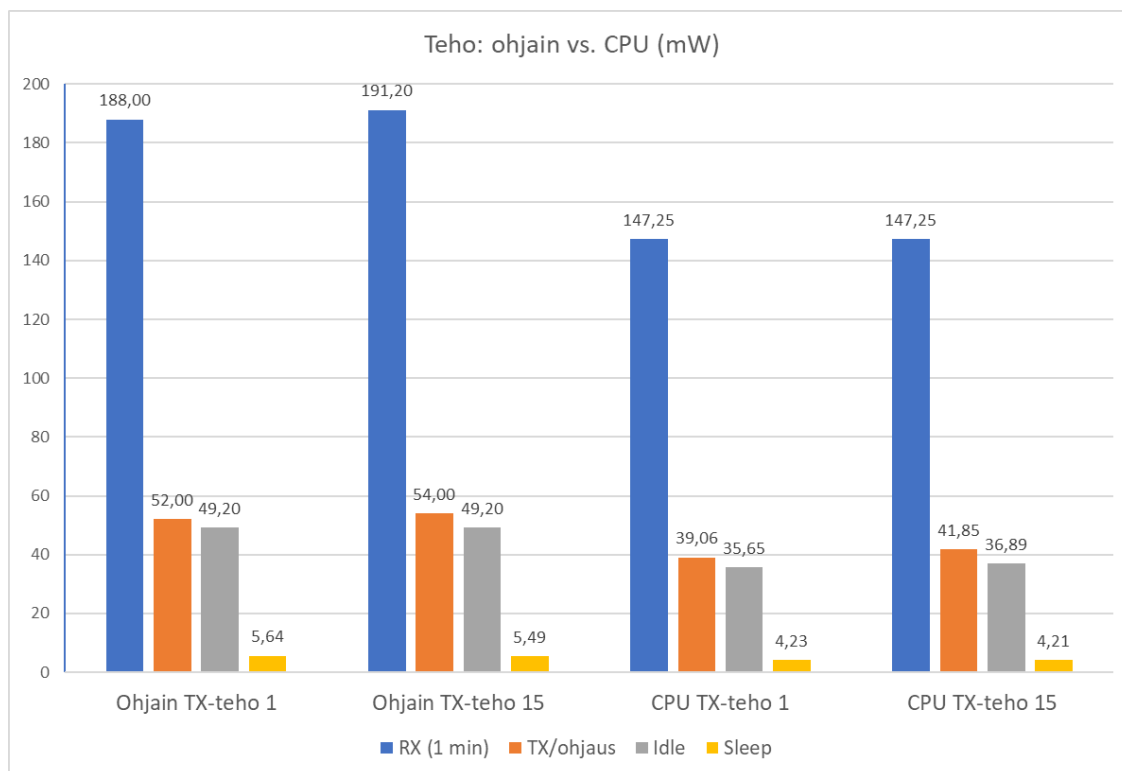
Kuva 7. Hyvin pienten virtojen mittauksen mahdollistava, kolmella valittavalla shunttivastuksella varustettu  $\mu$ Current Gold -adapteri.

Jalkaohjaimen käyttöjännite oli virtamittauksissa 4 V ja mikrokontrollerin 3,1 V, joten saatuja virrankulutuksen tuloksia oli olennaista vertailla milliwatteina jännite-ero huomioiden.

Mitattavia tiloja oli jalcaohjaimen perustoimintojen myötä neljä: vastaanotto (RX), lähetys (TX), idle-tila sekä sleep-tila. Kytettäessä päälle (tai lepotilasta herätettäessä) ohjain oli ohjelmoitu vastaanottotilaan yhden minuutin ajan, jolloin se kuuntelee käskyjä hoitokoneen lähettimeltä. Näitä ovat esimerkiksi yhteydenmuodostuksen viestit sekä käyttäjän valittavat asetukset hoitokoneen valikosta, kuten lähetysteho tai -kanava. Minuutin jälkeen (jos uusia asetuksia ei tule) ohjain odottaa idle-tilassa ohjauskomentoja. Minkä tahansa ohjaimen painikkeen käyttö laittaa sen lähetystilaan ja vastaava ohjaussignaali lähetetään hoitokoneen vastaanottimelle. Heti painikkeen käytön loputtua ohjain palaa idle-tilaan. Kymmenen minuutin käyttämättömyyden jälkeen ohjain vaipuu sleep-tilaan, josta se herää vain päällä olevasta turvakammesta painettaessa. Sleep on matalimman virrankulutuksen tila.

Yllä olevat käyttötilat käytiin läpi yksitellen käyttäen hoitokonetta simuloivaa kehitysohjelmistoa, jolla seurattiin CAN-liikennettä hoitokoneen lähetin-vastaanottimen kautta ja asetettiin muun muassa jalcaohjaimelle haluttu lähetysteho ja kanava. Ohjaimen ja prosessorin tehot mitattiin radiopiirin minimi- ja maksimilähetystehoilla, eli teholla 1 ja 15.

Kuvasta 8 näkyy, että koko ohjain sekä prosessori kuluttavat reilusti eniten tehoa vastaanottotilassa, jossa radiopiiri pysyy pidempään aktiivisena maksimitehotasolla kuunnellessaan komentoja hoitokoneelta. Lähetysten ja idle-tilan tehonkulutuksen ero on pienempi: tämän selittää se, että lähettäessä ohjain on aktiivinen vain hyvin lyhyitä pulsseja kerrallaan. Sleep-tilassa ohjaimen ja prosessorin tehonkulutus on pienimmillään, sillä anturointipiirit ovat pois päältä.



Kuva 8. Jalkaohjaimen ja mikrokontrollerin tehonkulutus eri tiloissa milliwatteina.

Proessori käyttää mittausten perusteella koko ohjaimen tehosta noin 77–78 % vastaanottotilassa, 75–78 % lähetystilassa, 74 % idle-tilassa ja 75–76 % sleep-tilassa. Tehonkulutuksen prosentuaalinen jakautuminen ohjaimen ja prosessorin välille on siis miltei samaa suuruusluokkaa tilasta riippumatta. Proessori käyttää joka tilassa suurimman osan tehosta, mikä osoittaa, että parannusta akunkestoon olisi saatavilla juuri radiopiiri vaihtamalla.

#### 4.4 Antennisuunnittelu ja integroidut moduulit antennilla

Langattoman kommunikaation mahdollistamiseksi radiopiiri vaatii antennin, joka on radion suorituskyvyn kannalta kriittinen osa elektroniikan toteutusta. Jalkaohjaimen suojausluokituksen ja medikaalilaitteen vaatimusten vuoksi laitteen kuoreen ei kuitenkaan haluttu tehdä ylimääräisiä reikiä tai läpivientejä. Tämän vuoksi ulkoiset antennit olivat lähtökohtaisesti poissuljettu vaihtoehto. Alkuperäisen ohjaimen kaltaisesti antennin tuli pohjautua piirilevylle toteutettavaan ratkaisuun. Niiden vahvistus on ulkoisia antennia huonompi ja häviöt suurempia,

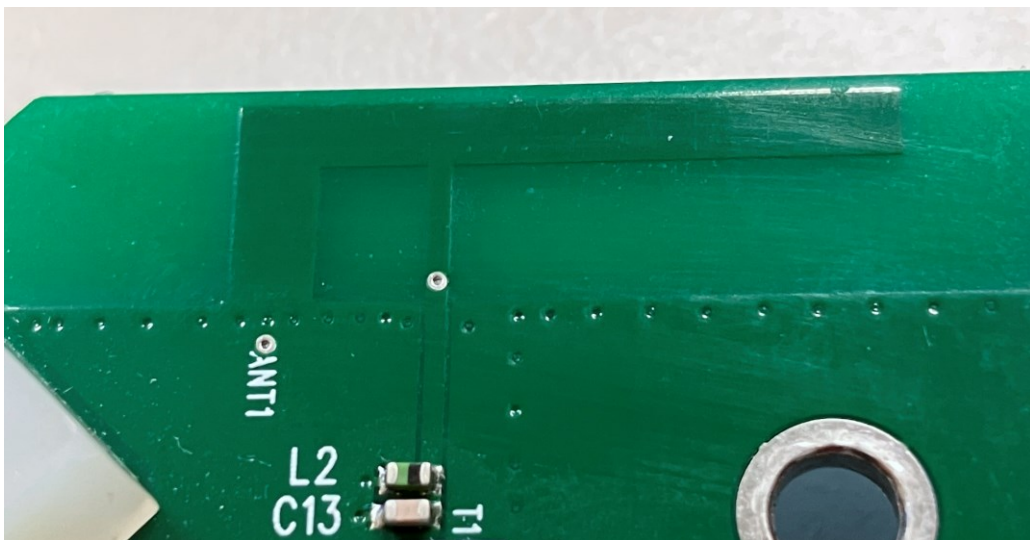


mutta ominaisuudet riittävät jalakaohjainkäyttöön, eivätkä ne ole valmistusteknisesti kovin vaikeita toteuttaa. Piirilevyantennien hyvänä puolena on se, ettei piirilevylle tule mitään helposti vahingoittuvia ulokkeita (liittimiä, roikkuvia johtoantenneja tai metallista taivutettuja rakenteita), eikä niiden vuoksi tarvita erillistä komponenttia tai kokoonpanovaihetta.

Edellisessä jalakaohjaimessa oli päädytty invertoituun F-antenniin, joka on toteutettu piirilevyn reunalle mikroliuskajohdolla (kuva 9). Näin muodostuu tasolle toteutettu invertoitu F-antenni eli *Planar Inverted F-Antenna* (PIFA). PIF-antenni on rakenteeltaan  $\frac{1}{4}$ -aallonpituuden monopoli-antenni, jonka ei tarvitse olla fyysisiltä mitoiltaan kovin suuri, johtuen korkeasta taajuudesta eli lyhyestä aallonpituudesta. Käytössä olevalla 2,4 GHz:n taajuusalueella aallonpituus voidaan laskea kaavalla 2. Antennin pituus tästä on neljännes, eli noin 31,2 mm. Se on helposti toteutettavissa tämän piirilevyn sallimassa tilassa, mutta voisi hyvin pienessä laitteessa olla jo rajoittava tekijä.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2,4 \cdot 10^9 \text{ Hz}} \approx 0,12491 \text{ m} \approx 124,9 \text{ mm} \quad (2)$$

jossa  $\lambda$  on aallonpituus,  $c$  valonnopeus ja  $f$  taajuus.



Kuva 9. Jalakaohjaimen invertoitu F-tyyppinen piirilevyantenni, jonka kokonaispituus on 31,2 mm. Kuvasta erottuu maatasosta putsattu suoja-alue antennin ympäriltä.

Oman antennin suunnittelu radiopiirin tueksi tarkoittaa kuitenkin runsaasti mittauksia jo tuotekehitysvaiheessa antennin sovittamiseksi sekä viranomaishyväksyntöjä varten. Hyvän antennitoteutuksen aikaansaaminen on hankalaa, joka todettiin jo aiemmassa elektroniikassa. PIF-antennin sovitus oli epäoptimaalinen ja siten radiota tuli käyttää lähes maksimilähetystekholla, jotta tiedonsiirto onnistui edes lyhyellä kantamalla. Kokemuksen pohjalta todettiin, että valmiin komponenttiantennin käyttäminen olisi parempi ratkaisu. [1, s. 43.]

Antenniin liittyy myös ominaisabsorptionopeus eli SAR-arvo. Valmistajan tulee mittauksilla tai pienten lähetystekhojen kohdalla vähintään kirjallisesti osoittaa, että asetettuja SAR raja-arvoja ei ylitetä. SAR:n arviointi ennalta on vaikeaa, sillä käytetty lähetin ja laitteen kotelointi muodostavat kokonaisuuden, joka määrittelee sekä ulos säteilevän tehon että minimietäisyyden, millä käyttäjän on mahdollista altistua sähkömagneettiselle energialle. Kuva 10 näyttää Silicon Labsin radiomoduulin datalehdessä löytyvät minimietäisyydet, joilla erilliset SAR-analyysit ovat tarpeen. Yhdysvaltalaisen FCC:n tapauksessa arviointi on tehtävä aina (minimietäisyyden ollessa 0 mm) ja eurooppalaiseen hyväksyntäänkin (CE) silloin, kun lähetystekho ylittää 20 mW.

Certification	BGM220P22A
FCC	Bluetooth LE: 0 mm
ISED	Bluetooth LE: 14 mm
CE	The RF exposure must always be evaluated using the end-product when transmitting with power levels higher than 20 mW (13 dBm).

For FCC and ISED, using the module in end-products where the separation distance from the human body is smaller than that listed above is allowed but requires evaluation of the RF exposure in the final assembly and applying for a *Class 2 Permissive Change* or *Change of ID* to be applied to the existing FCC/ISED approvals of the module. For CE, RF exposure must be evaluated using the end-product in all cases when transmitting at more than the power level indicated in the table.

Kuva 10. Silicon Labsin BGM220P-radiomoduulin datalehdessä annetut minimietäisyydet käyttäjän kehonosalle lähettimestä, joiden alittuessa on tehtävä absorptiotestejä [22, s. 45].

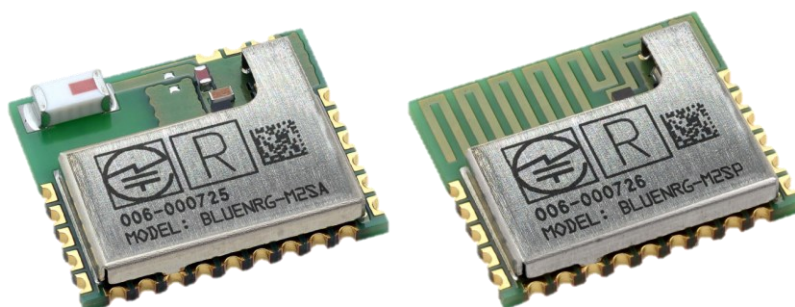
## Järjestelmäpiiri vai radiomoduuli

Antenniin liitännäinen kysymys on se, käytetäänkö valmista radiomoduulia, jossa on jo moduulin omalle piirilevylle toteutettu antenni, vai RF-

järjestelmäpiiriä, jonka tueksi toteutetaan oma antenniratkaisu. Ero on teknisesti häilyvä, mutta viranomaishyväksyntöjen kannalta olennainen. Valmiissa radiomoduulissa RF-järjestelmäpiiri, mahdollinen antennin sovituspiiri sekä antenni itse ovat yleensä esihyväksytetty kokonaisuutena ja soveltuvat käyttöön maailmanlaajuisesti.

Moduulia hyödyntävän loppuvalmistajan vastuulle jää suppeampi kattaus mitauksia, jotka lähinnä osoittavat, että moduulin yhdenmukaisuus hyväksyntöjen kanssa ei ole ratkaisevasti muuttunut sen jälkeen, kun se on asennettu loppu-tuotteeseen. Niillä osoitetaan, ettei valmistajan tekemä laite omasta rakenteestaan tai ohjelmallisista syistä ole muuttanut hyväksytyyn radiomoduulin ominaisuuksia.

Radiomoduuleitakin tarjotaan erilaisilla antenneilla, jotka vaihtelevat liittimellä kytkettävistä ulkoisista antenneista erilaisiin piirilevyantenneihin. Piirilevyantenneja on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. STMicronics:n valmistamia BlueNRG-M2 Bluetooth-moduuleita, joissa yhdistyy radiojärjestelmäpiiri ja antenni. Vasemmalla keraaminen siruantenni ja oikealla piirilevyllä toteutettu mikroliuska-antenni. [23, s. 1]

Valinta järjestelmäpiirin ja moduulin välillä vaikuttaa potentiaalisesti myös lähetyksen markkinointilisensseihin. Esimerkiksi Bluetooth on lisensoitu teknologia, jonka tavaramerkin hyödyntäminen kaupallisessa tuotteessa ei ole vapaata, vaan vaatii maksun ja hyväksynnän Bluetooth SIG:ltä [24]. Valmistajasta riippuen valmista moduulia tai järjestelmäpiiriä käytettäessä Bluetooth-

lisensointi saattaa kuulua komponentin hintaan ja antaa sen myötä oikeuden markkinoita laitetta Bluetooth-laitteena, mutta käytännöt vaihtelevat.

## 5 Komponentin valintaperusteet

### 5.1 Kysely valintakriteeristön laatimiseksi

Jalkaohjaimen korvaavan radiokomponentin valinnan haluttiin pohjautuvan vanhan elektroniikan minimivaatimusten lisäksi kriteeristöön, jotta tarjolla olevien komponenttien ominaisuuksien suhteellinen paremmuus tulisi mittavasti ilmi. Eri tahojen näkemyksiä valinnasta oli tärkeä kartoittaa, sillä suunnittelussa oli huomioitava muun muassa ohjelmistokehityksen tarpeet ja taaksepäin yhteensopi vuus hoitokonekantaan. Valintaa ei haluttu perustaa yksittäisiin subjektiivisiin näkemyksiin, joten kriteeristön selvittämiseksi tehtiin pienimuotoinen kyselytutkimus Planmecan tuotekehitykselle ja -hallinnalle. Lisätavoitteena oli kehittää prosessia, jossa tuotekehityksen ja sidosryhmien tarpeet saadaan muotoiltua objektiivisiksi vaatimuksiksi helpottamaan päätöksentekoa keskeisten komponenttien valinnassa.

Kyselyssä vastaajaa pyydettiin painottamaan ennalta esiin nostettuja valintakriteereitä sen perusteella, miten merkityksellisiksi hän ne jalkaohjaimen elektroniikan osalta koki. Kriteereille tuli jakaa yhteensä 100 pistettä. Kriteerit koostuivat tuotteen koko elinkaaren aikaisista ominaisuuksista sekä komponentin yleisestä soveltuvuudesta käyttötarkoitukseen. Vastaaja saattoi myös ehdottaa puuttuvia kriteereitä ja antaa niille painoarvon. Lisäksi kullekin kriteerille oli avoin vastauskenttä, johon saattoi lisätä huomioita.

Esitetyt kriteerit, joiden keskinäistä painoarvoa tuli arvioida, olivat:

- hinta
- saatavuus
- piirin arvioitu elinkaaren pituus
- vaihtoehtokomponenttien saatavuus
- integroitavuus ekosysteemiin

- mikrokontrollerin ominaisuudet
- suunnittelutyön vaativuuden minimointi
- turvallisuus radiopiirin osalta
- toimintavarmuus ja käyttökokemus
- virrankulutuksen minimointi
- vakiintunut lähetystekniikka
- markkinoille saattamisen kustannus ja nopeus.

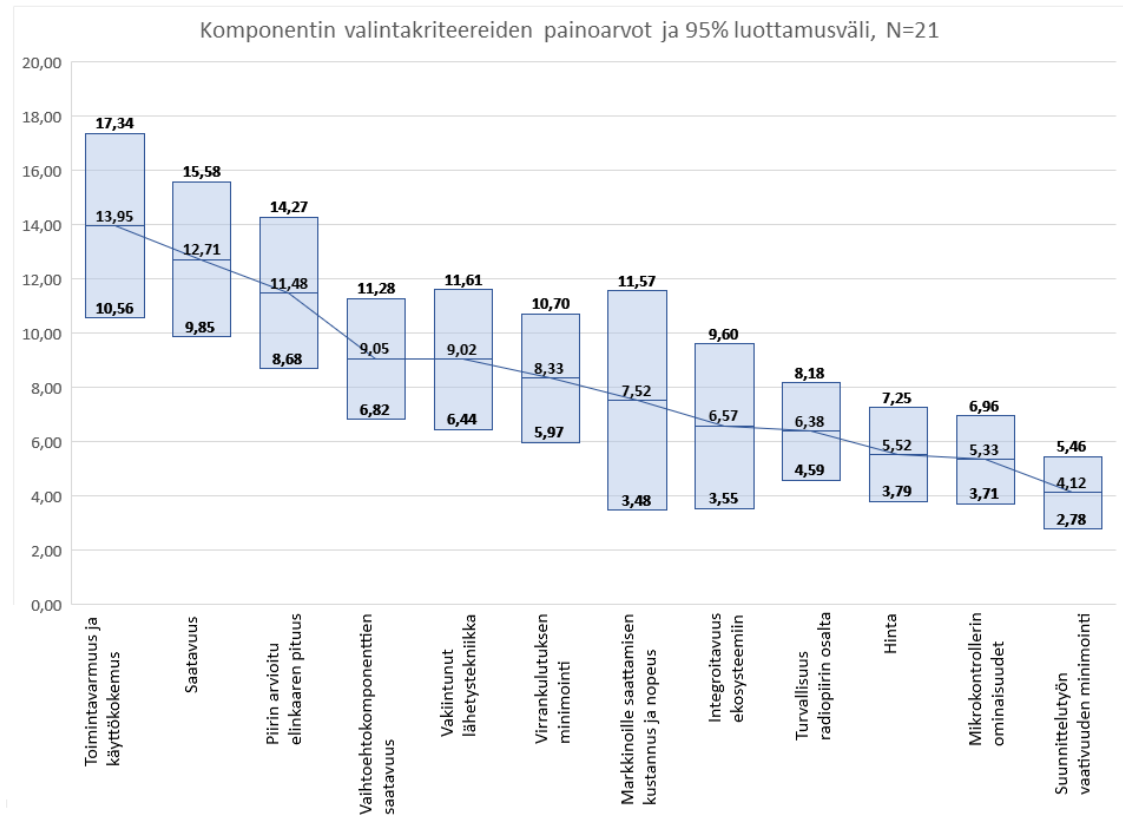
Vastausten perusteella yllä olevat kriteerit voitiin laittaa keskenään tärkeysjärjestykseen sekä laskea niille painoarvo toisiinsa verrattuna. Tällä metodilla pyrittiin huomioimaan pelkkää tärkeysjärjestystä paremmin, mikäli jokin kriteeri oli huomattavasti muita merkittävämpänä pidetty, ja välttämään jaetut sijat. Toisin kuin puhtaassa tärkeysjärjestykseen asettamisessa, valitulla metodilla vastaajan oli myös mahdollista antaa useammalle kriteerille sama painoarvo tai vaihtoehtoisesti nolla pistettä, mikäli kriteeri oli hänen mielestään täysin yhdentekevä.

Kriteereille laadittiin selitteet, jotka kuvastivat tarkemmin, mitä kullakin niistä pyrittiin arvioimaan (liite 2). Selitteiden toivottiin tuottavan avoimeen kenttään näkemyksiä vaatimuksista yksittäisen kriteerin sisällä sekä terävöittävän kriteerien tarkoitusta.

Kysely lähetettiin 70 henkilölle, jotka työskentelevät hoitokoneiden tuotekehityksessä. Vastauksia saatiin 21 kappaletta. Katoa selittää pitkälti se, ettei kyselyssä otettu kantaa jalkaohjaimen anturointiin tai mekaniikkaan, mikä karsi vastaajien joukosta sellaiset henkilöt, joilla ei ollut mielestään näkemystä elektronikasta. Vastaajien taustatkin vaihtelivat, mistä seurasi hajontaa tärkeinä pidetyistä ominaisuuksista: ohjelmistokehittäjä miettii jalkaohjainta eri tavalla kuin elektroniikkasuunnittelija.

Vastausten kato oli suuri suhteessa perusjoukosta otettuun otokseen, minkä vuoksi vastausten yleistämiseen sekä kriteereille laskettuun virhemarginaaliinkin oli suhtauduttava varauksella. Virhemarginaalin huomioiminen antoi kuitenkin tästä huolimatta arvokasta lisätietoa kriteerien keskinäiselle painottamiselle. Kullekin kriteerille laskettiin 95 %:n luottamusväli Excelissä käyttäen

otoskeskihajontaa (STDEV.S) ja Studentin *t*-jakaumalla (CONFIDENCE.T) laskettua virhemarginaalia. Kullekin kriteerille voitiin siten määritellä luottamusvälin ylä- ja alaraja eli keskiarvo  $\pm$  virhemarginaali (kuva 12).

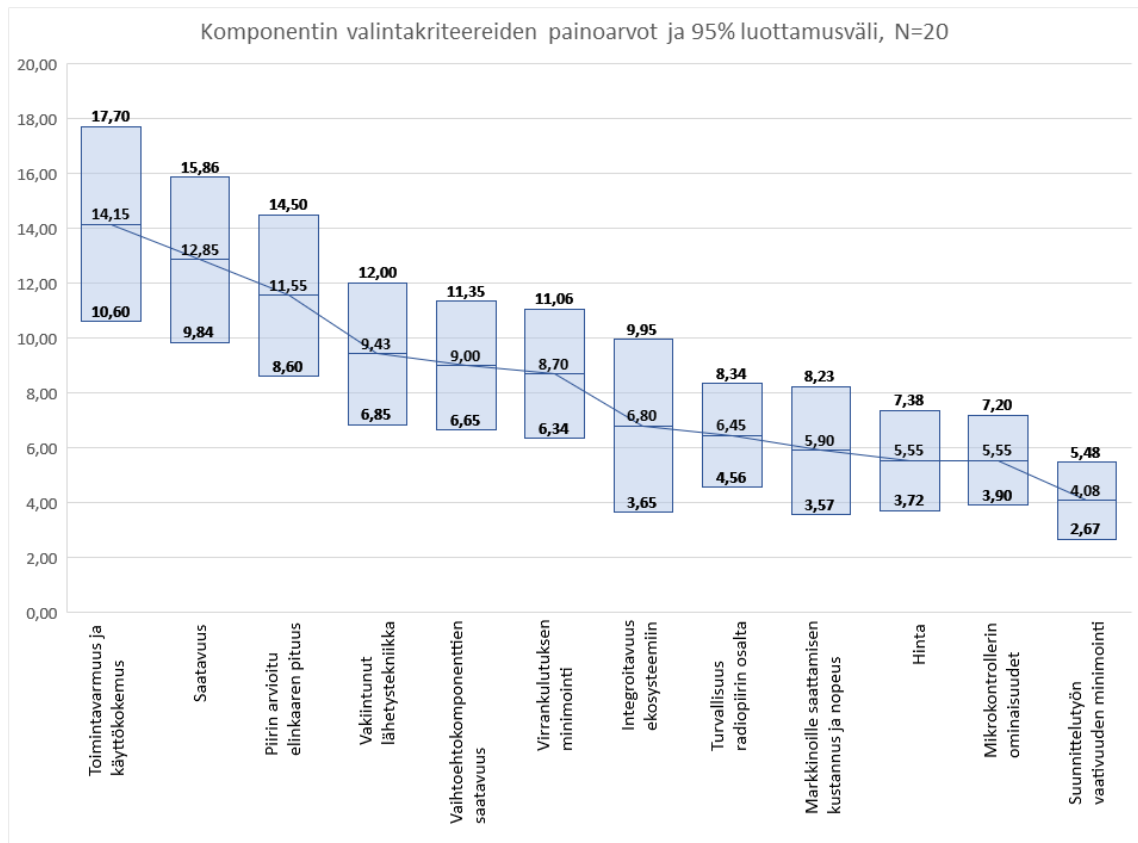


Kuva 12. Kyselytutkimuksen vastauksien keskiarvot ja lasketut 95 %:n luottamusvälit, N=21.

Vastaajat painottivat valintakriteereistä selvästi eniten toimintavarmuutta ja käyttökokemusta, radiokomponentin saatavuutta sekä sen arvioitua elinkaaren pituutta (liite 3). Myös vaihtoehtokomponenttien saatavuutta, vakiintunutta lähetystekniikkaa ja virrankulutuksen minimointia pidettiin olennaisina.

Koska vastauksia saatiin kohtalaisen vähän, yksikin suuresti poikkeava vastaus heilauttaa kriteerien lopullista järjestystä merkittävästi. Tuloksista oli havaittavissa ainakin yksi kriteeri, *markkinoille saattamisen kustannus ja nopeus*, jonka luottamusvälin ylä- ja alaraja poikkesivat toisistaan niin paljon, ettei sen sijaintia seitsemäntenä voitu pitää varmana. Tämän vuoksi päätettiin tarkastella, mitä

kriteerien järjestykselle ja hajonnalle tapahtuisi, mikäli kyseisen vastaajan vastaukset poistetaan kokonaan. Näin saatiin kriteereille uudet hajonnat otoskoolla 20. Kyseinen vastaaja poistamalla saatiin vähennettyä vastausten hajontaa ja järjestyksessä erottui selkeämpi trendi (kuva 13).



Kuva 13. Yhden poikkeavan vastaajan poistamisella korjatut vastauksien keskiarvot ja uudelleenlasketut 95 %:n luottamusväli, N=20.

Karsitusta aineistosta voitiin poimia paremmalla luottamuksella tärkeimmät kuusi kriteeriä komponenttivalinnan tueksi. Tärkeysjärjestyksessä ne olivat:

- toimintavarmuus ja käyttökokemus
- saatavuus
- piirin arvioitu elinkaaren pituus
- vakiintunut lähetystekniikka
- vaihtoehtokomponentin saatavuus
- virrankulutuksen minimointi.

Vähemmän tärkeinä vastaajat pitivät *integroitavuutta ekosysteemiin, turvallisuutta radiopiirin osalta, markkinoille saattamisen kustannusta ja nopeutta, hintaa, mikrokontrollerin ominaisuuksia sekä suunnittelutyön vaativuuden minimointia*. Näistä *integroitavuus ekosysteemiin* -kriteerin kohdalla vastauksissa havaittiin muita suurempi suhteellinen hajonta.

Avoimien vastausten näkemyksiä

Toimintavarmuuteen, käytettävyysongelmien välttämiseen ja käyttökokemuksen suoraviivaisuuteen oli toivottu edelliseen ohjaimen verrattuna parannuksia, jotka heijastuvat myös saaduista avoimista vastauksista. Toimintavarmuudesta nostettiin esille useita asioita: uudelta lähetystekniikalta toivottiin parempaa ympäristön häiriönsietokykyä, yhteydenmuodostuksen helppoutta, protokollan luotettavuutta ja samalla kanavalla olevien ohjainten konfliktien minimointia. Korjausehdotukseksi näille ongelmille tarjottiin eritoten Bluetoothin kaltaisen taajuushyppivän protokollan käyttöä.

Komponenttien huono saatavuus oli kirjoitushetkellä suuri ongelma, josta koitui toistuvia lisäkustannuksia ja -työtä. Siksi oli ymmärrettävää, että siihen liitännäisiä kriteereitä pidettiin tärkeinä. Komponentin toivottiin olevan suuren ja tunnetun valmistajan eritoten teollisuuskäyttöön tarkoitettu malli. Suuri käyttäjäkunta ja isot tuotantovolyymit katsottiin eduksi saatavuuden osalta, ainakin normaalissa markkinatilanteessa.

Planmecan tuotteiden eliniät ovat kymmeniä vuosia, joten vastaajien mukaan komponentin pitkä elinkaari oli tärkeä, jotta elektroniikkaa ja ohjelmistoa ei jouduttaisi uudelleensuunnittelemaan ja -hyväksyttämään liian usein. Toisaalta langattoman tekniikan todettiin päivittyvän nopealla tahdilla, joten aidosti pitkäikäistä piiriä ei välttämättä olisi mahdollista saada. Uudelleensuunnittelun myötä mahdollisesti uusittavien radiolaittehyväksyntöjen työläys nostettiin esiin useammassa vastauksessa. Vastaukset puolsivat siitä syystä vakiintuneiden protokollien ja piirien hyödyntämistä; näillä on havaittu olevan pidempi elinkaari valmistuksessa.



Vastaajat siis mielsivät vakiintuneen lähetystekniikan olevan sidoksissa komponentin elinkaareen. Protokollan, joka on laajasti käytetty ja hyvin tuettu, katsottiin vanhenevan muita hitaammin. Sellaiselle löytyisi helpommin myös valmiita työkaluja tuotekehitykseen ja esimerkiksi vianetsintään kentällä. Useat vastaajat korostivat lisäksi antennillisen radiomoduulin hyödyntämistä järjestelmäpiirin ja antennisuunnittelun sijaan. Moduuleista pidettiin niiden halvan hintatason lisäksi radioesihyväksyntöjen takia ja myös siksi, että niiden avulla omalta RF-suunnittelulta säästyttäisiin. Moduulien antennien oletettiin olevan hyvin sovitettuja suoraan valmistajalta ja riittävän suorituskykyisiä jalkaohjainkäyttöön sellaisinaan. Moduulin käytön helppouden katsottiin tuovan säästöjä tuotekehitysprosessiin, joka tekisi niistä hinnoiltaan kilpailukykyisempiä.

Vaihtoehtokomponentin saatavuuden osalta vastaajat arvelivat, ettei suoraan yhteensopivia korvaajia löydy monellekaan radiopiirille, joten uudelleensuunnitteluun vaihdon yhteydessä olisi tyydyttävä. Toivomus edes osin samankaltaisista moduuleista, esimerkiksi saman tuoteperheen eri varianteista, kuitenkin esitettiin, sillä ne saataisiin uudelleensuunnittelussa nopeammin käyttöön.

Virrankulutuksen minimoinnin osalta vastanneiden näkemys oli, että uudemmalla lähetystekniikalla päästäisiin joka tapauksessa vähintään samaan suorituskykyyn kuin edellisessä ohjaimessa. Usean vastaajan mukaan lataaminen liian usein häiritsee loppukäyttäjiä, joten uudella elektroniikalla pitäisi pystyä käyttämään ohjainta vähintään yhtä pitkään kuin edellistä, mieluiten merkittävästi pidempään. Edellinen ohjain pystyi noin 150 tunnin yhtäjaksoiseen käyttöön, vaikka radiopiirillä oli nykyisiin piireihin verrattuna suurehko virrankulutus. Virrankulutusta ei tarvitsisi *minimoida*, sillä parantunut käyttöaika ja latausväli riittäisi uudessa ohjaimessa.

Saatujen avoimien kommenttien perusteella esimerkiksi turvallisuuden, kuten myös mikrokontrollerin ominaisuuksien, katsottiin parantuvan reilusti edelliseen piiriin verrattuna pelkästään valitsemalla uudempi radiopiiri tai lähetysprotokolla. Tarjolla olevat uudet RF-mikrokontrollerit ovat moninkertaisesti suorituskykyisempiä kuin käytössä oleva vanha mikrokontrolleri.

Hinnan ja suunnittelutyön vaativuuden minimoinnin oletettiin olevan pitkälti välttämättömiä tekijöitä, joita on vaikea optimoida; ohjaimen elektroniikasta joudutaan väistämättä uusimaan monia asioita, valittiin mikä tahansa piiri, ja korvaavien piirien hinnat ovat karkeasti samaa suuruusluokkaa nykyisen kanssa. Radiokomponentin ei myöskään katsottu muodostavan merkittävää osaa jalkaohjaimen hinnasta.

Komponentin osalta markkinoille saattamisen kustannus ja nopeus olivat vastaajien mielestä optimoitavissa tekniikkavalinnalla vain tiettyyn pisteeseen asti, sillä muun muassa pakolliset EMC-testit vaadittaisiin lopputuotteelta kuitenkin, eikä niiden kestosta katsottu saatavan merkittäviä säästöjä piirivalinnalla. Integroitavuuden osalta esitettiin toiveita STM32-pohjaisesta prosessorista, koska kyseinen prosessoriperhe on laajalti käytössä hoitokoneiden muissa moduuleissa ja näin ohjelmistoa voitaisiin yhtenäistää. Tämä toive pyrittiin huomioimaan, mikäli se oli muiden kriteerien puitteissa mahdollista.

Yksikään vastaaja ei esittänyt ylimääräisiä lisäkriteereitä, mikä osoitti valittujen kriteerien kuvaavan komponenttivalinnan kannalta olennaisia asioita riittävän kattavasti. Tämän voidaan katsoa osaltaan parantavan saatujen vastausten hyödynnettävyyttä komponenttivalinnan tueksi.

## 5.2 Tyypillisen käyttötapauksen määrittely

Eri piirien virrankulutuksen arvioimiseksi tarvittiin standardoitu käyttötapaus, jotta piirien käyttöaika samalla akustolla voitiin laskennallisesti verrata. Standardista IEC 80601-2-60 [3, s. 35–36] löytyy arvio hammashoitokoneen tyypillisestä käyttöajasta. Sen avulla standardissa on määriteltä instrumenttien testejä, kuten mikromoottorien (eli poran) tehonmittausta. Samoja määritelmiä voidaan kuitenkin käyttää myös suuntaa antavaan arvioon jalkaohjaimesta, sillä se ohjaa mikromoottoria ja on siten samaan aikaan käytössä.

Standardin määritelmän mukaan oletetaan, että:

- hammashoitokoneen käyttöaika on 10 tuntia per päivä
- yhdellä hoitokoneella hoidetaan 20 potilasta per päivä
- yhden potilaan hoitoaika on 30 minuuttia
- mikromoottorin käyttöaika on 30 sekuntia per potilas.

Lisäksi jokaisen potilaan kohdalla lääkäri ajaa jalcaohjaimen avulla hoitokoneen tuolin vastaanottoasennosta hoitoasentoon ja lopuksi takaisin. Tästä koostuu arviolta maksimissaan 30 sekuntia ylimääräistä ohjaimen käyttöaikaa, joten yhteensä ohjain on aktiivisessa lähetystilassa minuutin per potilas ja yhteensä 20 minuuttia päivässä. Muun lääkärin työajan ohjain voi olla vaihtelevan tasoisessa valmiustilassa ja loput 14 tuntia vuorokaudesta sammutettuna tai syvässä lepotilassa.

### 5.3 Komponenttien arviointi kriteereittäin

Edellä määritellyn kriteeristön ja avointen vastausten perusteella komponenttiedokkaista laadittiin arvostelumatriisi, jossa kunkin vaihtoehdon soveltuvuutta arvioitiin kriteereittäin. Vaihtoehdoille annettiin kunkin kriteerin sisällä pisteitä. Esimerkiksi hinnasta halvin sai eniten pisteitä ja kallein vähiten, muiden saadessa ääripäiden väliltä lineaarisesti skaalatun pistearvon. Muille kriteereille annettiin pisteiden jakoperusteet, jotka löytyvät liitteestä 4.

Komponenttiedokkaat valikoituivat pitkälti kriteerien avulla. Ne olivat tekniikaltaan yhden tai kahden protokollan (Bluetooth LE ja Zigbee) järjestelmäpiirejä tai moduuleita, sillä *vakiintunut lähetystekniikka* oli katsottu tärkeäksi valintakriteeriksi. Kaikki vaihtoehdot olivat isoilta ja tunnetuilta valmistajilta.

Komponenttiedokkaina oli STMicroelectronics:lta neljä STM32WB-sarjan järjestelmäpiiriä (-10CCU5, -15CCU6, -50CGU5, -55CGU6), kaksi BlueNRG-sarjan järjestelmäpiiriä (BlueNRG-232 ja -248) sekä kaksi moduulia (STM32WB5MMGH6TR ja BlueNRG-M2SP/-SA). Nordic Semiconductor:lta vertailuun valittiin kolme nRF52-perheen järjestelmäpiiriä (nRF52810, -832, -840)

ja niitä vastaavat moduulit. Nordic ei valmista itse piireistään moduuliversioita, mutta sellaisia on saatavilla muun muassa Blair Connectivityltä. Mukaan valittiin siten Blair Connectivityn radiomoduulit BL651, BL652 ja BL654. Lisäksi vertailtiin Silicon Labsin BGM220P ja 220S -moduuleita.

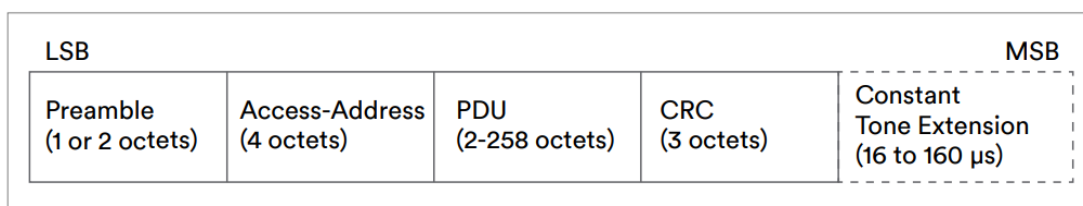
Järjestelmäpiirien ja radiomoduulien hintaeron tasoittamiseksi järjestelmäpiirien yksikköhintaan lisättiin siruantennin arvioitu kustannus, joka oli noin 0,5 euron luokkaa.

*Toimintavarmuudesta ja käyttökokemuksesta* ei lopulta jaettu erillisiä pisteitä, sillä komponenttiedokkaiden katsottiin olevan lähetystekniikkansa osalta hyvin samanlaisia. Niiden toimintaa jalkaohjainkäytössä olisi ilman ohjelmointia ja prototyyppejä mahdotonta arvioida luotettavasti, joten tämä kriteeri jätettiin pisteystämättä. Bluetoothin tai uudemman Zigbee-version katsottiin kuitenkin olevan lähetystekniikkoina riittävän luotettavia ilman erillistä testaamista. Lisäksi ne olivat kaikki ominaisuuksiltaan nykyiseen tekniikkaan verrattuna parannus.

Kunkin komponentin *saatavuus* arvioitiin tarkastamalla useamman kansainvälisen elektroniikkamyynnin varastotilanne tarkastushetkellä sekä tulevat varastontäydennykset (mikäli ne olivat ilmoitettu). Tarkastetut myyjät olivat Farnell, Mouser, Digi-Key, TME (Transfer Multisort Elektronik), RS Components, Arrow, Avnet sekä Future Electronics. Niistä tarkistettiin myös komponentin kappalehinta yli 500 kappaleen kertatilaukselle. Lisäksi kultakin myyjältä selvitettiin komponenttien ja mahdollisten tuoteperheiden, eli *vaihtoehtokomponentin* saatavuutta. Saatavuuden arviointi kirjoitushetkellä oli ongelmallista, sillä koronaviruspandemian myötä elektroniikkakomponenttien valmistus ja toimitusketjut olivat pahasti häiriintyneet ja vasta normalisoitumassa. Saatavuusarvioinnin tekeminen esimerkiksi puoli vuotta myöhemmin tuottaisi varmasti erilaisia tuloksia.

*Virrankulutuksen minimoinnista* annetut pisteet perustuivat laskelmiin, jotka pohjautuivat Bluetooth-prokollasta ja aiemmasta käyttötapauksen määrittelystä (20 minuuttia aktiivikäyttöä päivässä) koostettuun kaavaan. Kuten kyselyvastauksissakin todettiin, virrankulutuksen väheneminen aiemmasta tasosta

johonkin uuteen optimiin riittäisi, minimointia ei sinänsä tarvittaisi. Bluetooth spesifikaatiosta voitiin päätellä, että 1 Mbit/s siirtonopeudella yhden bitin siirtämiseen kuluu yksi mikrosekunti aikaa. Tätä hyödynnettiin karkean laskelman tekemiseen viestikehysten siirron kestosta. Bluetooth viestikehys (Link Layer Packet) koostuu perusrakenteeltaan okteteista eli 8 bitin tavuista (kuva 14). Bluetooth-protokollassa on määritelty myös viestikehysten välinen standardiviive IFS (Inter Frame Space), joka on aina 150 mikrosekuntia [18, s. 2737].

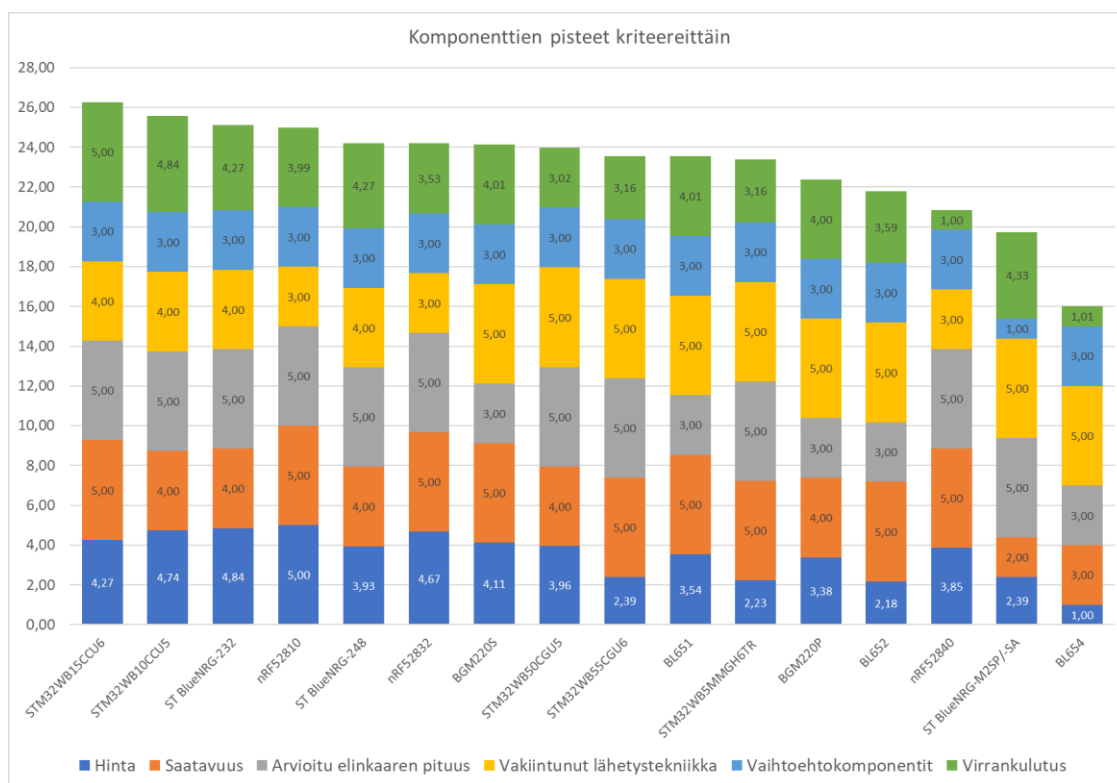


Kuva 14. Bluetooth LE:n viestikehysten rakenne ja sen osien koko okteteina eli 8 bitin tavuina [19, s. 19]. PDU on hyötykuorma ja CRC virheentarkistuskoodia.

Hoitokoneelle siirrettävä paketti pitäisi sisällään 8 tavua hyötykuormaa, eli viestikehys olisi kooltaan minimissään 2 + 4 + 8 + 3 tavua eli 136 bittiä, joiden siirtämiseen menisi ideaalitulanteessa 136 mikrosekuntia plus pakollinen 150 mikrosekunnin IFS-viive eli yhteensä noin 286 mikrosekuntia. Vastaanottava laite voi haluttaessa lähettää jokaiselle paketille kiittauksen (ACK), joka on oletuksena 10 tavua pitkä ja vie siten 80 mikrosekuntia (plus uusi IFS-viive). Yhden paketin ja kiittauksen vaatima prosessointiaika olisi tällöin 516 mikrosekuntia eli noin 0,5 ms. Jos idle-tilasta aktivoitumiselle huomioidaan viivettä, voisi yksi lähetystapahtuma kestää kokonaisuudessa esimerkiksi millisekunnin. Hoitokoneelle lähetettäisiin jatkossakin ohjauskomentoja 20 millisekunnin välein ja välissä ohjain olisi idle-tilassa 19 millisekuntia. Päivittäisessä 20 minuutin aktiivisessa käyttöajassa ohjain lähettäisi yhteensä siis 60 000 viestikehystä.

Edeltävällä käytötapauksella kaikille komponenteille laskettiin kokonaisvirrankulutus vuorokaudessa. Siinä huomioitiin eri toimintatilojen virrankulutus datalehdien tietojen perusteella. Pienemmästä kulutuksesta sai täydet 5 pistettä ja muut lineaarisesti vähemmän, suurimman virrankulutuksen saadessa 1 pisteen.

Komponenttiehdokkaiden saamat pisteet ja keskinäinen paremmuusjärjestys näkyvät kuvasta 15. Tulosten perusteella vaihtoehdot olivat yllättävän lähellä toisiaan, mutta se voi johtua valituista pisteytysperusteista, joilla kaikki eroavaisuudet piirien välillä eivät välttämättä korostuneet tarpeeksi.



Kuva 15. Kaavio komponenttien kriteereittäin saamista pisteet.

Pisteytyksen perusteella ”voittajaksi” valikoitui hyvin pienellä marginaalilla STM32WB15CCU6. Kuusi parasta olivat kaikki järjestelmäpiirejä. Seitsemäs ehdokas oli ensimmäinen moduuli.

Lopullisessa valinnassa päätettiin kuitenkin priorisoida ensisijaisesti moduuleja, sillä järjestelmäpiirien vaatimaa antennisuunnittelua haluttiin välttää. Kyselyvastauksetkin puolsivat moduulien käyttöä. Moduulilla saataisiin toimiva ratkaisu nopeammin ja hyötyä myös hyväksyntäprosessissa, joka säästää resursseja. Tehdyn vertailun perusteella moduulit eivät olleet juurikaan kalliimpia tai muilta ominaisuuksiltaan merkittävästi huonompia. Parhaaksi pisteytetyn moduulin (BGM220S) huomattiin tarkemmassa tarkastelussa kuitenkin tarvitsevan

piirilevyantennin. Siksi valinta kohdistui saman tuoteperheen siruantennilliseen versioon BGM220P, vaikka vertailussa se sijoittui huonommin. Sen ominaisuudet olivat antennia lukuun ottamatta samanlaiset, joskin sillä oli suurempi virrankulutus lähetystilassa, johtuen oletettavasti antennin heikommasta vahvistuksesta. Ehdokkaiden teknisiä ominaisuuksia verrattiin aiemman elektronikan vaatimukseen, pääasiassa I/O-kanavien määrään. BGM220P moduulissa ne riittivät, mutta esimerkiksi osassa STMicroelectronics:n piirejä ei.

## 6 Elektroniikkasuunnittelun toteutus

### 6.1 Signaalikartoitus ja komponentin valinta

Aiemman jalcaohjaimen piirikaavion pohjalta laadittiin signaalikartoitus, jotta saatiin käsitys minkälaisia tuloja ja lähtöjä uudelta radiopiiriltä vaadittaisiin. Kaikkia samoja nastoja, jotka olivat käytössä edellisessä MC13213-järjestelmäpiirissä ei tarvittu, sillä osa niistä oli kyseiselle piirille spesifejä signaaleja. Jäljelle jäivät ohjaimen latauksen ja anturoinnin kannalta kriittiset signaalit, jotka on esitelty liitteen 5 taulukossa 1.

Uuden prosessorin yhteensopivuutta määrittivät kartoitetut anturoinnille tarvittavat I/O-nastat ja lohkot. Analogisia sisääntuloja hall-anturien ja jännitteiden mittaamiseen tarvittiin vähintään seitsemän kappaletta, digitaalisia sisääntuloja ja lähtöjä erilaisille ohjauksille 11 kappaletta, kanttiaaltoa tuottavia PWM-lähtöjä yksi ja lisäksi kaksi kappaletta kellopiirin timer capture -sisääntuloja. Yhteensä erilaisia I/O-nastoja tarvittiin siis minimissään 21, joka rajoitti soveltuvien komponenttien määrää. I/O-nastojen tarvetta oli optimoitu jo aiemmassa elektronikassa kytkemällä kahden hall-anturin käyttöjännitteitä päälle ja pois vuorotellen. Molempien antureiden signaalit voitiin näin lukea samasta johteesta yhdellä prosessorin nastalla, koska vain yksi anturi oli aktiivinen kerrallaan.

Radiopiiriltä jouduttiin kartoitettujen signaalien lisäksi varaamaan nastoja myös muuhun käyttöön, kuten ohjelmointiliittimelle, jonka vaatimukset riippuvat piirin mallista ja toteutuksesta. Järjestelmäpiireistä tehtyjen moduulien tapauksessa

kaikkia nastoja ei myöskään ole tuotu ulos moduulin rajapintaan, vaan niitä on käytetty sisäisiin kytkentöihin. Käyttäjälle saatavilla olevan I/O:n määrä voi siten todellisuudessa olla rajallisempi, kuin piirin datalehti antaisi ymmärtää.

Radiojärjestelmäpiirin valinta kohdistui lopuksi komponenttiverailun ja signaali-kartoituksen myötä Silicon Labsin BGM220P-radiomoduuliin, jossa on EFR32BG22-perheen radiojärjestelmäpiiri ja integroitu siruantenni sekä antennille vaaditut sovituspiirit. Järjestelmäpiirissä oli jalkaohjaimen sensorien käyttöön riittävästi I/O-nastoja, mukaan lukien tarpeeksi A/D-muuntimen tuloja ja ajastinlohkoja PWM-lähtöön ja kellotettuihin capture-tuloihin.

## 6.2 PADS-suunnitteluympäristö ja uuden komponentin luominen

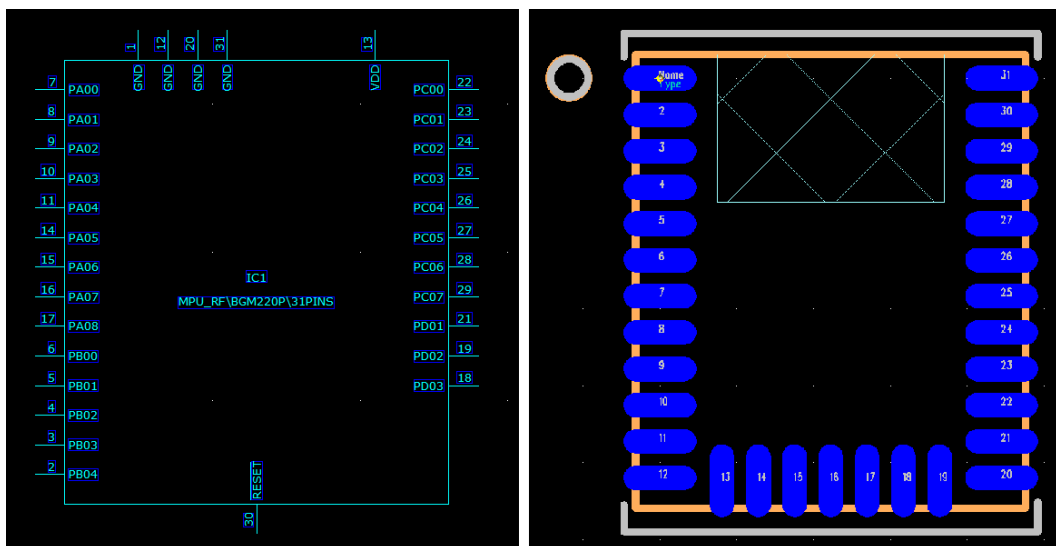
Käytössä ollut Mentor Graphicsin PADS-suunnitteluympäristö jakautuu kahteen ohjelmaan. PADS Logic -ohjelmalla laaditaan piirikaaviot kytkentöineen, joiden piirilevysuunnittelu (eli layout) tapahtuu PADS Layout -ohjelman puolella. Uuden komponentin luominen tarkoittaa symbolien (CAE decal ja PCB decal) sekä uuden osan (part type) laatimista. Part type sisältää komponentin tekniset tiedot eli attribuutit ja nastojen (pin) tai porttien (gate) määrittelyn. Attribuutit ovat osaluetelossa esitettävien tietojen lähde. Niiden avulla määritellään komponentin tarkka tyyppi ostokoodeineen ja mahdollisine vaihtoehtoineen. Attribuuteilla ilmaistaan myös komponentin elinkaaren tila ja tuoteturvallisuusluokitus (safety critical component). Porttien määrittely toimii linkkinä piirikaaviossa käytetyn osan ja piirilevylle tulevan fyysisen mallin välillä. Kytkennät välittyvät kytkentäverkon kuvauksen avulla (netlist).

Logic-ohjelman puolelle laaditaan kaaviosymboli eli CAE-decal, joka on komponentin yleinen piirisymboli, esimerkiksi logiikkapiirin yksittäinen portti. Komponentin fyysistä koteloa ja sen mittoja sekä juotettavien nastojen muotoja ja etäisyyksiä edustaa komponenttimalli eli PCB-decal. Komponentin varsinainen määrittely tehdään osalle (part type), joka sitoo piirikaavion ja piirilevyn symbolit toisiinsa pinnikuvauksien avulla. Yhdellä osalla voi olla useampi CAE-symboli (moniporttinen komponentti) ja piirilevyn puolella vaihtoehtoisia kotelotyyppejä.



Kaavion symboli on puhtaasti informatiivinen suunnittelijalle ja sen voikin piirtää suunnittelua helpottaakseen erilaisissa orientaatioissa ja jättää vaikkapa käyttämättömiä nastoja esityksestä pois.

Radiomoduulin tapauksessa esimerkiksi piirin vaatimat käyttösähkö (VDD) ja neljä maadoitusnastaa (GND) piirrettiin kaaviosymbolin yläreunaan, jolloin niiden väliin oli helppo piirtää käyttöjännitteen suodatuskondensaattoreita. Kuten kuvasta 16 näkyy, CAE-dekaalin ja PCB-dekaalin ulkomuodolla tai edes nastajärjestyksellä ei ole yhteyttä toisiinsa. CAE-dekaali on vapaamuotoinen piirikaavion suunnittelutyötä palveleva symboli, PCB-dekaali on puolestaan komponentin fyysistä sijoittamista ja mitoitusta varten.

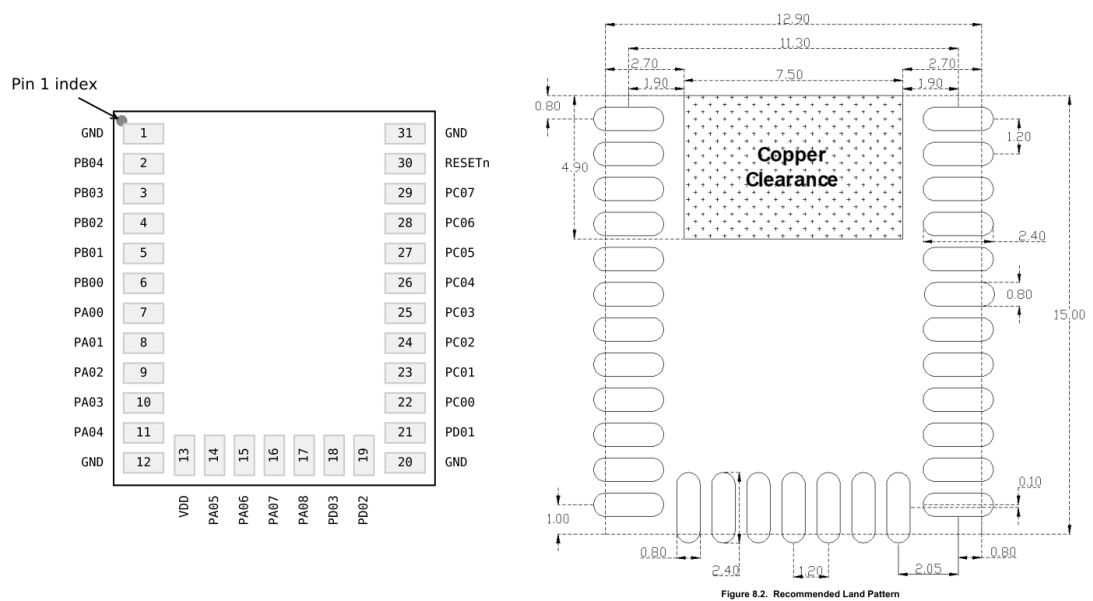


Kuva 16. Radiokomponentille laaditut dekaalit. Vasemmalla piirikaaviossa käytetty CAE-decal ja oikealla piirilevyille asemoitava PCB-decal ja silkkipaino.

Piirilevyt ovat kerrosrakenteisia, joten niiden suunnittelukin tapahtuu kerrostaamalla tarvittavia piirteitä päällekkäin. Kupari- ja eristekerrosten lisäksi piirilevyille tulee suunnitella ainakin juotteenestopinnoite (solder mask), juotosalueet (paste mask), poraukset (drilling) ja piirilevyn ääriviivat (outline). Tyypillisesti samalla suunnitellaan myös silkkipaino (silk screen) ja asemointikuvat (assembly drawing). Jotkin kerroksista on tarkoitettu komponenttien ladontatyötä helpottamaan, eikä niitä tarvita itse piirikorttipohjan valmistamiseen. PCB-dekaali tulee

tehdä millintarkasti komponentin datalehden mittakuvien perusteella, sillä se määrittää komponentin asemoinnin ja koon piirilevyllä. Väärin piirretty PCB-dekaali aiheuttaisi varmuudella ongelmia valmistuksessa. PCB-dekaaliin sisältyy sen silkkipainetut ääriviivat sekä 1. nastan paikka.

Luotavan radiokomponentin attribuutteihin määriteltiin nastajärjestys ja kunkin nastan käyttötarkoitus, jotka pohjautuvat valmistajan datalehdestä saatavaan listaukseen (pinout). PCB-dekaali piirrettiin datalehden mittakuvaa noudattaen. Pinout ja mittakuva datalehdestä on esitetty kuvassa 17. Radiopiirin erityisvaatimuksena oli piirilevyn kuparoinnista vapaa alue antennin läheisyydessä (Copper Clearance), joka piirrettiin ja määriteltiin sääntönä PCB-dekaaliin. Layout-ohjelma noudattaa kunkin komponentin sisältämiä suunnittelusääntöjä, eikä tässä tapauksessa anna asettaa kuparointia suoja-alueelle.



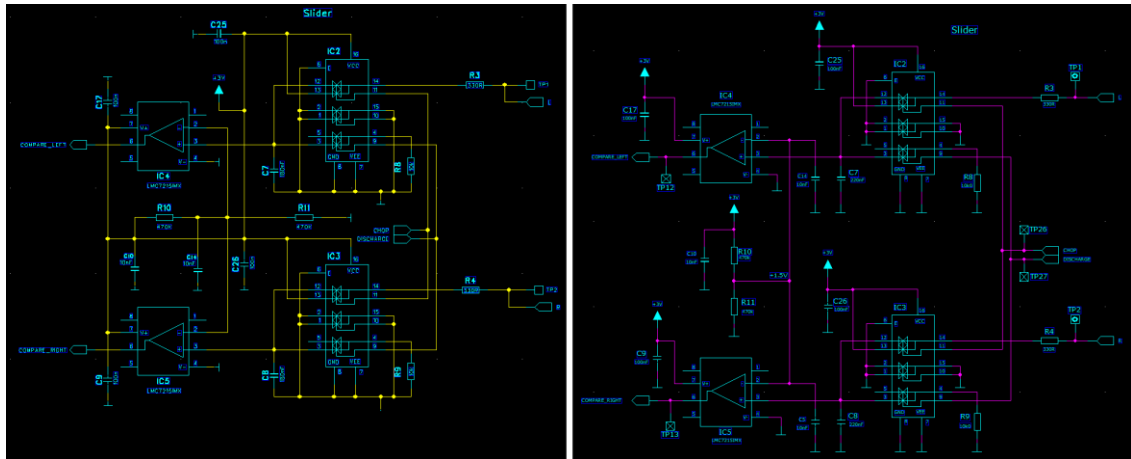
Kuva 17. Silicon Labsin BGM220P radiomoduulin pinnijärjestys ja mittakuva datalehdestä [22].

### 6.3 Piirikaaviosuunnittelu

Piirikaavion laatiminen uuden radiopiirin vaatimilla muutoksilla tehtiin aiempaan kaavioon pohjautuen. Työstä tehtiin edellisen piirikortin uusi revisio (versionhallinnan versio) eikä kokonaan uutta korttia omine tunnistenumeroineen. Näin historiatiedot tuotteen piirikorttien muuttuneista versioista säilyivät koherentteina.

Työn pohjana käytettiin aiemman revision piirikaaviota, johon uuden komponentin vaatimat muutokset tehtiin. Ennen varsinaisen uuden suunnittelutyön aloitusta suunnittelutiedostoon jouduttiin tekemään muutoksia sen iästä johtuen. Tiedosto oli luotu vanhemmalla PADS-ohjelmiston versiolla ja yrityksen vanhempia komponenttikirjastoja ja -tietueita käyttäen. Suunnittelupohja vaihdettiin uudempaan, joka päivitti määriteltyjä piirtosääntöjä ja tyylejä uudemman ohjeistuksen mukaisiksi. Suurin osa vanhassa kaaviossa käytetyistä komponenteista löytyi myös uudesta kirjastosta, mutta niitä ei voitu automaattisesti korvata vaihtuneen nimeämiskäytännön vuoksi. Tämän takia myös muuttumattomina pysyvät komponentit oli manuaalisesti korvattava uusilla osatyypeillä, alkuperäiset komponenttiarvot säilyttäen. Täten osaluettelot tulostuisivat oikein kortin valmistajalle ja komponentit olisivat keskenään samaa kotelotyyppiä.

Komponenttipäivityksen yhteydessä piirikaavion luettavuutta parannettiin, jotta esimerkiksi mittauskytkennät olisivat selkeämpiä. Esitystavasta johtuen kytkentöjen ymmärtäminen nopealla silmäyksellä oli vaikeaa. Siistimisessä noudatettiin yleisiä suunnittelusääntöjä: kytketyt signaalit etenevät vasemmalta oikealle ja potentiaalierot kasvavat alhaalta ylöspäin. Kuvassa 18 näkyy esimerkki muuttuneesta esitystavasta, jonka myötä piirien käyttösähköjen ja referenssijännitteiden yhteydet ymmärtää paremmin.



Kuva 18. Esimerkki piirikaavion luettavuuden parantamisesta, vanha vasemmassa ja uusi oikealla. Uudessa kaaviossa on lisäksi uusia testipisteitä (TP).

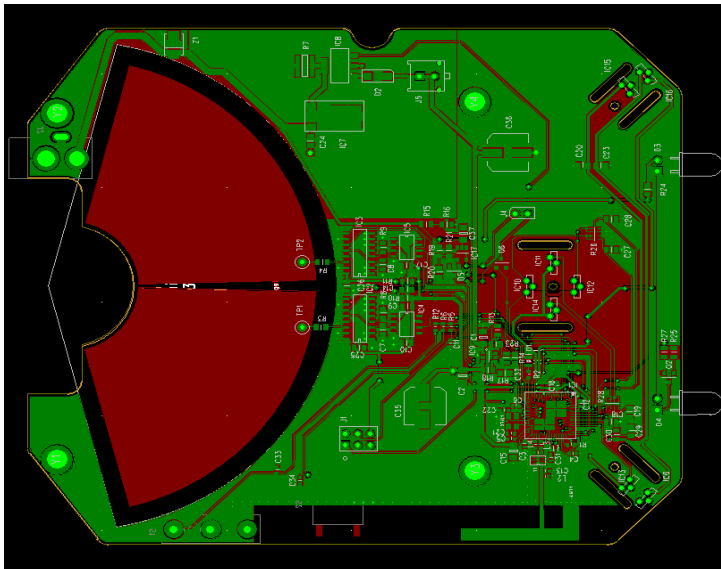
Risteävien johdotusten takia vanhasta kaaviosta oli vaikea hahmottaa sitä, mitkä kytkennät olivat oikeasti yhteydessä toisiinsa. Tyyliseikat, kuten piirien suodatuskondensaattorien parempi asemointi selventää minkä piirin syöttöön ne kuuluvat. Myös piirien maadoitusten piirtäminen erillisiksi vedoiksi selkeyttää, että ne yhdistetään maahan – ei toisiinsa ja sitten maahan. Kaavion muitakin kytkentöjä korjattiin esitettyyn tyyliin.

Tiedostopäivitysten ja luettavuuden parantamisen jälkeen suunnittelu uudella komponentilla voitiin aloittaa. Kaaviosta poistettiin edellisen radiojärjestelmäpiirin vaatimat ylimääräiset komponentit, kuten ulkoiset kiteet ja sovituspiirit, joita uudempi piiri ei hyödynnä. Myöskään komponenttina laadittua piirilevyantennia ei tarvittu. Latauskytkentä ja käyttöjännitteen vakavointi akuista jätettiin ennalleen, sillä uusi prosessori toimisi samalla jännitteellä. Valmis piirikaavio on liitteen 6 kuvassa 1.

#### 6.4 Piirilevy-suunnittelu

Piirilevy-suunnittelussa eli layoutissa oli myös paras hyödyntää aiempaa piirikorttia soveltuvin osin (kuva 19). Layoutin puolella oli useita kriittisiä osioita, joihin ei tulisi tehdä muutoksia ohjaimen mekaniikasta johtuen. Ilmeisin näistä oli piirilevyn muoto, joka oli suunniteltu yhteensopivaksi ohjaimen pohjavalun ja

irrotettavan kuoriosan kanssa. Levyn muotoa ja kiinnitysreikiä ei muutettu, kuten ei myöskään painonappien magneetteja lukevien hall-antureiden sijaintia. Ne määräytyivät kuoren muodon ja runkorakenteen mekaniikan perusteella. Ohjauksen asentoa luetaan kammien rungon ja piirilevyllä olevien mittaussektoreiden muodostaman tasokondensaattorin avulla, joten sen kuparikaadoista muodostettujen sektoreiden sijaintia tai pinta-alaa ei muutettu. Muuttumattomina pysyvät osiot piirilevytä suojattiin asettamalla ne lukittuun tilaan, jolloin niitä ei voi vahingossa siirtää tai poistaa.



Kuva 19. Jalkaohjaimen edellinen piirilevy, jossa näkyy muun muassa kapasitiivisen mittauksen punaiset kupariset sektorit, invertoitu F-antenni sekä kiinnitysreikien ja muun mekaniikan aukkoja.

Levysuunnittelussa voitiin hyödyntää lukittujen alueiden ulkopuolelle jäävää tilaa, jota oli levyn suuresta pinta-alasta johtuen reilusti. Piirilevy muutettiin 2-kerroslevystä 4-kerroslevyyn. Muutoksella levyn toinen kerros voitiin osoittaa pelkästään yhtenäisen maatason käyttöön ja vastaavasti kolmas kerros sisältää 3 V:n käyttöjännitetaso. Komponenttien maadoitus oli nyt mahdollista tehdä läpivientien (via) kautta suoraan alempaan kerrokseen lyhintä mahdollista reittiä pitkin, jolloin käyttöjännitteen syöttöimpedanssi on alhaisin mahdollinen. Samalla piirikytkentöjen häiriönsieto paranee, mikä on eritoten RF-laitteissa tärkeää. Pintakerrokseen kaadettua maadoitusta myös tikattiin (stitch) läpivienneillä

alempaan maakerrokseen, jotta potentiaalieroa kerrosten välille ei pääse synty-  
mään. Näin vältetään mahdollinen häiriösäteily maatasoista.

Radiopiirin valmistajan ohjeistuksen mukaisesti piiri asemoitiin aivan piirilevyn  
reunalle ja sen antennin ympärille tehtiin erikseen tikkausta maatasoon. Muiden  
komponenttien asettelua samalle reunalle ja lähietäisyydelle radiopiirin kanssa  
vältettiin tietoisesti.

Valmistuksessa koneladottavat pintaliitoskomponentit (SMD) pidettiin kokonai-  
suudessaan päällimmäisessä kerroksessa, jotta levy tarvitsisi latoa vain yhdelle  
puolelle. Tämä helpottaa pastajuottamista (reflow soldering) merkittävästi ja vä-  
hentää siten valmistuskustannuksia. Pohjakerrokseen jäi laturiliitin ja mikrokyt-  
kin, kuten aiemmassakin jalkaohjaimessa. Mekaniikasta johtuen niiden sijoitte-  
lua ei voitu muuttaa. Nämä komponentit kiinnitetään jatkossakin käsin juottaen.

Pohjapuolelle sijoitettiin aiemmasta ohjaimesta poiketen kattavasti testipisteitä  
kaikille signaaleille, jolloin piirikortti voidaan tuotantotestata automaattisesti neu-  
lapeti-tyylisellä testilaitteella. Testilaitteiston neulat kytkeytyvät kuparijohteissa  
oleviin paljaisiin täpliin eli testipisteisiin. Näin voidaan nopeasti mitata, kulkeeko  
kortilla oikean tasoiset signaalit oikeisiin paikkoihin. Aiempi jalkaohjaimen piiri-  
kortti testattiin manuaalisesti, mikä kasvatti kortin läpimenoaikaa tuotannossa.

Piirilevysuunnittelun jälkeen valmiille kortille tehtiin katselmointi, jossa tuotekehi-  
tysyksikön muut elektroniikkasuunnittelijat tarkastavat piirikortin virheiden va-  
ralta ja ehdottavat parannuskohteita. Kun suunnittelutyö oli saatettu kaikkia osa-  
puolia tyydyttävään laatutasoon, luotiin siitä Gerber-tiedostot, jotka ovat piirikor-  
tin rakennetta ja osia kuvaavia tiedostoja valmistusta varten. Lisäksi laadittiin  
komponenttien latomista varten tarvittava osaluettelo ja ladontakoordinaattitie-  
dosto. Valmiin piirikortin kaikki kerrokset ovat esitelty liitteen 6 kuvissa 2–5.

Suunnittelutiedostot ja niistä johdetut tulosteet taltioitiin yrityksen dokumenttien  
hallintajärjestelmään virallisesti hyväksyttäviksi digitaalisilla allekirjoituksilla.  
Käytössä on Siemensin Team Center, joka sisältää dokumenttien ja tiedostojen  
automaattisen versionhallinnan ja arkistoinnin.

Piirikortista valmistetaan seuraavaksi prototyyppi. Sen avulla voidaan kehittää tarvittava ohjelmisto ja testata piirikortin toiminta. Mikäli korjattavaa ei löydy, laite viedään tarvittavien hyväksyntäviranomaisten arvioitavaksi. Hyväksyntöjen kanssa se voidaan siirtää tuotantoon.

## 7 Yhteenveto

Projektin lopputuloksena oli uudistettu jalkaohjaimen elektroniikka modernisoidulla lähetystekniikalla. Syntyi tuotantovalmis piirikortti, jonka pohjalta on aikomus valmistaa prototyyppikortit testausta ja viranomaismittauksia varten. Aidon toiminnallisuuden jalkaohjain saa uudella elektroniikalla ohjelmistokehityksen myötä; ohjelmisto vaikuttaa osaltaan myös langattoman kommunikoinnin suorituskykyyn ja siten esimerkiksi akunkestoon. Vasta kun ohjelmistoon perustuvat toiminnot ovat määriteltäviä, voidaan aloittaa testaaminen lopullisen suorituskyvyn todentamiseksi.

Tehdyn kysely- ja taustatutkimuksen myötä kirkastui, että langattomasti kommunikoidun laitteen kannattaisi kustannusten ja käytettävän työajan puitteissa olla ensisijaisesti valmis moduuli, joka sisältää antennin, ja joka hyödyntää vakiintunutta lähetystekniikkaa. Bluetoothin kaltaista pitkälle kehitettyä protokollaa hyödyntämällä saadaan myös ohjelmistoon toiminnallisia hyötyjä, kuten häiriönsietoa, tietoturvallisuutta ja varmatoimisuutta viestinnässä ja yhteydenmuodostuksessa. Täysin omaan kehitykseen nojautuvassa ratkaisussa näitä olisi vaikea toteuttaa nopealla aikataululla.

Viranomaishyväksyntöjen näkökulmasta modulaarisuus ja valmis radiotekniikka olivat myös hyvin vartenotettava vaihtoehto: ne tarjoavat muita ratkaisuja suoraviivaisemman tien markkinoille saattamiseen. Planmecan kokemukset oman antennisuunnittelun tuomista haasteista aiemman jalkaohjaimen kohdalla puolsivat tätä näkemystä.

Yrityksessä ilmaistiin tahtoa hyödyntää kyselytutkimuksen kaltaista työkalua muidenkin tuotekehityshankkeiden toteutuksissa, sillä näin saadaan eri

sidosryhmien näkemykset tuotteiden teknisiin ominaisuuksiin liittyen paremmin esille. Lisäksi tietoa käsiteltäisiin järjestelmällisesti suunnitteluvaatimusten muodostamiseksi.

Opinnäytetyön päätepiste haluttiin tietoisesti rajata tähän vaiheeseen suunnittelutyötä, eritoten valmiiksi saattamisen vaatimien ulkoisten resurssien takia. Korttien ohjelmistokehitystä ei ollut mielekästä yrittää sisällyttää tähän työhön eikä siksi prototyypikorttejakaan jääty odottamaan niiden potentiaalisesti pitkän valmistusajan vuoksi. Ilman lopullista ohjelmistoa niistä saatava lisätieto tälle insinööriyölle olisi vähäistä.

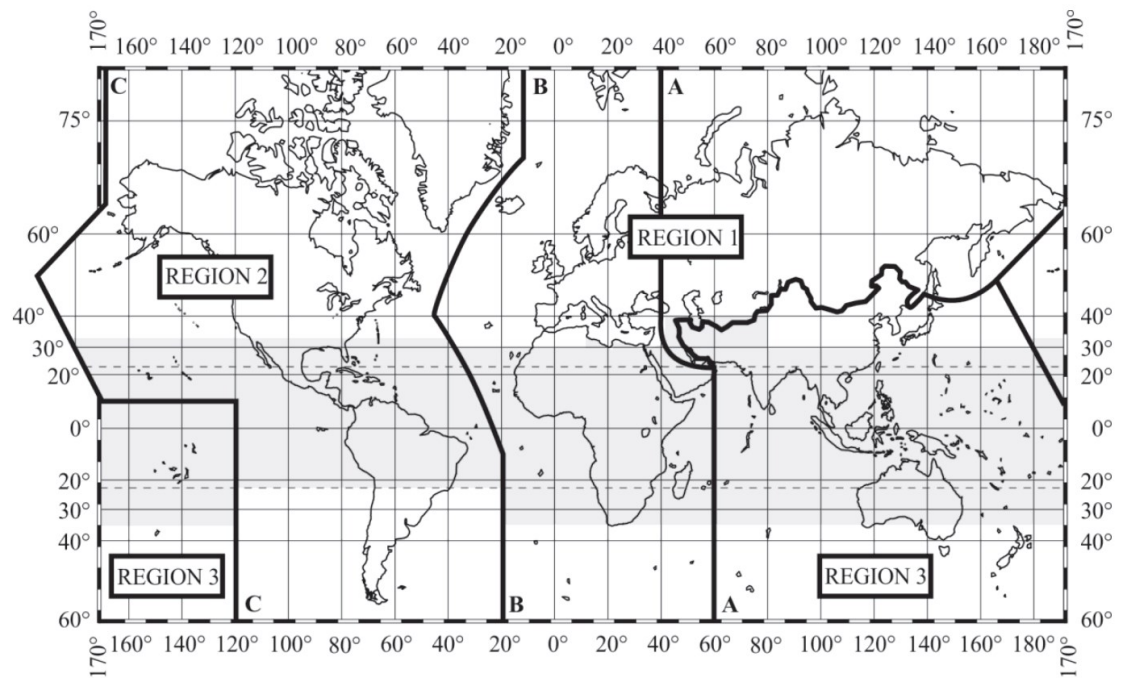


## Lähteet

1. Forsberg, Ari. 2007. Hammashoitokoneen langaton jalkaohjain. Opinnäytetyö. EVTEK-ammattikorkeakoulu.
2. IEC 60601-1. International Standard for Medical electrical equipment – Part 1: General requirements for basic safety and essential performance. Edition 3.2. 2020. Geneva: International Electrotechnical Commission.
3. IEC 80601-2-60. International Standard for Medical electrical equipment – Part 2-60: Particular requirements for the basic safety and essential performance of dental equipment. Edition 2.0. 2019. Geneva: International Electrotechnical Commission.
4. IEC 60601-1-2. International Standard for Medical electrical equipment – Part 1-2: General requirements for basic safety and essential performance – Collateral Standard: Electromagnetic disturbances – Requirements and tests. Edition 4.0. 2014. Geneva: International Electrotechnical Commission.
5. Räisänen & Lehto. 2011. Radiotekniikan perusteet. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press.
6. ITU. Radio Regulations. Edition of 2020. Geneva: International Telecommunications Union.
7. IEC 61000-4-3. International Standard for Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test. Edition 3.2. 2010. Geneva: International Electrotechnical Commission.
8. ETSI 300 220-2. Short Range Devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz; Part 2: Harmonised Standard for access to radio spectrum for non specific radio equipment. 2018. Ranska: European Telecommunications Standards Institute.
9. ETSI 300 328. Harmonised European Standard for Wideband transmission systems. 2019. Ranska: European Telecommunications Standards Institute.
10. Radiocommunications (Low Interference Potential Devices) Class Licence 2015. 2015. Australia: Australian Communications and Media Authority.

11. Specification for Data Communication Equipment operating in License-Exempt Frequency Bands. 2022. Saudi-Arabia: Communications & Information Technology Commission.
12. Class License for Short Range Devices (SRD). Version 3. 2018. Qatar: Communications Regulatory Authority.
13. State of Kuwait National Frequency Plan. Version 1/2017. 2017. Kuwait: Communication & Information Technology Regulatory Authority.
14. Radio Equipment Regulations 2017: Great Britain. Verkkoaineisto. <<https://www.gov.uk/government/publications/radio-equipment-regulations-2017/radio-equipment-regulations-2017-great-britain>>. Luettu 3.10.2022.
15. Code of Federal Regulations, Title 47, Part 15. Verkkoaineisto. FCC. <<https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-A/part-15>> Luettu 3.10.2022.
16. Transmitter Module Equipment Authorization Guide. 2022. Verkkoaineisto. FCC. <<https://apps.fcc.gov/eas/comments/GetPublishedDocument.html?id=50&tn=916170>>. Luettu 28.10.2022
17. Jalkaohjaimen esiselvitysraportti. 2020. Yrityksen sisäinen dokumentti. Planmeca Oy.
18. Bluetooth Core Specification 5.3. Verkkoaineisto. Bluetooth SIG. <[https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/Download-Doc.ashx?doc\\_id=521059](https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/Download-Doc.ashx?doc_id=521059)>. Luettu 01.11.2022.
19. Woolley, Martin. 2022. The Bluetooth Low Energy Primer. Verkkoaineisto. Bluetooth SIG. <[https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2022/05/Bluetooth\\_LE\\_Primer\\_Paper.pdf](https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2022/05/Bluetooth_LE_Primer_Paper.pdf)>. Luettu 01.11.2022.
20. Pozar, David M. 2012. Microwave Engineering. 4th edition. New York: John Wiley & Sons.
21. MC13213 järjestelmäpiirin datalehti. Verkkoaineisto. NXP Semiconductors. <<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MC1321x.pdf>>. Luettu 07.11.2022.
22. BGM220P radiomoduulin datalehti. Verkkoaineisto. Silicon Labs. <<https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/bgm220p-datasheet.pdf>>. Luettu 9.11.2022.

23. Kuvituskuva BlueNRG-M2 datalehdessä. Verkkoaineisto. STMicroelectronics. <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/bluenrg-m2.pdf>>. Luettu 14.11.2022
24. Qualification fees. Verkkoaineisto. Bluetooth SIG. <<https://www.bluetooth.com/develop-with-bluetooth/qualification-listing/qualification-listing-fees/>>. Luettu 14.11.2022.

**Liite 1: ITU radiotaajuuksien aluejaot sekä ISM-taajuudet**

Kuva 1. ITU:n taajuusalueiden jako kolmeen alueeseen [6, s. 35].

Taulukko 1. ISM-taajuusalueiden lupavapaus kansainvälisesti [6, s. 57, 63, 90].

<b>Taajuusalue</b>	<b>Lupavapaus</b>
6,765–6,795 MHz	Kansallisen erillishyväksynnän alainen
13,553–13,567 MHz	Vapaa koko maailmassa
26,957–27,283 MHz	
40,66–40,70 MHz	
433,05–434,79 MHz	Kansallisen erillishyväksynnän alainen, vapaa osalla ITU-alueesta 1
902–928 MHz	Vapaa ITU-alueella 2
2 400–2 500 MHz	Vapaa koko maailmassa
5 725–5 875 MHz	
24–24,25 GHz	
61–61,5 GHz	Kansallisen erillishyväksynnän alainen
122–123 GHz	
244–246 GHz	

## Liite 2: Kyselyn kriteerien selitteet

Kyselylomakkeen mukana oli kullekin kriteerille selitteet:

- Integroitavuus: Mahdollisuus siirtää ohjelmisto uudelle prosessorille? Löytyykö piirille valmiit koodikirjastot? Valittavan piirin yhteensopivuus aiemman konekannan kanssa? Onko prosessorin arkkitehtuurille preferenssiä?
- Mikrokontrollerin ominaisuudet: mm. nopeus, muistin määrä, minimi I/O:t, ADC-kanavat ja muut pakolliset vaatimukset. Ovatko nykyiset ominaisuudet minimivaatimus?
- Suunnittelutyön vaativuuden minimointi: Uuden piirityypin käyttöönoton hitaus. Kuinka paljon joudutaan opettelemaan uusia ominaisuuksia tai tekemään laajempia toiminnallisia muutoksia piirikortille? Esim. piirilevyantennin vaatimukset tulisi huomioida.
- Turvallisuus: mm. piirin tietoturva, eli voiko piiriä väärinkäyttämällä aiheuttaa vahinkoa laitteelle tai estää sen käyttöä. Potilasturvallisuus, mikäli ohjain toimii radiopiirin vikojen vuoksi epäodotetusti. Voiko radiopiiri synnyttää vikatilanteissa virheliikkeitä, esim. akkujen loppuessa tai EMC-häiriöistä johtuen?
- Toimintavarmuus ja käyttökokemus: paritusongelmien minimointi, radiohäiriöistä tai useamman ohjaimen konflikteista johtuen. ”Syvien lepotilojen” aiheuttama viive heräämiselle ja/tai mahdolliset yhteydenmuodostuksen viiveet käyttäjän komentojen välillä.
- Virrankulutuksen minimointi: piirin virrankulutus prosessorin ja RF-lähetysten osalta. Lähetystehojen ja toimintatilojen vaikutus akunkestoon. Tuki lepotilojen hyödyntämiseen ohjelmallisesti.
- Lähetystekniikka: soveltuuko esim. Bluetooth tai Zigbee jatkossakin haluttuun käyttöön? Riittääkö siruantenni vs. piirilevy- tai ulkoinen antenni. Järjestelmäpiiri vs. valmis radiomoduuli? Radiolaittehyväksyntöjen helppous? Tarvittu kantama ja siirtonopeus?
- Markkinoilla saattamisen kustannus ja nopeus: pääasiassa viranomaishyväksyntöjen hinta ja niiden aiheuttama viive, joihin vaikuttavat mm. käytettävä lähetystekniikka ja taajuusalue.

### Liite 3: Kyselyvastaukset

Taulukko 1. Kyselyvastaukset komponenttivalinnan kriteeristöstä, N = 21

Arvioitava kriteeri	Painoarvo (x/100)	Keski-hajonta	Virhe-marginaali	Keskiarvon 95 %:n luottamusväli (ala- ja yläraja)
Toimintavarmuus ja käyttökokemus	13,95	7,45	3,39	10,56–17,34
Saatavuus	12,71	6,29	2,86	9,85–15,57
Piirin arvioitu elinkaaren pituus	11,48	6,15	2,80	8,68–14,28
Vaihtoehtokomponenttien saatavuus	9,05	4,89	2,23	6,82–11,28
Vakiintunut lähetystekniikka	9,02	5,68	2,58	6,44–11,60
Virrankulutuksen minimointi	8,33	5,20	2,37	5,96–10,70
Markkinoille saattamisen kustannus ja nopeus	7,52	8,88	4,04	3,48–11,56
Integroitavuus ekosysteemiin	6,57	6,65	3,02	3,55–9,59
Turvallisuus radiopiirin osalta	6,38	3,94	1,79	4,59–8,17
Hinta	5,52	3,80	1,73	3,79–7,25
Mikrokontrollerin ominaisuudet	5,33	3,57	1,62	3,71–6,95
Suunnittelutyön vaativuuden minimointi	4,12	2,94	1,34	2,78–5,46

## Liite 4: Pisteytysperusteet kriteereittäin

Komponentille jaettiin pisteitä per valittu kriteeri alla olevin perustein.

### *Saatavuus*

- 5 p. jos saatavilla useammalta toimittajalta ja toimitusaika heti
- 4 p. jos useampi toimittaja ja toimitusaika kuukauden sisään
- 3 p. jos yksi toimittaja, mutta saatavuus hyvä (alle kuukauden) tai useampi toimittaja ja saatavuus alle 2kk
- 2 p. useampi toimittaja ja toimitusaika yli 2kk, mutta alle 1 vuosi tai yksi toimittaja ja toimitusaika 1–2 kk
- 1 p. komponentti on allokaatiossa ja toimitusaika on yli vuoden.

*Piirin arvioidusta elinkaaren pituudesta* komponentti sai maksimissaan viisi ja minimissään yhden pisteen. Pluspisteitä sai, jos komponentti oli:

- vakiintunut komponentti, ollut markkinoilla joitakin vuosia
- laajalti käytössä, useammalla yrityksellä
- valmistajan pitkän elinkaarilupauksen piirissä
- tunnetulta ja vastuulliseksi havaitulta valmistajalta
- valmistajalta, joka tarjoaa mahdollisuuden last time -ostoon komponentin valmistuksen lopettamisen yhteydessä
- osa laajempaa tuoteperhettä tai sen valmistajalla on useampi versio eri käyttötarkoituksiin
- teollisuuden tai autoteollisuuden tarkoitettu

Miinuspisteitä komponentti sai, jos se oli:

- uusi, julkaistu alle puoli vuotta sitten, eikä kuulu aiempaan tuoteperheeseen
- ollut markkinoilla jo 10 vuotta tai pidempään
- vanhaa teknologiasukupolvea (esimerkiksi vanha Bluetooth-versio)
- suunniteltu kuluttajaelektroniikkaa varten

*Vakiintuneesta lähetystekniikasta* komponentti sai maksimissaan viisi ja minimissään yhden pisteen. Pluspisteitä sai, jos komponentilla oli:

- useampi tuettu protokolla (piste per protokolla)



- globaalisti vapaa ISM-taajuus
- radioesihyväksyntä useammalle markkinalle
- integroitu antenni tai valmistajan referenssi- ja testit antennille tai valikoitu yhteensopiva komponenttiantenni
- määritelty rajapinta prosessorille ja valmiit koodikirjastot sekä radioprotokollapino

Miinus pisteitä komponentti sai, jos sillä oli:

- useampi kuin yksi radiotaajuusallokaatio maailmanlaajuisesti
- puuttuvat radiolaittehyväksynät jollain markkinalla
- puutteelliset antennisuositukset tai antennisuunnittelun tukimateriaalit
- puutteelliset koodikirjastot, kehitysympäristö tai radioprotokollapino

*Vaihtoehtokomponentin saatavuudesta* eli niin sanotusta second sourcesta pisteitä sai:

- 5 p. mikäli löytyi kaksi tai useampia vaihtoehtoja tai suoraan yhteensopiva korvaaja
- 3 p. mikäli löytyi yksi vaihtoehto, esimerkiksi saman tuoteperheen sisältä, ei nastakohtaista yhteensopivuusvaatimusta
- 1 p. jos toista vaihtoehtoa ei ollut ollenkaan

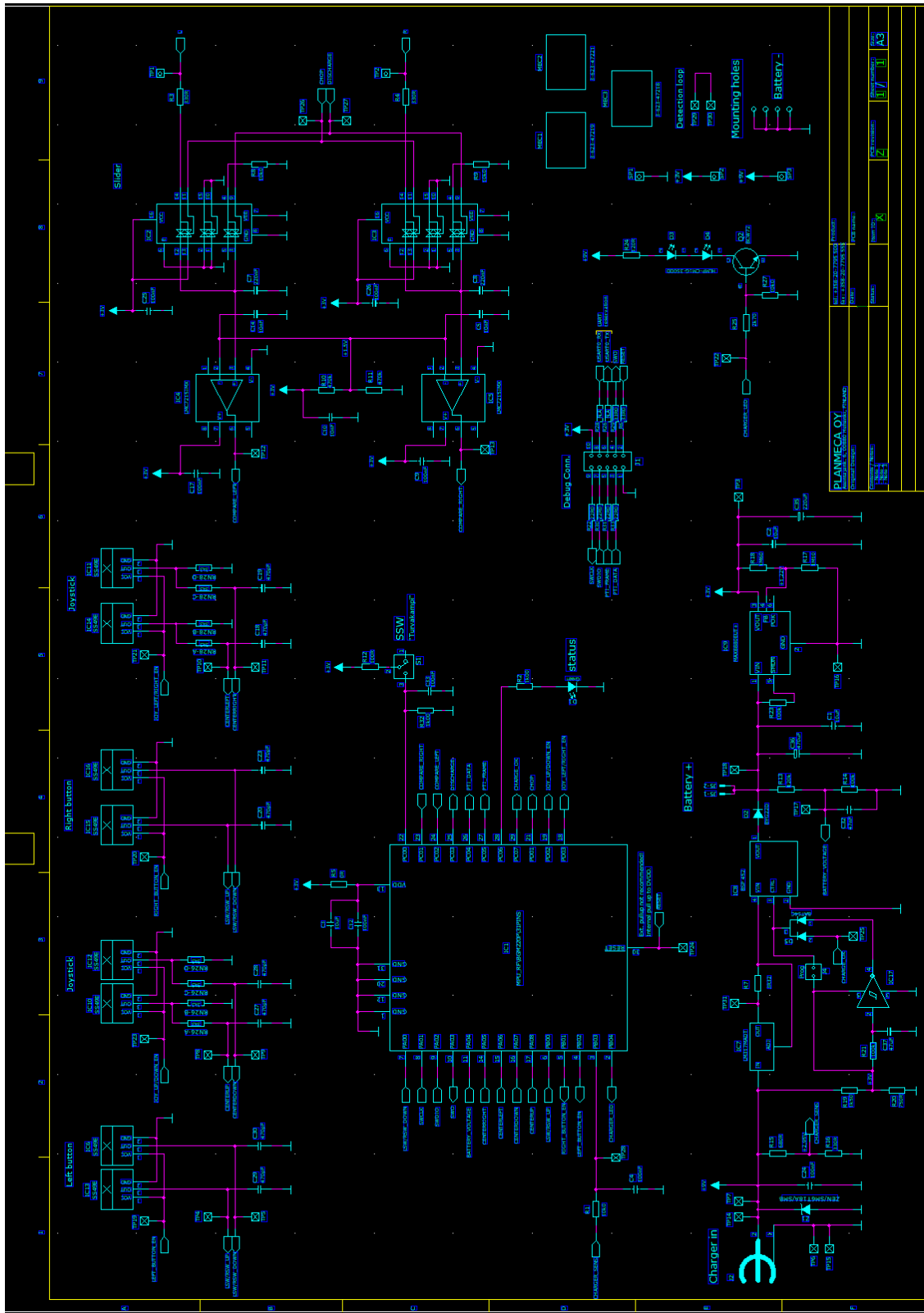
*Virrankulutuksen minimointi* perustui laskennalliseen käyttötapaukseen ja komponentille oli jaossa 5 p. pienimmästä virrankulutuksesta ja 1 p. suurimmasta virrankulutuksesta. Lopuille jaettiin pisteet lineaarisesti kahden ääripään väliltä.

## Liite 5: Ohjaimen elektroniikan signaalikartoitus

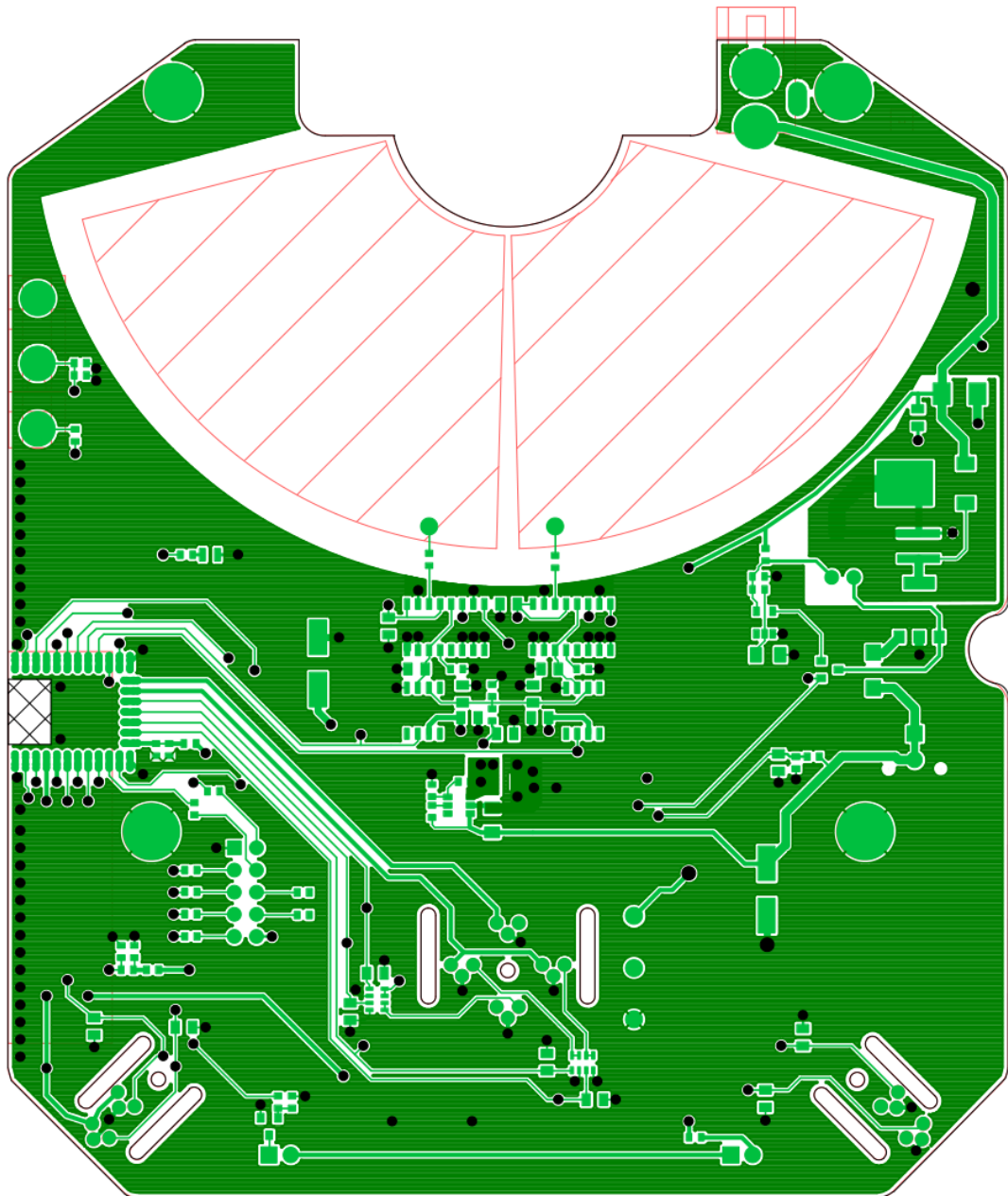
Taulukko 1. Jalkaohjaimen järjestelmäpiirille kytkettävät signaalit.

Tyyppi	Suunta	Käyttötarkoitus	Huomio
GND		GND	
VCC		+3 V	
GPIO	Lähtö	CHARGER_LED	Latausindikaattorit, LED
GPIO	Tulo	CHARGER_SENS	Laturin tunnistus
GPIO	Lähtö	RIGHT_BUTTON	Oik. painikkeen antureiden käyttöjännitteet
GPIO	Lähtö	LEFT_BUTTON	Vas. painikkeen antureiden käyttöjännitteet
AI	Tulo	LSW/RSW_UP	Vasemman ja oikean painikkeen tila
AI	Tulo	LSW/RSW_DOWN	Vasemman ja oikean painikkeen tila
AI	Tulo	BATTERY_VOLTAGE	Akkujen jännitemittaus
AI	Tulo	CENTERLEFT	Keskipainikkeen tila vasemmalla
AI	Tulo	CENTERRIGHT	Keskipainikkeen tila oikealla
AI	Tulo	CENTERDOWN	Keskipainikkeen tila ala-asennossa
AI	Tulo	CENTERUP	Keskipainikkeen tila yläasennossa
GPIO	Lähtö	JOY_LEFT/RIGHT	Keskipainikkeen antureiden käyttöjännitteet
GPIO	Lähtö	JOY_UP/DOWN	Keskipainikkeen antureiden käyttöjännitteet
PWM out	Lähtö	CHOP	800 kHz PWM-kanttialto ulos
GPIO	Tulo	INTERRUPT	Turvakammen tila, CPU keskeytys
Timer capture	Tulo	COMPARE_LEFT	Jalkavivun vasemman komparaattorin lähtö
Timer capture	Tulo	COMPARE_RIGHT	Jalkavivun oikean komparaattorin lähtö
GPIO	Lähtö	DISCHARGE	Näyteistyskondensaattorien tyhjennys
GPIO	Lähtö	STATUS LED	LED:n ohjaus, tilailmaisin
GPIO	Lähtö	CHARGE_OK	Latauksen ohjaus prosessorilta
GPIO	Tulo	RESETn	Prossessorin nollaus, sisäinen pull-up

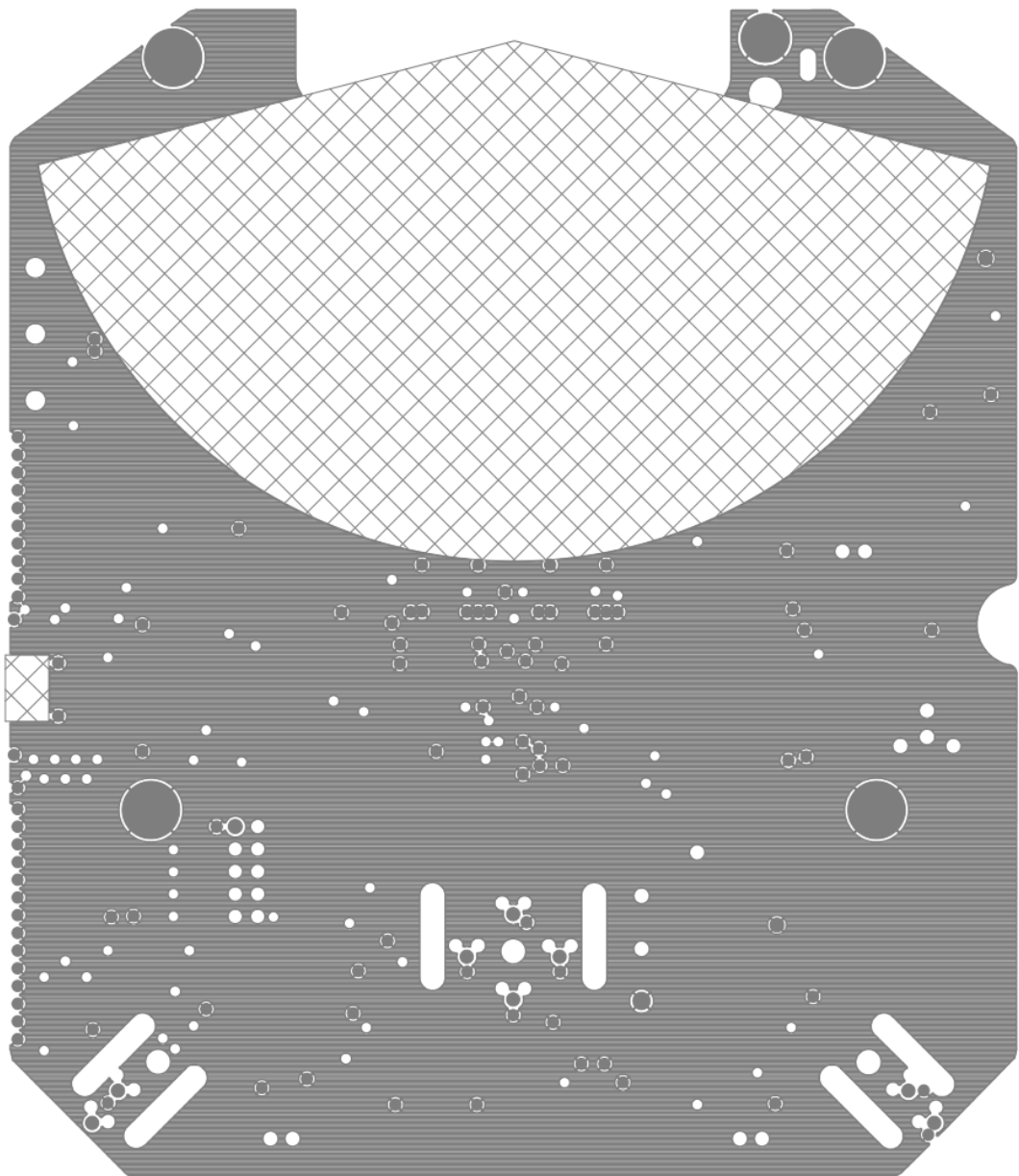
Liite 6: Piirikaavio ja piirilevyn kerroskuvat



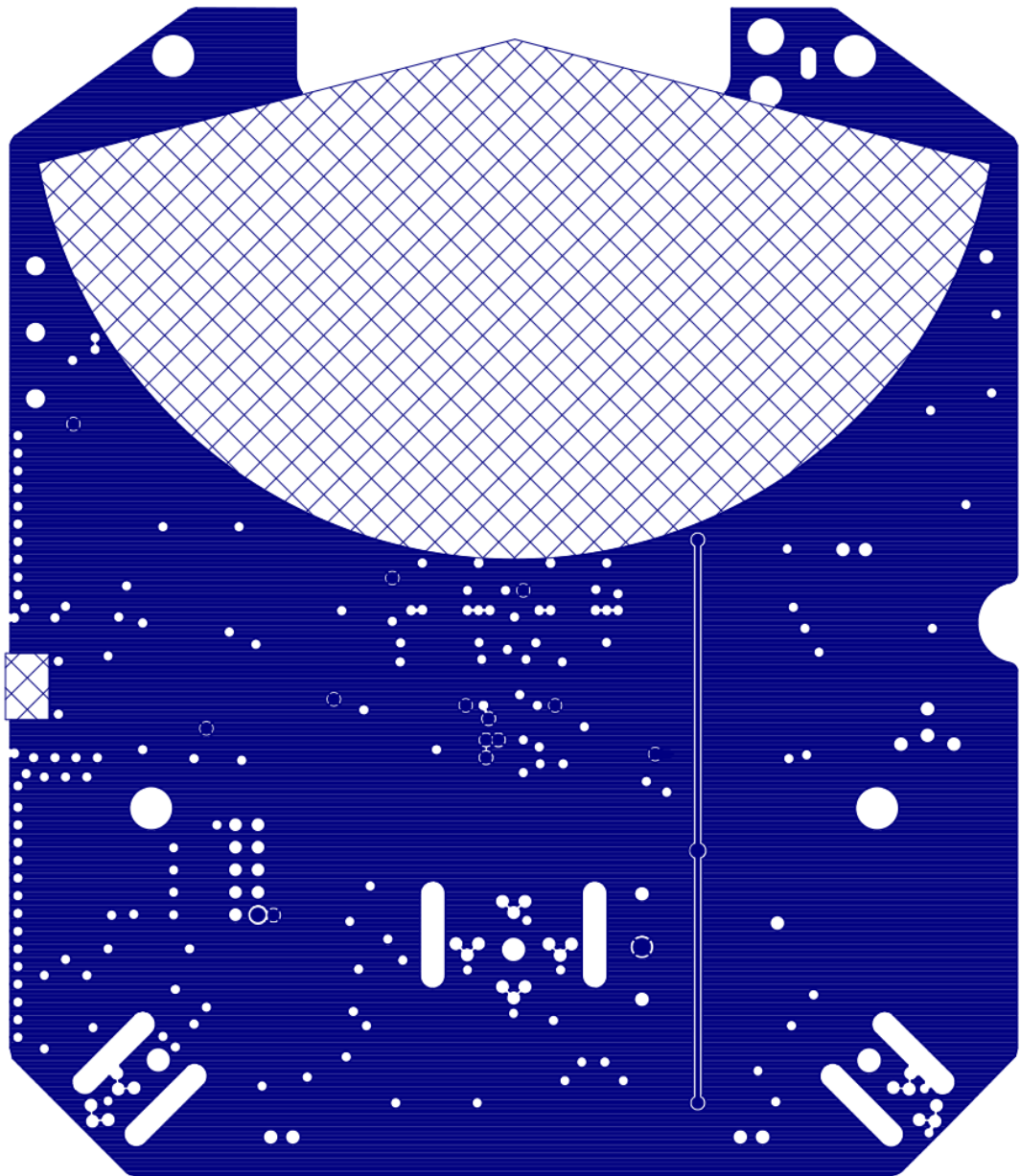
Kuva 1. Jalkaohjaimen uuden elektronikan piirikaavio



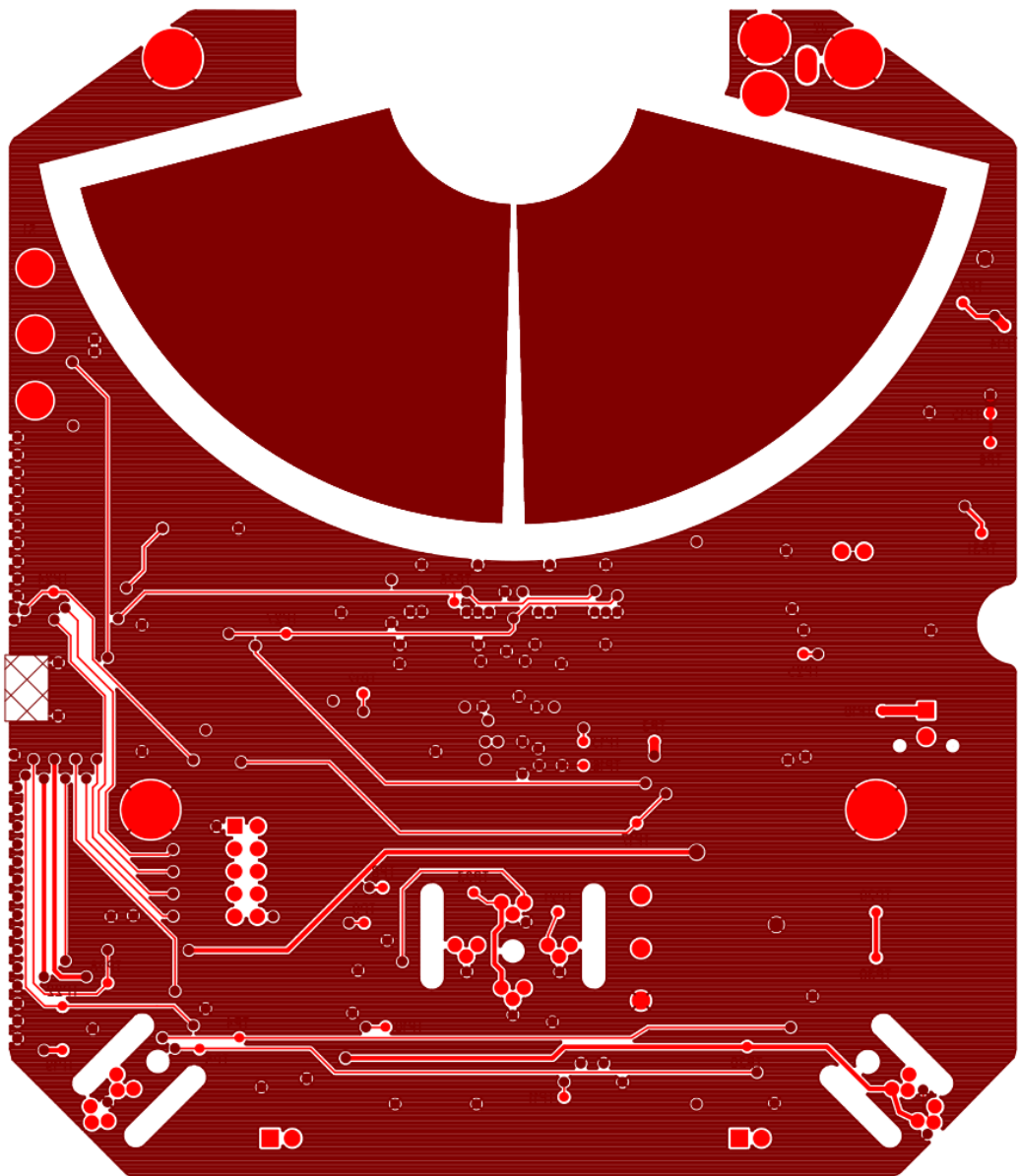
Kuva 2. Uuden piirilevyn päällimmäinen kerros.



Kuva 3. Uuden piirilevyn 1. sisäkerros, jossa on maataso.



Kuva 4. Uuden piirilevyn 2. sisäkerros, jossa käyttöjännitettä 3 V.



Kuva 5. Uuden piirilevyn pohjimmainen kerros, jossa on signaalien vetoja (kir-  
kas punainen) ja maatasoa (tummanpunainen). Lisäksi ylhäällä erilliset kapasi-  
tiivisen mittauksen sektorit.