

Tampereen ammattikorkeakoulu, ylempi amk-tutkinto  
Automaatiotekniikan koulutusohjelma  
Automaatiotekniikka  
Timo Kuisma

Opinnäytetyö

## **RFID-lämpötilamittausprototyypin toteutus**

Työn ohjaaja

lehtori Harri Joki

Työn tilaaja

4TS Corporation Oy, johtaja, tuotekehitys Arno Hietanen

Tekijä	Timo Kuisma
Työn nimi	RFID-lämpömittausprototyypin toteutus
Sivumäärä	81
Valmistumisaika	25.04.2010
Työn ohjaaja	lehtori Harri Joki
Työn tilaaja	4TS Corporation Oy

---

## TIIVISTELMÄ

Tässä työssä tutkittiin langatonta tiedonsiirtoa kohteesta vastaanottimeen käyttämällä UHF-alueella toimivaa 433MHz radiosignaalia tiedonsiirron välineenä. Työssä tutkittiin miten radiosignaali etenee erilaisten materiaalien läpi sekä sen kantomatkaa erilaisissa toimintaympäristöissä. Tämän lisäksi työssä tutkittiin kahden erilaisen antennimallin vaikutusta signaalin etenemiseen ja kantomatkaan. Antenneina käytettiin 16 cm:n pituisia piiska-antennia ja 433MHz:n taajuudella toimivaa tasoantennia.

Radiosignaalin etenemisen ja kantomatkan tutkimisessa käytettiin Texas Instrumentin ChipCon 1010 lähetin-vastaanotin -mikroprosessoripiirejä, jotka toimivat mittauksiin suunniteltujen tietoa lähettävien ja vastaanottavien piirilevykorttien ytimenä. Tietoa lähettävä nimettiin WMobSlave -piirilevykortiksi ja vastaanottava WMobMaster-piirilevykortiksi. WMobSlave-piirilevykortille suunniteltiin Sensirionin SHT11-lämpötila-anturi, jolla saatiin kerättyä mitattavana olevan ympäristön lämpötilaa lähetettäväksi radiosignaalilla WMobMaster-piirilevykortille. WMobMaster-kortille suunniteltiin lisäksi Wavecom228 GSM-GPRS-moduuli, jolla saatiin lämpötilatietoa siirrettyä langattomasti tekstiviestinä matkapuhelimeen. GPRS-implemointi jätettiin tämän työn ulkopuolelle. Työhön suunniteltiin lisäksi RS232-väylää lukeva käyttöliittymä, jolla siirrettiin lämpötilatietoa WMobMaster-kortilta langallisesti PC-tietokoneelle. Tutkimustyön nimeksi annettiin WMob (Wireless Mobile).

---

Writer	Timo Kuisma
Thesis:	Measure temperature using RFID
Pages	81
Graduation time	25.04.2010
Thesis Supervisor	lector Harri Joki
Co-operating Company	4TS Corporation Oy

---

## **ABSTRACT**

This thesis concerns wireless data transferring from the target to the receiver by using 433 MHz radiosignal which operates in UHF area as a mediator. In addition it was studied how the radio signal proceeds through different materials and its range within different environments. Also the effects of two different antenna models in signal proceeding and range was inquired. The antennas studied were 16 cm long whip antenna and a level antenna using 433 MHz frequency.

Proceeding of the radio signal and the range was studied by using Texas Instrument's CC1010 transceiver micro processor circles which were the core of the designed sending and receiving circuit board card. Sending circuit board was named WMobSlave and receiving circuit board was called WMobMaster. Sensiron SHT11 temperature sensor was designed in to the WMobSlave circuit board with which temperature data was collected and sent forward by radio signal to the WMobMaster circuit board. In addition Wavecom 228 GSM - GPRS module was designed in to the WMobMaster circuit board by which the temperature data was transferred wirelessly via text message to the mobile phone. GPRS implementation was left out from this study.

Furthermore user interface which reads RS 232 bus was designed by which the temperature data from WMobMaster circuit board was transferred via cable to the personal computer. The study was named WMob (Wireless Mobile).

---

Keywords EMC, CC1010, RFID, SPI, SemiBus (I2C)

## **Esipuhe**

Haluan kiittää 4TS Corporation Oy:tä mahdollisuudesta tehdä tämä työ sekä Tampereen ammattioppilaitosta yhteistyöstä Tampereen ammattikorkeakoulun kanssa.

Turengissa 25.04.2010

Timo Kuisma

## Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	1
2	Tutkimuksen taustaa.....	1
3	Elektroniikan laitesuunnittelu.....	4
	Komponenttien sijoittelu .....	5
	Ympäristöolosuhteet .....	5
	Kotelointi .....	5
3.1	EMC-yhteensopivuus.....	6
	EMC-standardit.....	7
3.2	EMC-mittauksista .....	7
	Säteilevän häiriön emisiomittaus.....	7
	Johtuvan häiriön emissiomittaus .....	8
	Staattisen sähkön purkauksen sieto .....	8
3.3	Laitteille suoritettavat mittaukset.....	8
	Häiriön eliminointi.....	9
	Materiaalit ja komponentit.....	9
	Kondensaattori EMC-komponenttina .....	10
	Kuristin (kela) EMC-komponenttina.....	11
4	Lämpösuunnittelu ja jäähdytysmenetelmät .....	11
4.1	Komponentin lämpösuunnittelu.....	11
	Lämpösuunnittelun vaatimukset ja standardit .....	12
	Termiset spesifikaatiot .....	12
	Virhelähteet .....	13
	Suunnittelumenetelmiä .....	13
4.2	jäähdyttämismenetelmät.....	14
	Pakotettu konvektio ja johtuminen.....	15
	Kotelot ja piirilevy.....	15
	Tuulettimet .....	17
	Jäähdytysmenetelmiä piirikorttitasolla .....	18
	Jäähdytysmenetelmiä komponenttitasolla .....	19
	Systeemitason lämpösuunnittelu .....	19

Teorian sovellutuksia käytännön lämpösuunnittelussa.....	20
Hakkurin kytkentätaajuuden vaikutus tehohäviöihin .....	21
Integroidun piirin piisirun eli IC:n kotelointi .....	23
Vesijäähdytys .....	24
4.2.1 Lämpösuunnittelun nyrkkisäännöt .....	24
5 Piirilevysuunnittelu .....	25
5.1 Piirilevymateriaalien jaottelu .....	26
5.2 Piirilevyjen rakenne .....	28
Yksipuolinen kuparointi yksikerrosrakenteessa .....	28
Kaksipuolinen kuparointi yksikerrosrakenteessa .....	28
Monikerrosrakenne.....	28
Läpiviennit.....	29
Piirilevyt RF-tekniikassa .....	29
Reikään asennettavat komponentit .....	29
Juottaminen.....	29
Aaltojuotos .....	30
Höyryfaasijuotos.....	30
Infrapunajuottaminen .....	30
Kuumahihnujuottaminen .....	30
Kuumailmajuottaminen .....	30
Digitaalipiirien maahäiriöt.....	31
Maahäiriön synty .....	31
Induktanssin pienentäminen .....	32
Käytännön suunnittelu.....	33
Silmukkasuunnittelu.....	34
6 WMob-piirilevysuunnittelu .....	35
WMobMaster -ja WMobSlave-piirilevyt .....	35
ChipCon 1010 lähetin-vastaanotinpiiri.....	38
7 RFID .....	39
Passiivinen tunniste .....	41
Aktiiviset tunnistet .....	41
Semipassiiviset tai semiaktiiviset tunnistet.....	42
7.1 RFID-tunnisteiden ominaisuudet .....	42
1-bittinen piiri.....	42
Muistit .....	43

Radiotaajuuden vaimeneminen.....	44
8 Tiedonsiirto .....	45
9 Langattoman tiedonsiirron tehostaminen .....	47
Kanavakoodattu tiedonsiirto .....	47
Linjakoodattu tiedonsiirto .....	47
9.1 Antennitekniikka .....	48
9.2 RFDI-tunnistuksen hyödyt .....	51
10 Yksityisyys ja tietoturva .....	52
Tekniikat yksityisyyden suojaamiseksi .....	52
Tunnisteen lopettaminen .....	52
11 WMob-käyttöliittymä suunnittelu .....	52
11.1 RS 232-rajapinta .....	53
RS 232-standardit .....	54
Datapaketti .....	54
Jännitteen muunnin .....	55
Kättelyt DCE ja DTE .....	55
Virheentarkistus .....	56
Sarjaportin nastajärjestys .....	56
11.2 SPI-ohjelmointirajapinta .....	58
11.3 SensorBus-tiedonsiirtoväylä .....	59
SHT11-lämpötila-anturirajapinta .....	59
11.4 GSM-viestit ja AT-komentojen rajapinta.....	62
12 WMob-järjestelmä .....	62
Tutkimuksessa käytetty radiotaajuus .....	64
CC1010-lähetin-vastaanotin-piirin tiedonsiirtomenetelmä.....	64
13 Tutkimuksen tulokset ja niiden analysointi .....	65
14 Pohdintaa .....	66
Lähteet.....	68
Liitteet .....	70

## Lyhenneluettelo

CFD	haaravirtaustekniikka (Computational Fluid Dynamics)
CLK	kaksisuuntainen linja tahdistusta varten (Serial Clock Line)
CMOS	kanavatransistoreihin perustuva mikropiiritekniikka (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
CRC	virheentarkistusalgoritmi (Cyclic Redundance Check)
DRC	virheentarkastus (Design Rule Checking)
dongle	puskuripiiri, joka muuttaa rinnakkaisportin sarjaportiksi
EMC	sähkömagneettinen säteily (Electromagnetic Compatibility)
ESD	kipinäpurkaus (Electrostatic discharge)
ERP	tuotannon suunnittelujärjestelmä (Enterprise Resource Planning)
ESR	tasa-arvoisten komponenttien sarjaresistanssi (Equivalent Series Resistance)
ETSI	Euroopan telealan standardisoimisjärjestö (European Telecommunications Standards Institute)
FR	palonkestävyys (Flame Retardent)
GPRS	pakettikytkennäinen tiedonsiirtojärjestelmä (General Packet Radio Service)
GSM	globaali järjestelmä matkapuhelimille (Global System for Mobile)
I2C	kaksijohtiminen tiedonsiirtoväylä (Inter-Integrated Circuit bus)
IC	integroitu piiri (Integrated Circuit)
IDE	integroitu kehitysympäristö (Integrated Development Environment)
IEC	kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (International Electrotechnical Commission)
IF	välitaajuus (Intermediate Frequency)
IP	suojausluokitus (International Protection)
ISI	digitaalisella siirtotiellä tapahtuva häiriö (Inter-Symbol Interference)
ISM	taajuusalue teolliseen, tieteelliseen ja lääketieteelliseen käyttöön (Industrial, Scientific and Medical)
LSI	Suuren porttimäärän digitaalipiiri (Large-Scaled Integrated)
MHz	miljoona sykliä sekunnissa (Megahertz)
MOSFET	kanavatransistori (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
NRZ	linjakoodaus (Non Return to Zero)
NRZI	linjakoodaus (Non-Return-to-Zero Inverted)
PLL	vaihelukittu silmukka (Phase-Locked Loop)



RF	radiotaajuus (Radio Frequency)
RFID	radiotaajuustunnistus (Radio Frequency Identification)
RoHS	säännös, jolla rajoitetaan tiettyjen haitallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa (The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment)
RS232	Yleinen sarjamoitosen datasiirron standardi (Recommended Standard 232)
RSSI	vastaanotetun signaalin vahvuus (Received Signal Strength Indication)
RZ	linjakoodaus (Return to Zero)
SDA	kaksisuuntainen linja tietoa varten (Serial Data Line)
SDCC	pienen laitteen c-kääntäjä (Small Device C Compiler)
SnPb	lyijyllisen tinan kemiallinen merkki
SMD	pintaliitoskomponentti (Surface Mounted Device)
SMS	lyhyen sanoman palvelu (Short Message Service)
SPI	kaksisuuntainen sykroninen tiedonsiirtoväylä (Serial Peripheral Interface)
SRAM	staattinen suorasaantimuisti (Static Random Access Memory)
UART	sarjaliikennepiiri (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)
UHF	ultra korkea taajuus (Ultra High Frequency)
UMTS	kolmannen sukupolven matkapuhelinverkko (Universal Mobile Telecommunications System)
VHF	hyvin korkea taajuus (Very High Frequency)
VLSI	laajamittainen integroitu digitaalipiiri (Very Large Scale Integration)
WCDMA	UMTS-verkoissa käytettävä radiorajapinta (Wideband Code Division Multiple Access)
WMob	Wireless Mobile

## 1 Johdanto

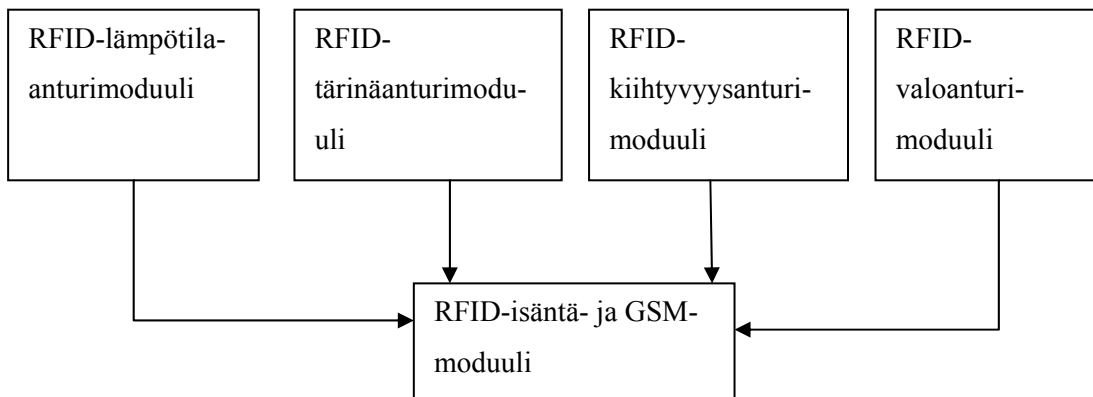
Langaton tiedonsiirtoteknologia on yleistynyt 2000-luvulla ja sen sovelluksia tullaan käyttämään yhä enemmän. Yksi kehittyneimmistä tiedonsiirtoteknologioista on radiotaajuustunnistus (Radio Frequency Identification, RFID). Teollisuudessa RFID-tunnisteilla tavaran seuraaminen helpottuu, tuotannonsuunnitteluprosessit tulevat tehokkaammiksi ja tavaraketjun hävikki saadaan minimoitua. Logistiikassa RFID-teknologiaa käytetään tavaroiden laadun ja koskemattomuuden turvaamiseksi käyttämällä erilaista tietoa mittaavia antureita RFID-teknologian kanssa. Voimme esimerkiksi lukea valoa, lämpötilaa, kosteutta ja tärinää antureilta ja lähettää niiltä kerätty tieto RFID:n välityksellä langattomasti eteenpäin. Esimerkiksi päivittäistavarakaupassa tuotteiden tunnistus tapahtuu tänä päivänä viivakoodien avulla, mutta tulevaisuudessa olisi RFID-tunnistuksen myötä mahdollista, että ostokset voisivat olla ostoskärryissä iman, että niitä tarvitsisi nostaa kassalinjalle. Tämä teknologia tekee kovasti tuloaan. Ainoana esteenä on, että tuotteisiin kiinitettävien yksittäisten passiivisten tunnistajien hinnat ovat vielä korkeat. RFID-teknologian tulo päivittäistavarakauppoihin voisi mahdollisesti vähentää esimerkiksi myymälävarkauksia, sillä kaupasta ulos kulku voitaisiin ohjata lukijalaitteen kautta. Edelleen lääketeollisuus ja sairaalat hyödyntävät RFID-tekniikkaa muun muassa lääkkeiden aitouden varmistamisessa. Sairaaloissa RFID-tunnisteeseen syötetään potilaan tiedot ja näin pystytään varmistamaan, että toimitaan oikean potilaan kanssa.

## 2 Tutkimuksen taustaa

Tähän työhön antoi sysäyksen tarve selvittää miten radiotaajuutta voitaisiin käyttää hyväksi logistiikan alalla kuljetettavan rahdin laadun ja turvallisuuden takaamisessa. Koska johdollinen tiedonsiirto ei logistiikan alalla voinut tulla kysymykseen, päädyttiin tutkimaan RFID-teknologian soveltuvuutta logistiikan konttien ja konteissa olevien tavaroiden turvallisuuden sekä laadun varmistuksessa. Samalla perehdyttiin RFID-teknologiaan syvemmin ja selvitettiin 433 MHz radiotaajuuden etenemistä erilaisten materiaalien läpi sekä taajuuden kantaman pituutta erilaisissa ympäristöissä.

Tämä tutkimus toteutettiin siksi, että konttien ja konteissa olevien tavaroiden lämpötilan mittaamiseen tarkoitettuja 433 MHz:n RFID-taajuudella toimivia tämän tutkimuskohteen mittaamiseen soveltuvia laitteistoja ei ollut saatavilla. Tähän tutkimukseen tarvittiin RFID-kytkettäviä laitteita, jotka keräävät tietoa yhdestä tai useammasta kohteesta samanaikaisesti. Tämä on mahdollista kytkemällä niin kutsuttuun isäntälaitteeseen yksi tai

useampia antureita esimerkiksi lämpötila-, värinä-, kiihtyvyyss- ja koskemattomuusanturimoduuleja, kuva 1.



Kuva 1. Usempi anturimoduuli on kytkettyneenä radiotaajuudella isäntämoduuliin.

### Tutkimuksen tavoite

Tämä opinnäytetyö keskittyi tutkimaan radiotaajuudella toimivan aktiivisen RFID-lähetin-vastaanotin-piirin toimintaa ja sen soveltuvuutta logististen kuljetusten turvallisuuden ja laaduntarkkailun välineenä. Tutkimus toteutettiin mittamaalla lämpötilatietoa (WMobSlave), joka lähetettiin radiosignaalina toiseen laitteeseen (WMobMaster). Master-kortille vastaanotettu tieto analysoitiin ja siitä tarkistettiin ylittyikö kortille ohjelmoitu ylin lämpöraja. Jos lämpötila asettui rajojen ulkopuolelle, siitä lähti langattomasti tieto SMS-tekstiviestillä kortille ohjelmoituun matkapuhelimen numeroon. Tämän työn tarkoituksena oli myös tutkia radiotaajuuden etenemistä erilaisten esteiden läpi sekä signaalin kantomatkaa erilaisissa ympäristöissä. Estemateriaaleiksi valittiin nahka, muovi, puu, alumiini, kangas ja betoni. Tutkimus tehtiin kolmessa erilaisessa ympäristössä: esteettömässä tilassa, toimistossa ja lastauslaiturilla.

Tutkimuksessa tarkasteltiin lisäksi miten erilaiset antennit vaikuttavat radiosignaalin kantomatkaan ja etenemiseen erilaisten esteiden läpi. Antenneina käytettiin piiska- ja tasoantenneja. Tutkimuksen ulkopuolelle rajattiin se miten RFID sopii tuotannon suunnittelujärjestelmä-sovellukseen (Enterprise Resource Planning, ERP) ja kuinka sitä voidaan soveltaa jo olemassa oleviin tuotannosuunnittelujärjestelmiin.

### Tutkimuksen toteutus

Tutkimuksen piirilevysuunnittelussa käytettiin siihen erityisesti kehitettyä PADS-piirilevysuunnitteluohjelmaa. Tutkimuksen toteuttamiseksi tarvittava RFID-lähdekoodi

tehtiin C-ohjelmointikielellä avoimen lähdekoodin CodeLite-ohjelmointiympäristössä. Koodin kääntäjänä käytettiin avoimen lähdekoodin pienten laitteiden C-kääntäjää (Small Device C Compiler, SDCC). Lähdekoodi toteutettiin Linux-käyttöjärjestelmässä. Käyttöliittymäohjelmointi puolestaan toteutettiin Windows Vista -käyttöjärjestelmässä Visual Studio 2008 -kehitysversiota käyttäen. WMobMaster-kortin ja PC-tietokoneen välinen langallinen yhteys muodostettiin RS232-sarjaväyläkaapelin avulla. Korttien ohjelmointiin käytettiin Texas Instrumentsin CC1010 integroitua kehitysympäristöä (Integrated Development Environment, IDE) ja rinnakkaisväylän tiedon muuttamisessa puskuriipiiriä (dongle), joka muuttaa rinnakkaisportin sarjaporttiväyläksi.

### **Aiempaa tutkimusta**

RFID:n hyödyntämistä logistiikan alueella on aiemmin tutkinut muun muassa Mikko Punakivi, joka yhdessä Valtion Teknillisen Tutkimuskeskuksen (VTT) ja Logistiikan osaamiskeskuksen kanssa toteutti RFTUNLOG-kehittämishankkeen. Hankkeen tutkimusaiheena oli RFID osana logistiikan kuljetusketjun hallintaa ja sen tavoitteena oli nostaa tietoisuutta automaattisesta kolli- ja tuotetunnistuksesta. Hankkeen pilotoinnissa käytettiin pakastettavia leipomotuotteita, kappaletavaraa, rautakauppatuotteita sekä tyhjiä muovilaatikoita. Leipomotuotteiden tunnistamisessa RFID:tä käytettiin lähinnä lavojen tunnistamisessa, joka nopeutti lavojen käsittelyaikaa huomattavasti. Aikaisemmin yhden lavan käsittelemiseen tarvittava aika oli ollut noin 2,5 minuuttia kun RFID-tunnistuksen jälkeen käsittelyyn käytettiin aikaa vain muutama sekunti. Samalla todettiin, että pakastetavaravarastossa olevat lavat pystyttiin tunnistamaan niiden päälle ker-tyneestä huurteesta ja jäästä huolimatta. Kappaletavaravirran osalta nesteiden ja metallien tunnistus todettiin haasteelliseksi niiden aiheuttamien mittaustulosten epätarkkuuksien vuoksi. Lisäksi tutkimuksessa huomattiin, että kollojen päällekkäisyydet ja katvealueet aiheuttivat heijastumia lukutapahtumiin. Hankkeessa todettiin myös, että RFID-teknologia ei vielä tuossa vaiheessa soveltunut tuotantokäyttöön sekalaisen kappaletavar-  
ran osalta.

Rautakauppatuotteissa törmättiin samankaltaisiin ongelmiin kuin kappaletavarankin osalta. Tämän lisäksi metallituotteet vaikeuttivat tunnistajien lukua. Muovilaatikat sen sijaan tunnistettiin 100 %:sti ja yksittäiset laatikkopinot tunnistettiin täydellisesti, tosin lisäämällä antennia ja optimoimalla niiden asentoa.

Hankkeessa tehtyjen testien perusteella kävi ilmi, että ”yleistunniste” ei sovellu kappale-letavaraliikenteen ja rautakaupan toiminta- ja tuoteympäristössä kaikille tuotteille. Todettiin myös, että parempaan lukuvarmuuteen pyrittäessä RFID-porttia tulisi optimoida kokeilemalla eri antennien suuntausvariaatioita, lisäämällä antennia sekä säätämällä lukijan tehoa. Tutkimuksessa havaittiin, että lisäämällä liiketunnistin porttiin voitiin eliminoida haamulukutapahtumia ja heijastuksia sekä varmistua tunnistettavan kollin kulkusuunnasta. Lisäksi havaittiin, että nesteille ja metalleille tarvitaan omat tunnistheet.

/1/

Edellä kuvattujen RFID-tunnisteiden lisäksi esimerkiksi elintarvikkeiden tai lääkkeiden lämpötilan seuraamisessa voidaan käyttää RFID-piirejä, joihin on integroitu mittavaan laitteen anturi. Näissä sovelluksissa on muun muassa lämpötila-anturilla varustettu puolipassiivisesti toimiva RFID-tunniste, jolla kerätään ympäristön lämpötilatietoa tiedostoon. Puolipassiiviset tunnistimet saavat yleensä osan käyttämästään energiasta lukijalaitteesta ja osan virtalähteestä, esimerkiksi paristolta, jonka käyttöaika voi olla jopa yli kolme vuotta. Muun muassa metallitynnyreiden lämpötilan ja kosteuden seuraamiseen voi käyttää aktiivista RFID-tunnistinta, joka toimii myös 433 Mhz:n taajuudella. Jos kerätyt tiedot ylittävät tai alittavat asetetut rajat, se tekee reaaliaikaisen hälytyksen lukijalaitteelle. Tämän tyyppisen aktiivisen tunnistimen toiminta-alue on yleensä noin 100 metriä ja sen akun käyttöaika on noin neljä vuotta. Edelleen, aktiiviseen UHF-alueella toimivaan tunnisteseen voidaan yhdistää liike-, lämpötila-, turvallisuus-, isku-, kosteus-, säteily- tai paineanturi. Tällöin anturi herättää tunnisteen kun ennalta asetetut edellytykset täyttyvät. Tämän tyyppiseen tunnisteseen mittaukset voidaan tallentaa piirin haihtumattomaan muistiin tai ulkoiselle flash-muistille, jos tukiasemaa tai lukijalaitetta ei ole käytettävissä.

### **3 Elektroniikan laitesuunnittelu**

Jotta tämä tutkimus pystyttiin toteuttamaan piti suunnitella RFID-taajuutta lähettävä ja vastaanottava laite. Tämä edellyttää elektroniikan laitesuunnittelua, joka käsittää komponenttien valinnan, elektroniikan suunnittelun, kytkentäkaavion piirtämistämisen, kytkentöjen simuloinnin, piirilevysuunnittelun, prototyyppien valmistuksen ja testauksen sekä osakokonaisuuksien testaamisen. Osakokonaisuuksien testaamista ja iterointia jatketaan niin kauan, kunnes laite voidaan vapauttaa tuotantoon. Laitesuunnittelussa huomioitavia asioita ovat piirilevyn koko, kotelointi ja komponenttien sijoittelu, ympäristö-

olosuhteet ja EMC-yhteensopivuus. Seuraavassa tarkastellaan lähemmin piirilevyn kokoa, komponenttien sijoittelua, ympäristöolosuhteita, kotelointia ja EMC-yhteensopivuutta.

### **Piirilevyn koko**

Piirilevyn mittojen tulee olla suhteelliset komponenttien määrään nähden. Sulautetussa järjestelmässä piirilevystä pyritään tekemään mahdollisimman pieni, esimerkiksi 40 mm \* 60 mm, mutta komponentteja ei kuitenkaan saa asentaa piirilevylle liian tiheään. Myös piirilevyn koko on suhteessa piirilevyn hintaan, eli mitä pienempi koko sen edullisempi ratkaisu on.

### **Komponenttien sijoittelu**

Komponenttien sijoittelussa piirilevylle pyritään mahdollisimman selkeisiin ryhmiin ja riveihin. Tällöin on otettava huomioon erityiset sähköturvallisuusvaatimukset ja sijoitettava ne komponentit, jotka voivat häiritä toisiaan, mahdollisimman kauas toisistaan. Voimakkaasti lämpenevät komponentit tulee sijoittaa erilleen niin, että ne eivät vahingoita muita kuumetessaan. Lisäksi niiden sijoittelussa piirilevylle tulee ottaa huomioon, että jäähdytyksessä olevat ilmavirtaukset kulkevat niiden editse.

### **Ympäristöolosuhteet**

Laitesuunnittelussa on tärkeää tietää missä olosuhteissa laitetta käytetään. On myös huomioitava sekin, että laitteet voivat sijoittua ympäristöön, jonka lämpötila vaihtelee 0 °C molemmin puolin. Lämpötilalla on merkitystä silloin kun suunnitellaan laitetta, jonka virtalähteenä toimii paristo. Pariston käyttöikä pienenee oleellisesti kylmissä olosuhteissa. Suunnittelussa on otettava huomion myös onko laite välittömässä kosketuksessa tai välillisesti alttiina kosteutta kerääville materiaaleille tai onko laite sijoitettu niin, että vesisade tai roiskevesi saattaa kastella laitteen. Kosteuden huomioon ottaminen laitesuunnittelussa on tärkeää laitteen toimivuuden kannalta.

### **Kotelointi**

Piirilevyn koteloinnissa on otettava huomioon sille sijoitettujen komponenttien standardien mukainen jäähdytystila. Jos suunniteltava laite tulee ympäristöön, jossa se joutuu alttiiksi kosteudelle, tulee kotelointi suunnitella veden pitäväksi. Veden pitävä kotelointi korostuu etenkin liittimien ulosvientien ja johdotusten suunnittelussa.

### 3.1 EMC-yhteensopivuus

Sähkölaitteelta edellytetään sen turvallisuuden, luotettavuuden ja huollettavuuden lisäksi moitteetonta toimintaa muiden laitteiden kanssa sille tarkoitetuissa toimintaympäristöissä. Häiriöttömän toiminnan takaa samaan käyttöympäristöön tarkoitettujen laitteiden sähkömagneettinen yhteensopivuus (Electromagnetic Compatibility, EMC). Sähkölaitte ei saa kohtuuttomasti lähettää ympäristöönsä häiriöitä, toisaalta, sen on siedettävä riittävässä määrin muualta tulleita häiriöitä. EMC-häiriöt etenevät joko säteilemällä tai johtamalla ja niitä voidaan muun muassa torjua pitämällä maaimpedanssit mahdollisimman pieninä ja käyttämällä yhtenäistä maatasoa sekä suojattuja kaapeleita tai kierrettyjä pareja johtimina. Lisäksi suojaamattomat signaalit, tulee suodattaa esimerkiksi lisäämällä suodatin kondensaattoreita.

#### EMC ja viranomaismääritykset

Jokaiseen elektroniikkalaitteeseen kohdistuu markkina-aluekohtaisia viranomaismääryksiä, normeja ja standardeja, jotta laitteet toimisivat kunnolla eri olosuhteissa. Laitteen käyttötarkoitus määrittelee standardit, jotka koskevat sitä ja etenkin sen turvallisuutta ja ympäristövaikutuksia. Näihin kuuluvat muun muassa meluun ja sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen (EMC) liittyvät seikat. EMC:lla varmistetaan eri valmistajien tuotteiden, kuten matkapuhelimien, televisioiden ja langattomien puhelimien toiminta rinnan ilman ongelmia. /3/ Euroopan unioni on julkaissut direktiivin 2004/108/EY sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta (EMC) 31.12.2004. EMC-direktiivi vaikuttaa merkittävästi elektroniikkatuotteisiin. Laitteiden turvallinen käyttö on peruslähtökohta. Sähkömagneettisesti yhteensopiva EMC-direktiivin täyttävä laite ei häiritse toiminnallaan muita normaaliin käyttöympäristöönsä kuuluvia ja EMC-direktiivin täyttäviä laitteita, eikä laite itse häiriinny ympäristön normaalista sähkömagneettisesta aktiviteetista eikä omasta toiminnastaan. /2/

Häiriölähteet jaetaan yleensä kahteen ryhmään: laaja- ja kapeakaistaisiin häiriölähteisiin. Kapeakaistaisia häiriölähteitä tuottavat mikroprosessorit, RF-generaattorit, lääkinlaitteet, ATK-laitteet, mikroaaltolaitteet, radio- ja tv-vastaanottimet ja lähettimet, hakuriteholähteet, ultraäänilaitteet sekä GSM- ja NMT-puhelimet. Laajakaistaisia häiriölähteitä ovat kytkimet, releet, kotitalouskoneet, sähköpurkauslamput, tehopuolijohteet, 2-johdinregulaattorit, sytytysjärjestelmät, ukkonen, koronapurkaukset, ydinräjähdys ja hitsauslaitteet. /3/

Laite, joka toimii sähköllä, voi häiritä muita laitteita tai häiriintyä itse ulkoisesta häiriöstä. Tietoliikennealalla tuotteilta vaaditaan EMC-yhteensopivuutta, koska laitteiden häiriötön toiminta on tärkeää. Vuoden 1996 alusta astui voimaan EC-direktiivi 89/336/EEC, jonka mukaan laitteiden valmistajien on tutustuttava EMC-standardeihin ja valmistettava tuotteensa niiden mukaisesti. /4/

### **EMC-standardit**

EMC-standardit voidaan jakaa kolmeen hierarkiaan. Ensimmäisenä on maailmanlaajuisen standardisoimisjärjestö IEC:n määrittämiin standardeihin. Euroopan tasolla EMC-standardeja laatii CENELEC. Kolmanneksi tulevat kansalliset standardisoimisjärjestöt, joita Suomessa edustaa SESKO. Tasojen välinen yhteistyö on järjestöjen välillä hyvin tiivistä. Suomessa sitoudutaan noudattamaan kotimaisessa standardisoinnissamme yhteisesti Euroopassa vahvistettuja standardeja. Euroopan maat noudattavat samoja CENELEC:n laatimia standardeja, jotka pohjautuvat suurelta osin IEC-standardeihin. Suomessa kansainvälisistä standardeista poikkeavia standardeja ei tehdä ja kansallisiksi standardeiksi otetaan soveltuvat EN-standardit varustettuna kansallisella kansilehdellä. /4/

### **3.2 EMC-mittauksista**

EMC-mittauksille, kuten muillekin tarkkuutta ja toistettavuutta vaativille mittauksille, on tehty omat mittaushjeet eli Basic-standardit, joiden mukaan mittausten tulee tapahtua. Jotta EMC-mittauksista on hyötyä, tulee niiden perustua johonkin standardiin. Jos yleisistä standardeista poiketaan, on hyvä kirjata mittaolosuhteet tarkoin muistiin. Tällöin tulosten tutkija saa selville, mitä mittaumenetelmää on käytetty ja pystyy suhteuttamaan saadut tulokset toisiin mittaustuloksiin. Hyvän dokumentoinnin avulla mitaukset voidaan myös tarvittaessa toistaa täsmälleen samanlaisina.

### **Säteilevän häiriön emisiomittaus**

Säteileviä häiriöitä pidetään ehkä kaikkein tärkeimpänä EMC-ominaisuutena, siksi EMC-testauksessa kannattaa yleensä alkaa niistä. EMC-testi on laitteen prototyypivaiheessa johtuvien häiriöiden ohella ensimmäinen mittaus, joka pystytään tekemään. Kun säteileviä häiriöitä saadaan kuriin, paranevat samalla laitteen häiriönsieto-ominaisuudet. /4/



## **Johtuvan häiriön emissiomittaus**

Etenkin hakkuriteholähteen sisältävissä laitteissa voivat tehojohtimien kautta johtuvat häiriöt olla suuria. Hakkurin aiheuttamat häiriöt ovat vaikeasti suodatettavissa, ellei alustavia mittauksia ja tarvittavia EMC-suojauksia ole tehty jo suunnitteluvaiheessa. Monesti ensimmäiseen prototyyppiin laitetaan reilusti paikkoja suotokomponenteille eli kondensaattoreille, jolloin laboratoriomittaukset sujuvat helpommin eikä EMC:n vuoksi tarvitse välttämättä tehdä muutoskierrosta tai muutoskierros rajoittuu vain ylimääräisten komponenttipaikkojen poistoon.

## **Staattisen sähköön purkauksen sieto**

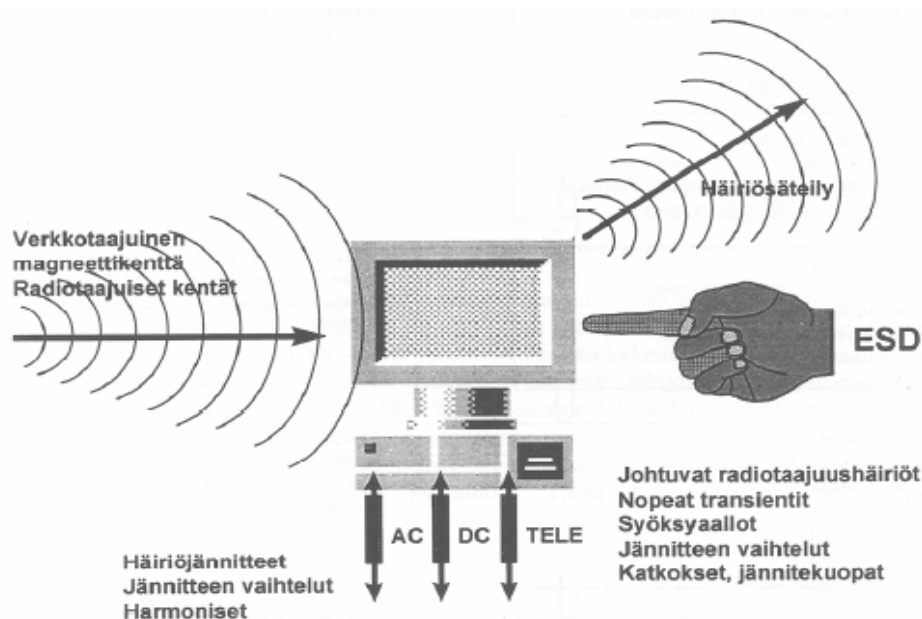
ESD eli staattisen sähköön purkaus syntyy esimerkiksi, kun ihminen menee tarpeeksi lähelle laitetta, joka on eri jännitepotentiaalissa kuin ihminen. Ihmisen koskettaessa laitetta tasautuu potentiaaliero virralla, joka voi kasvaa 100 ampeeriin (A). Tällöin purkausvirran reitin varrella oleviin silmukoihin voi indusoida häiritsevän suuri jännite. Joillekin komponenteille staattinen purkaus voi olla kyllin suuri hajoittamaan ne. Tällaisia ovat suuren sisäänmenoimpedanssin omaavat fet-transistorit. Nykyisin lähes kaikki herkäät fetit on suojattu diodeilla. Tämä ei kuitenkaan täysin poista rikkoutumisen vaaraa.

/4/

ESD-purkauksia on kolmenlaisia: kosketuspurkaus eli direct discharge, ilmapurkaus eli air discharge ja epäsuorapurkaus eli indirect discharge. Näistä ETSI vaatii testattavaksi kosketus- ja ilmapurkauksen. Koska kontaktipurkaus on toistettavampi kuin ilmapurkaus, sitä suositaan. Kaikki johtavat pinnat testataan kosketuspurkauksella ja ilmapurkausta käytetään johtamattomiin pintoihin.

### ***3.3 Laitteille suoritettavat mittaukset***

Laitteen toimivuutta normaalissa käyttöympäristössä (immunitaetti) ja sen ympäristöön-sä synnyttämiä sähkömagneettisia kenttiä ja virtoja (emissio) koskevat sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyvät määräykset. Mittauksin todennetaan useimmiten vaatimusten täyttäminen ja standardijulkaisuissa kuvataan mittaukset. Laitteen aiheuttamien kenttien ja virtojen voimakkuudet eivät saa ylittää annettuja raja-arvoja. Laitteen on myös siedettävä normaalissa käyttöympäristössä esiintyviä tyypillisiä sähkömagneettisia häiriöitä. /4/ Kuvassa 2 on esitetty laitteille suoritettavia mittauksia.



Kuva 2. Laitteille suoritettavat EMC-mittaukset. /4/

### Häiriön eliminointi

Häiriösuojauksessa on hyvä muistaa, että samalla kun laitteen tuottamia häiriöitä eli päästöjä eliminoidaan suojauksia lisäämällä, myös laitteen häiriönsieto-ominaisuudet paranevat. Päästöjä voidaan eliminoida ja siten sieto-ominaisuuksia kasvattaa muun muassa käyttämällä RF-tiivistä kotelointia, välttämällä kelluvia metalliosia, pitämällä maaimpedanssit mahdollisimman pieninä, käyttämällä yhtenäisiä maatasoja, välttämällä maasilmuksia ja johdottamalla suodatuskondensaattoreiden paikkojen kautta. Lisäksi voi käyttää hitaita pulssin nousuaikoja (piiriperheen valinta), pitää piirilevyllä jännite-tasoja, välttää yhteiset impedanssit tehonsyötössä, pitää suojattuja kaapeleita tai kierrettyjäpareja sekä pitää kaapeleiden vaipat molemmista päistä maadoitettuna. Audiotaa-juuksilla toisen pään voi maadoittaa suurten taajuuksien kannalta myös kapasitiivisesti, mutta jos se ei ole galvaanisesti mahdollista, voi pitää suojaamattomien johtojen signaa-lit suodatettuina. Edelleen päästöjä voidaan eliminoida liittämällä suojattujen kaapelei-den vaippojen liittimet runkoon 360 asteen mukaisesti ja pitämällä laitteen liittimet joi-hin liitytään suojaetuilla kaapeleilla kunnolla kiinni laitteen rungossa (360 astetta) sekä pitämällä kellovedot sovitettuina. /4/

### Materiaalit ja komponentit

Mikäli laitteen koteloa on tarkoitus käyttää EMC-suojana, tulee materiaalivalinnoissa ottaa tämä huomioon. Kotelon saumojen tulee olla radiotaajuuden (Radio Frequency, RF) kannalta tarpeeksi tiiviitä. Saumoissa vastinpintojen tulee olla tarpeeksi johtavia.

On hyvä ottaa huomioon, että kaikki metalliset pinnoitteet eivät ole johtavia ja että niiden ominaisuudet poikkeavat toisistaan melkoisesti. Esimerkiksi eloksoitu alumiini ei johda sähköä, kun taas keltapassivoitu pinta puolestaan vaatii usein melko suuren puristuksen johtaakseen kunnolla. /4/

Pelkkä yleismittarilla mitattu pintajohtavuus ei välttämättä kerro koko totuutta johtavuudesta, vaan johtavuus voi muuttua paljonkin taajuuden kasvaessa.

Erilaisia materiaaleja käytettäessä on suojaukseen käytettyjen materiaalien sähkökemiallinen yhteensopivuus tarkistettava. Ennen kuin laite on valmis markkinoille pitää vielä kerran miettiä laitteen käyttöympäristöä ja käytettyjä materiaaleja. Ei riitä, että mittaukset läpäistään kun laite on uusi, vaan ominaisuuksien tulisi säilyä mahdollisimman muuttumattomina laitteen koko eliniän. Jos toisissaan kiinni olevat materiaalit ovat sähkökemiallisesti kovin erilaisia, on vaarana, että toinen metalli hapettuu. Monesti vähäinkin oksidikerros pilaa kotelon suojausominaisuudet. Mikäli toisissaan kiinni olevien metallien sähkökemiallinen potentiaali poikkeaa yli 0,6 V, on toinen metalli joko vaihdettava tai sen pinnoittamista on harkittava. Myös kotelon maalaus on monesti vaihe, jossa viimeistään onnistutaan pilaamaan kotelon suojausominaisuudet. Maalauksessa tulee johtaviksi tarkoitetut pinnat suojata riittävän hyvin. /4/

### **Kondensaattori EMC-komponenttina**

Valittaessa kondensaattoreita suodatustarkoituksiin täytyy kapasitanssiarvon ja jännitekestävyyden lisäksi tarkastella myös suurtaajuusominaisuuksia. Pääsääntöisesti kondensaattorin impedanssi on sitä pienempi, mitä suurempi on taajuus. Käytössä olevilla komponenteilla näin ei kuitenkaan ole, vaan esimerkiksi kondensaattorin jalat toimivat induktansseina ja kondensaattorin sisältä löytyy induktanssia ja resistanssia (Equivalent Series Resistance, ESR). Induktanssien vuoksi kondensaattorilla on jokin resonanssitaajuus, jota korkeammilla taajuuksilla sen impedanssi alkaa nousta ja suodatusominaisuudet huonontua. Yleensä pintaliitoskondensaattorit ovat jalallisia parempia puuttuvien jalkojen vuoksi. Pintaliitoskondensaattoreiden pienempi koko johtaa yleensä parempiin suurtaajuusominaisuuksiin. /4/ Kondensaattorin datalehdistä yleensä selviää sen suurtaajuuskäyttäytyminen sekä ESR- ja impedanssiarvot ( $Z$ ).

### **Kuristin (kela) EMC-komponenttina**

Kuristimien ja muuntajien ollessa kyseessä on otettava huomioon, että niissä on resistanssia ja hajakapasitanssia. Resistanssi on ongelmallinen etenkin jos kelan läpi halutaan viedä suuria virtoja; tilaa kelan suurentamiselle ei yleensä ole. Hajakapasitanssi taas saa aikaan kelalle resonanssitaajuuden, jota suuremmilla taajuuksilla kelan impedanssi pienenee, vaikka sen pitäisi kasvaa. Jos ferriittisydämisen kuristimen läpi menee liian suuri virta, sydän saturoituu ja kuristimen impedanssi pienenee, jolloin suodatusominaisuudet ovat erilaiset pienellä ja suurella virralla. Tällaiset kuristimet tulisi mitoittaa niin, ettei maksimivirrallakaan jouduta lähelle saturaatiota. /4/

## **4 Lämpösuunnittelu ja jäähdytysmenetelmät**

Kaikki elektroniset laitteet synnyttävät käynnissä ollessaan lämpöä. Koska suuntaukse-  
na ovat yhä pienemmät komponentit, komponenttilevyt ja laitteet sekä suuremmat taajudet, kasvaa pinta-alaa kohden syntyvän lämmön määrä. Liiallinen lämpö lyhentää komponenttien elinikää ja korottaa kasvaneiden tehohäviöiden seurauksena laitteen käyttökustannuksia. Komponenttien lämpötilaan vaikuttavat ympäristön lämpötila ja komponentin oma lämpeneminen, eli häviötehot.

Lämpösuunnittelu voidaan määritellä prosessiksi, joka saa lähtötietoina häviötehoja, sallittuja maksimi- tai minimilämpötiloja, komponenttien rakennetietoja sekä tietoja asennusolosuhteista. Lämpöanalyysin tuloksena syntyy kuvaus laitteen termisestä toiminnasta tunnetulla mekaanisella rakenteella tai ehdotuksia mekaaniseksi rakenteeksi, jolla lämpöongelmat ovat hallittavissa. Käytännössä lämpösuunnittelu ei kuitenkaan ole näin selväpiirteistä. Laitteen termisellä toiminnalla tarkoitetaan muun muassa toiminta-lämpötiloja, lämpötilajakautumia, virtauskenttiä ja paine-eroja. /4/

### **4.1 Komponentin lämpösuunnittelu**

Komponentin lämpösuunnittelussa pyritään minimoimaan komponentissa syntyvät tehohäviöt ja tutkimaan lämmön johtamista komponentin kuumasta osasta, esimerkiksi mikropiiriin sirusta, komponentin ulkopintaan ja edelleen joko suoraan tai jäähdytyslevyn kautta jäähdyttävään aineeseen, esimerkiksi ilmaan ja veteen. Jäähdytyslevy voidaan suunnitella komponentin osaksi, kuten joissain tehovastuksissa, tai komponenttiin voidaan tehdä tasainen pinta jota vasten ulkoinen jäähdytyslevy kytketään joko ruuvi-

tai puristusliitoksella. Suunnittelija tutkii ja määrittelee komponentin toiminnan sen sallitulla lämpötila-alueella. Mikäli tarvitaan ulkoista jäähdytystä, määritellään tarvittavan jäähdytyslevyn koko tai tarvittava jäähdytysteho. /4/

### **Lämpösuunnittelun vaatimukset ja standardit**

Laitteiden lämpöteknisille ratkaisuille reunaehdoja asettavat yleiset laitestandardit ja IEC (International Electrical Commission)-standardit, jotka tietyillä markkina-alueilla on täytettävä. Tärkeimmät jäähdytyksen suunnittelua koskevat määräykset ovat kotelointiluokkavaatimukset, IP- ja IEC-luokat, sekä ilmastolliset olosuhdetekijät, esimerkiksi lämpötilaolosuhteet ja ilman laatuluokat, jotka laitteen tulee sietää. Yleisesti ottaen lähes kaikki sähköiset rajoitukset tavalla tai toisella vaikuttavat jäähdytysratkaisuun. Esimerkkinä tällaisista ovat EMC- ja ryömintävälirajoitukset, jotka määräävät järjestelmän rakenteellista sijoittelua ja materiaaleja. Tärkeimpiä vaatimuksia käytännössä ovat myös merkittävien asiakasryhmien toivomukset. Kilpailija-analyysin kautta voidaan ymmärtää, mille tasolle lämpösuunnittelu ja sen vaatimukset kussakin yrityksessä on asetettu. /4/

### **Termit spesifikaatiot**

Sallittujen ympäristöolosuhteiden määrittely on tehtävä niin aikaisessa vaiheessa konseptisuunnittelua kuin mahdollista. Nämä vaatimukset määräävät sallitun ympäristölämpötilan ja laitteen kotelointiluokkavaatimukset sekä toimivat lämpösuunnittelun lähtötietoina. Kaikkia komponentteja ei ole mahdollista ottaa huomioon lämpösuunnittelussa, vaan on valittava termisesti kriittiset komponentit, joihin on keskityttävä. Termisesti kriittiset komponentit ovat yleensä kalliita, toiminnallisesti tärkeitä tai erityisen lämpöherkkiä ja voivat siten laskea koko laitteen käyttöikä. Komponentin lämpötilaspesifikaatio on arvioitava tapauskohtaisesti, jolloin tyypillisesti määritellään esimerkiksi sallittu jatkuva maksimilämpötila, hetkellinen maksimilämpötila, lämpötilasyklin amplitudi ja ajallinen kesto tai vaikkapa maksimi lämpötilaero komponenttirakenteessa. Termisistä rajoista päätettäessä on myös otettava huomioon komponenttien laatuvarjo ja toleranssit. Ensimmäisen arvion termisistä rajoituksista saa komponenttivalmistajalta. Valmis laite tarvitsee myös karkean tason lämpöspesifikaatiot. Näillä tarkoitetaan asennusolosuhderajoituksia, joilla varmistetaan riittävä jäähdytyskapasiteetti tai esimerkiksi syklisen käyttötilanteen maksimikuormitukset. /4/

## **Virhelähteet**

Suunnittelijan on tiedostettava lämpösuunnittelussa esimerkiksi seuraavia virhelähteitä: Ensinnäkin maksimilämpötilaerojen laskenta ei voi olla tarkempaa, kuin mitä ovat lähtötiedoksi lasketut häviötehot. Häviöteholaskennan tarkkuuteen puolestaan vaikuttavat komponenttien laatuajonta, osittain tuntemattomat materiaaliominaisuudet, virran ja jännitteen käyrämuodot sekä suunnittelun alkuvaiheessa kaikilta osin puutteelliset tiedot, kuten keskeneräiset komponenttivalinnat. Toiseksi materiaalien lämpötekniisiä ominaisuuksia ei aina tunneta kovinkaan tarkasti. Esimerkiksi ruiskupuristetuilla muoviosilla lämmönjohtavuus voi poiketa useita kymmeniä prosentteja raaka-ainetoimittajan laboratoriossa mittaamista arvoista. Kolmanneksi ikääntyminen voi vaikuttaa merkittävästi juotos- ja lämpörasvaliitoksiin. Neljänneksi on huomioitava, että pintojen optiset ominaisuudet voivat muuttua merkittävästi käyttöiän aikana. Tunnettu esimerkki on puhtaiden metallipintojen oksidoituminen. Suurinpana ongelma virtauksen mallintamisessa on turbulenttisuus ja sen aiheuttama epävarmuus konvektiivisen lämmönsiirron ja kitkan laskemisessa. Laminaarivirtauksen transitio turbulenttiseksi on erittäin tärkeä ilmiö, mutta sitä ei toistaiseksi kyetä ennustamaan kovinkaan tarkasti. Virtausilmiöiden hyvä ymmärtäminen on perustana konvektion laskennassa. Suunnittelutyökalujen laadulla ja monipuolisuudella on lämpösuunnittelun laatua ja tulosten käyttökelpoisuutta ajatellen pienempi merkitys kuin suunnittelijan ammattitaidolla. Monipuolisella elektronikan jäähdytyslaskentaan tarkoitettulla haaravirtaustekniikkaohjelmalla (Computational Fluid Dynamics, CFD) voidaan laskea yksinkertaisia tapauksia melko vähillä taustatiedoilla. Laskentamallin ja -tulosten laadun arvioiminen sekä optimointitehtävän suorittaminen ovat vaativampia toimenpiteitä, koska silloin on tunnettava sekä mallinnettavat ilmiöt että laskentamallin ominaisuudet. Käytännössä on erittäin harvoin aikaa tehdä huolellisia lämpömittauksia, jossa voidaan todeta lämpöläskentatulosten vastavuus. /4/

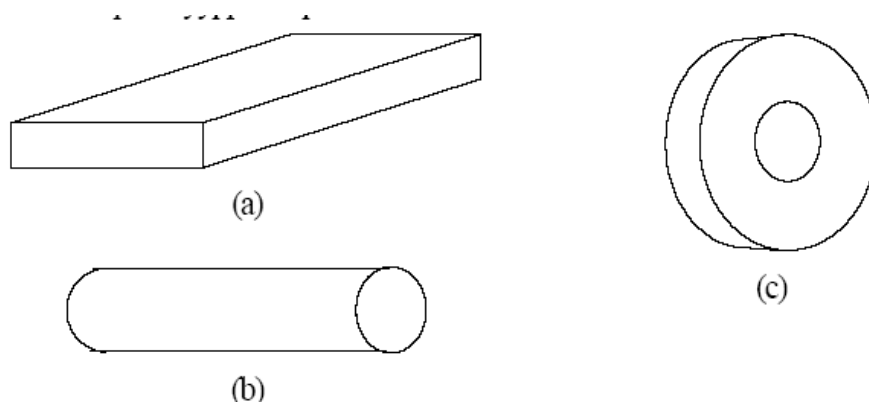
## **Suunnittelumenetelmiä**

Onnistuneita lämpötekniisiä ratkaisuja on mahdollista tehdä, jos suunnittelija ymmärtää lämmönsiirtymismekanismien ja osaa arvioida niiden suuruusluokat kyseisessä suunnittelutilanteessa. Laadukasta lämpösuunnittelua voi siis tehdä pelkän intuition varassa laskematta yhtään lämpötilaa. Lämpövirtojen suuruusluokkia arvioidessa tarvitaan kuitenkin yleensä kokemusta.

## 4.2 jäädyttämismenetelmät

Jäähdytyksen suunnittelussa on otettava tarkasti huomioon jäähdytettävän laitteen käyttöympäristö. Varsinkin ulkotiloissa käytettävien laitteiden tapauksessa on jäähdytysmenetelmän valinnassa oltava tarkkana. Huomioon otettavia seikkoja ovat muun muassa käyttöympäristön lämpötila, sen likaisuus ja pölyisyys, tarvitaanko suljettua vesijäähdytystä vai riittääkö avoin vesikierto. Laitteen toimintajakso eli se osa kokonaisuudesta, jolloin laite on päällä, on myös otettava huomioon jäähdytyksen suunnittelussa. Jos laitteen toimintajakso on alhainen, on laitteessa lämmöksi muuttuva häviöteho pienempi kuin laitteen nimellinen häviöteho. Esimerkiksi nimelliseltä häviöteholtaan 5 W oleva transistori kuluttaa ainoastaan 2 W tehoa, kun se on aktiivinen ainoastaan 40 % kokonaisuudesta. Kuitenkin on muistettava, että mitoituksellisesti on tärkeintä saada tieto siitä, saavuttaako komponentti toimintajakson aikana tasapainotilaa vastaavan käyttölämpötilan vai ei. Sähkö- ja elektroniikkalaitteiden jäähdytysmenetelmät vaihtelevat laajasti riippuen sovelluksesta. Esimerkiksi lentokone-elektroniikan jäähdytykseen käytetään yleisesti pakotettua konvektiota, jolloin jäähdytysaineena on kompressorin tuottaman paineilma. Koska kompressorista lähtevä paineilma on kuumaa, on se ensin jäähdytettävä kierrättämällä ilma turbiinin lävitse. Myös jäähdytysilmassa oleva kosteus poistetaan ennen kuin se johdetaan elektroniikkalaitteisiin. Useasti kosteudenpoisto ei ole riittävän tehokasta, jolloin jäähdytysilma ohjataan kulkemaan laitteen rivoitetun jäähdytys-elementin kautta eikä jäähdytysilma ole siten suorassa kosketuksessa itse jäähdytettävän laitteen kanssa.

Jäähdytyslevyissä käytettäviä ripoja on monenlaisia. Yleisesti voidaan sanoa, että ripoja on kolmea perustyyppiä: lautasmaista, sauvamaista ja radiaalista. Kuvassa 3 on esitetty kolme eri perustyyppistä ripaa.

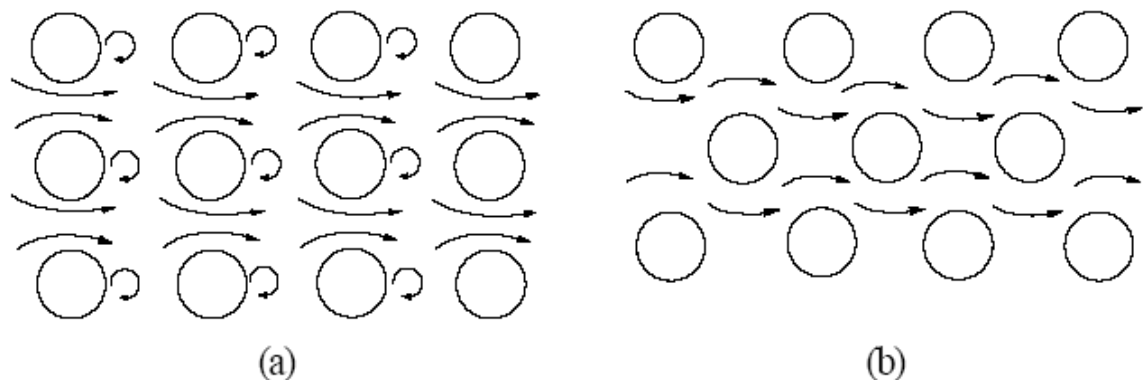


Kuva 3. Ripojen perustyyppit. Levymäinen ripa (a). Sauvamainen ripa (b). Radiaalinen (c). /4/

Ripa pyritään optimoimaan siten että saavutetaan maksimaalinen lämmönvirtaus kotelon seinästä rivan kärkeen. Maksimaalinen viilennys saavutaan silloin kun seinän lämpötila on sama kuin rivan lämpötila. Tämä toteutuu kuitenkin ideaalitapauksissa ja rivalle määrätäänkin usein ripahyötysuhde, hf. Ripahyötysuhde määritellään rivan siirtämän lämmön suhteena lämpöön, joka olisi siirtynyt siinä tapauksessa, että koko ripa olisi ollut kotelon seinän lämpötilassa. /4/

### Pakotettu konvektio ja johtuminen

Pakotettua konvektiota voidaan käyttää hyväksi jäähdytyslevyjen jäähdytysvaikutuksen tehostamisessa. Tällöin rivan muoto ja puhaltimen puhallusnopeus vaikuttavat suuresti viilennyksen tehokkuuteen. Kun rivan muoto ja puhallusnopeus valitaan oikein virtaus ripojen välissä. Helposti voidaan ajatella, että kun puhallusta kasvattessa viilennystehokkuus nousee. Tämä ei kuitenkaan välttämättä toteudu. Mikäli puhallusnopeus on liian suuri tietynlaisia ripoja käytettäessä, kulkee virtaus ripojen yli sillä seurauksella, että viilennystehokkuutta menetetään. Myös ripojen asettelulla on merkitystä. Kuvassa 4 on esitetty kaksi tapausta, joissa ripojen määrä ja laatu poikkeavat toisistaan vain hieman. Kuitenkin asettelemalla rivat joko lomittain tai suoriin jonoihin, voidaan saavuttaa huomattavan erilainen virtausympäristö. /4/



Kuva 4. Esimerkki pakotetusta konvektiosta jäähdytyslevyjen ripojen välissä. Kuvassa (a) rivat on asetettu tasaisesti. Kuvassa (b) rivat on asetettu lomittain. Kuvien virtaukset on yksinkertaistettu, ja ne eivät välttämättä edusta todellisuutta. Kuvan tarkoitus on havainnollistaa kuinka suuresti virtaus voi näennäisesti pienen asian vaikutuksesta muuttua. /4/

### Kotelot ja piirilevy

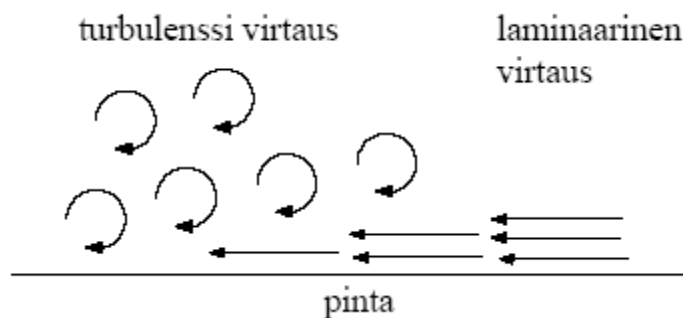
Koteloissa konvektio saadaan aikaiseksi yksinkertaisesti tekemällä koteloihin reikiä. Jos tuuletinta ei käytetä on kyseessä vapaa konvektio. Mikäli tuuletinta käytetään on kyseessä pakotettu konvektio jolloin tuulettimen käytöllä saadaan aikaan niin sanottu kineetti-



nen paine. Mitä suurempi kineettinen paine on, sitä parempi on lämmön konvektio. Muuttamalla kotelon tilavuutta voidaan jossain kohtaa koteloa saada kyseiseen kohtaan suurempi virtaus. Tällöin siis lämmönsiirto tehostuu paikallisesti. On kuitenkin huomattava, että painehäviöt kasvavat virtausnopeuden neliössä, joka puolestaan tarkoittaa, että suuren kineettisen paineen synnyttäminen vaatii tehokkaan tuulettimen. /4/

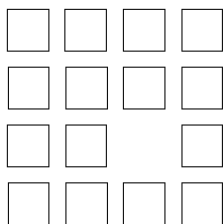
Kotelon sisällä oleva piirilevy halutaan usein jäähdyttää konvektiota hyväksikäyttäen. Kuvassa 5 on esimerkki pinnalla syntyvästä laminaarisesta ja turbulenssivirrasta. Aluksi virtaus on laminaarista ja jonkin ajan kuluttua virta muuttuu turbulenssiksi. Turbulenssivirta syntyy pinnan karkeuden johdosta. Mitä karkeampi pinta on, sitä aikaisemmin turbulenssi syntyy. /4/

Piirilevyn pinnan yli kulkevan virtauksen lämmönsiirtotehokkuus voidaan määrittää analyttisesti, mikäli virtaus on laminaarista. Usein kuitenkin virta on turbulenssissa ja silloin parempaan lopputulokseen päästään empiirisillä analyyseillä.



Kuva 5. Virtaus pinnalla. Laminaarinen virtaus muuttuu turbulenssivirtaukseksi. /4/

Kuvassa 6 on esitetty piirilevy, jolla on komponentteja tasavälein. Kun piirilevyltä poistetaan yksi komponentti, saadaan viereisten komponenttien lämpötila laskemaan huomattavasti. Kyseisessä esimerkissä saavutettiin n. 40 % parannus viereisten komponenttien lämmönsiirtokertoimeen. /4/



Kuva 6. Piirilevy, jonka komponentit ovat tasavälein asetettuja ja piirilevystä on poistettu yksi komponentti. /4/

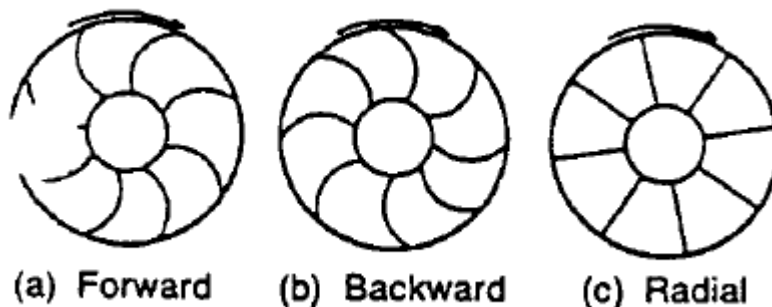
## Tuulettimet

Sentrifuugituulettimet:

Forward curved-tuuletin kuva 7 (a), missä ilman virtaus kiihtyy kotelossa nopeammaksi kuin pyörimisnopeus. Voidaan myös sanoa, että tuuletin on tehokas pienillä pyörimisnopeuksilla ja epästabiili ilman koteloa. Tuulettimen koko on pieni ja hinnaltaan edullinen. Forward curved-tuuletin saa sentrifuugituulettimista suurimman ilmanvirtausnopeuden. /4/

Backward curved-tuuletin kuva 7 (b) ei ole niin tehokas kuin forward curved-tuuletin, mutta se toimii ilman koteloa. Tuulettimen koko on suuri ja se on haasteellinen suunnittelun näkökulmasta. /4/

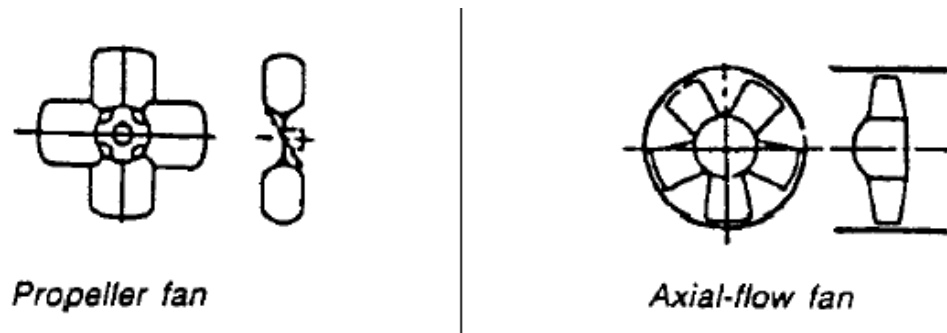
Radial bladed-tuuletin kuva 7 (c) on harvemmin käytetty tuuletin. Sen tehokkuus on kahden edellä mainitun tuulettimen välillä ja tyypillisesti sillä on 6-16 siipeä. /4/



Kuva 6. Kuva 7 (a) forward curved-, 7 (b) backward curved- ja 7 (c) Radial bladed-tuulettimet /4/

Aksiaalinen propellituuletin kuva 8 (a) on halvin tuuletin matalapaineisiin sovelluksiin. Aksiaalituuletin ei sovellu korkeapaineisiin käyttötarkoituksiin ja staattinen hyötysuhde jää alle 50 prosentin (40 – 45 %). Alhaisen tehontarpeen vuoksi se soveltuu kannettaviin tietokoneisiin. /4/

Aksiaalivirtaustuuletin kuva 8 (b) on yleisin käytetty tuuletin elektronisissa laitteissa koska sillä on hyvä hyötysuhde ja se soveltuu korkeapaineisiin sovelluksiin. Tuuletin on hiljainen, sillä se pyörii putken sisällä.



Kuva 8 (a) aksiaalinen propellituuletin ja kuva 8 (b) aksiaalivirtaustuuletin /4/

### Jäähdytysmenetelmiä piirikorttitasolla

Elektroniikka on yleensä lämpötilaherkkää, joten suuri kuumuus tai kylmyys saattaa heikentää elektroniikkatuotteen luotettavuutta. Ideaalisena lämpötila-alueena elektroniikan toiminnalle pidetään yleisesti noin  $-5 \pm 65 \text{ }^\circ\text{C}$ . Elektroniikkalaitteen toimiessa jatkuvasti ideaalisen lämpötila-alueen ylä- tai alapuolella alkavat kokoonpanon ja itse laitteen luotettavuus kärsiä. Puhuttaessa matalan lämpötilan juotteiden (esimerkiksi yleisimmin käytetty lyijyllinen tina, SnPb) käyttölämpötilojen noustessa yli  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  alkavat juotteen mekaaniset ominaisuudet heiketä. Väsyminen ja viruminen nousevat merkittäviksi luotettavuusriskeiksi. Piirikortilla, jossa liitostiheys on pieni, riittää jäähdytykseen yleensä vapaa konvektio. Komponenttien asetteluun ja jäähdytykseen ei tällöin tarvitse kiinnittää paljon huomiota. Pakkaustiheydet ovat nykyään kuitenkin suuria ja komponenttien tehokkuudet ovat myös kasvaneet. Lämpö täytyy saada tehokkaasti poistumaan komponenteista ja piirilevyltä. Lämmön poistamiseen passiivisesti piirilevytasolla käytetään usein piirilevyn ja komponentin välissä olevaa alumiini- tai kuparikerrosta tai nauhaa, jonka avulla lämpö kulkeutuu johtamalla kohti piirilevyn reunoja, jotka voivat olla kiinni jäähdytyslevyssä. Täytyy kuitenkin varoa, ettei kuumista komponenteista siirtyvä lämpö pääse vaurioittamaan herkempiä komponentteja. Vaikka komponentti ei välttämättä vielä vaurioidu, voi liian suuri kuumuus vaikuttaa sen toimintaan haitallisesti. Piirilevyyn voidaan upottaa myös vain lämmönsiirtoa parantavia ylimääräisiä kuparikerroksia. Säteilylämmönsiirtoa voidaan tehostaa käyttämällä piirilevymateriaalia, jonka emissiviteetti on mahdollisimman suuri. Lämmönsiirtoa voidaan parantaa myös termisillä rasvoilla./4/

### **Jäähdytysmenetelmiä komponenttitasolla**

Eräät tehokomponentit tuottavat enemmän lämpöä kuin mitä ne voivat haihduttaa itse pois. Suurimpiin komponentteihin kiinnitetään usein jäähdytysriipa lisäämään lämpöä haihduttavaa pintaa. Lämpö johtuu rivan haarakkeisiin, joista se konvektion tai säteilyn avulla siirtyy ympäröivään ilmaan. Komponentin suurin lämpötila syntyy piisiruun. Puolijohdeliitoksen lämpötila on kriittinen komponentin sähköisen toiminnan kannalta, joten lämpö olisi saatava tehokkaasti johdettua pois piisirusta. Komponentin materiaalien tulisi olla mahdollisimman hyvin lämpöä johtavia. Uusissa komponenttien kapselointipolymeereissä lämmönjohtavuus on parantunut  $5 - 15 \text{ wattia (W) / (kg/m}^3\text{) (mK)}$ , kun täyteaineena käytetään alumiininitridiä (AlN), piikarbidia (SiC) tai timanttia. Alumiininitridi olisi hyvä myös keraamisen kotelon materiaaliksi, mutta se on niin kallista, että yleensä keraamiset komponentit valmistetaan edelleen alumiinioksidista. Jokainen  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ :een alennus komponentin toimintalämpötilassa kaksinkertaistaa komponentin toiminta-ajan. Ilmajäähdytteisillä jäähdytysriivoilla voidaan lisätä lämmön poistoa  $10 - 100 \text{ W}$ :iin riippuen rivan koosta ja tyypistä. /4/

### **Systemitason lämpösuunnittelu**

Systemitason lämpösuunnittelun tarkoituksena on mahdollisimman edullisen lämpötilajakauman aikaansaaminen koko laitteeseen sekä lämpöenergian poistaminen ympäristöön siten, että ympäristön mahdolliset lämpötilanvaihtelut aiheuttavat mahdollisimman vähän muutoksia itse laitteen toimintalämpötilaan. On varmistettava, että laitteen minikään osan lämpötilat eivät ylitä tai alita sille asetettuja rajoja. Hyvin suunnitellut komponentit ja piirikortit helpottavat systemitason lämpösuunnittelua. Kaikki osasuunnittelukin on siis tehtävä kokonaisuutta silmällä pitäen. Ennen kuin laitteeseen suunnitellaan lämmönsiirtoa parantavia tuulettimia ja pumppuja, pitää varmistaa, että passiivinen lämmönsiirto toimii parhaalla mahdollisella tavalla. Lisäksi kaikki lämmönsiirtomekanismit on hyödynnettävä ja piirikorteilla tulisi olla suuri kiinnityspinta koteloon. Liitosten hyvä lämmönjohtavuus voidaan varmistaa käyttämällä esimerkiksi lämpörasvoja. Kotelorakenteen hyvä lämmönjohtavuus voidaan varmistaa käyttämällä mahdollisimman paksua metallirakennetta sekä eri osien ruuviliitosten välissä pehmeää metallikalvoa tai lämpörasvaa. /4/

## Teorian sovellutuksia käytännön lämpösuunnittelussa

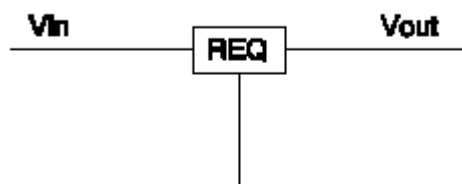
Laite ja komponenttivalmistajat ilmoittavat datakirjoissaan maksimaalisen lämmönsiirtokyvyn ja suurimman sallitun käyttölämpötilan. Nämä kaksi arvoa auttavat meitä valitsemaan alustavasti sopivan jäähdytysmenetelmän. Alla on kuvattu esimerkki jänniteregulaattorin jäähdyttämisestä.

Jänniteregulaattorin jäähdyttäminen (TO-220 kotelo, kuva 9)

Tulojännite: 12 voltia (V)

Lähtöjännite: 5 V

Lähtövirta: 500 milliampeeria (mA)



Regulaattorin kytkentä



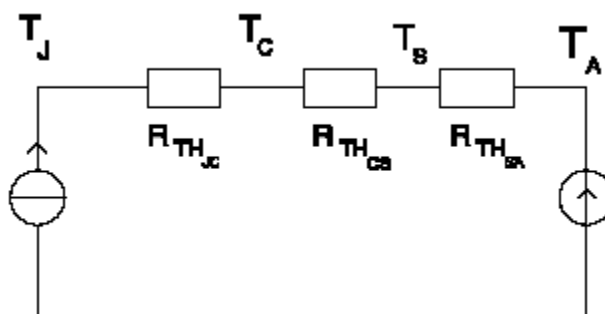
TO-220 kotelo ja jäähdytysripa

Kuva 9. Regulaattorin jäähdytys.

Kun halutaan valita jäähdytyslementti regulaattorille, jonka liitoslämpötila on 100 °C ja ympäröivä lämpötila 20 °C, kun kyseessä on vapaa konvektio, tarvitaan useita erilaisia laskutoimituksia. Regulaattorin tulopuolen jännitteeksi annetaan 12 V ja regulaattorista otetaan jännitettä 5 V ja sen yli pitää mennä 500 mA virta. Tästä saadaan laskettua häviöteho kaavalla 1.

$$(V_{in} - V_{out}) * RegI \quad (1)$$

$$(12 \text{ V} - 5 \text{ V}) * 500 \text{ mA} = 3.5 \text{ W}$$



Ohmin lämpölain mukaan lämmönvastus ympäristöön nähden saadaan laskettua seuraavilla kaavoilla.

$$T_j - T_a = R_{thja} \times (V_d * I_d) \quad (2)$$

$$R_{thja} = R_{thjs} + R_{thsa} \quad (3.)$$

$$R_{thsa} = R_{thja} - R_{thjc} - R_{thcs}, \text{ missä} \quad (4.)$$

$T_j$  = vastuksen liitoslämpötila

$T_a$  = ympäristön lämpötila

$V_d$  = käytetty jännite

$I_d$  = käytetty virta

$R_{thja}$  = lämmönvastus liitoksissa kun ympäristön lämpötila huomioitu (Thermal resistance junction to ambient)

$R_{thsa}$  = lämmönvastus juotoskohdissa ympäristön lämpötila huomioituna (Thermal resistance solder point to ambient )

$R_{thjs}$  = lämmönvastus liitosten juotoskohdissa (Thermal resistance junction to solder point)

$R_{thjc}$  = lämmönvastus liitoskohdissa piirilevyyn nähden(Thermal resistance junction to case)

$R_{thcs}$  = lämmönvastus jäähdytyslevyssä (Thermal resistance case to sink)

Lämmönvastus liitoksissa kun ympäristön lämpötila huomioitu ( $R_{thja}$ ), saadaan laskettua kaavalla 2.

$$R_{thja} = (100 - 20 \text{ } ^\circ\text{C}) / 3.5 \text{ W} = 23 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

Kaavasta 3 saadaan laskettua lämmönvastus juotoskohdissa ympäristön lämpötila huomioituna ( $R_{thsa}$ )

$$= 23 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W} - 2.5 \text{ astetta} / \text{W} - 0.5 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

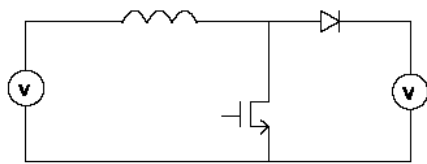
$$= 20 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

### **Hakkurin kytkentätaajuuden vaikutus tehohäviöihin**

Hakkuriregulaattorit perustuvat yleensä käämien pyrkimykseen vastustaa virran muutoksia. Hakkuriteholähteessä sisään tulevaa tasavirtaa katkotaan suurella taajuudella (yleensä 10 kHz-1 MHz) transistorilla. Hakkurin hyötysuhde on hyvä, yleensä noin 80 % - 95 %. Hakkurin antojännite voi olla myös suurempi kuin tulojännite ja lähtö ja tulo voivat olla toisistaan galvaanisesti erotettuja. Hakkurien haittapuolia ovat muun muassa virran katkomisen aiheuttamat häiriöt ja monimutkaisuus, joskin nykyaikaisten pitkälle integroitujen hakkurimikropiirien avulla pienitehoiset hakkurit on helppo toteuttaa.

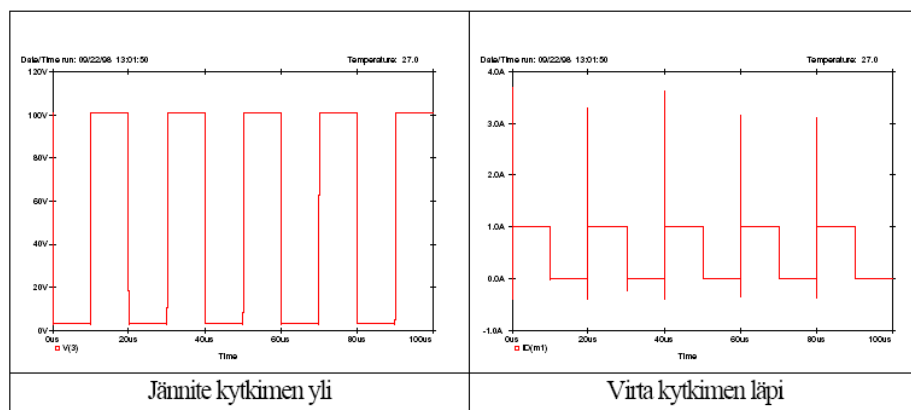
Hakkurin häviöt koostuvat johto- ja kytkentähäviöistä. Kanavatransistorin (MOSFET) komponenttien tapauksessa johtohäviöt ovat muotoa  $P \text{ (W)} = I^2 * R$ , missä  $I$  on komponentin läpi kulkeva virta ja  $R$  on komponentin vastus johtotilassa (eli  $R_{ds\_on}$ ). Kyt-

kentähäviöt aiheutuvat hetkellisesti samanaikaisesti vaikuttavista jännite- ja virtakomponenteista. Esimerkkihakkurina on kuvassa 10 oleva Boost-hakkuri. Boost-hakkurit eli step-up-hakkurit generoivat lähtöjännitteen, joka on suurempi kuin tulojännite.



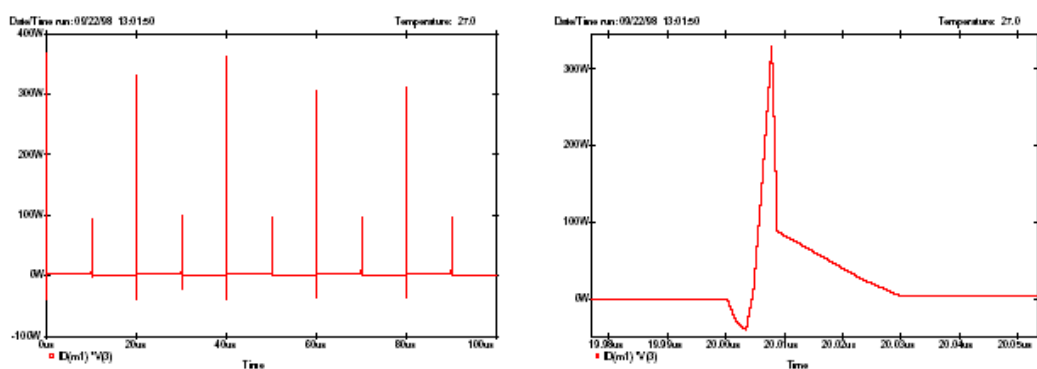
Hakkuriteholähde

Kuva 10. Boost-hakkuriteholähde.

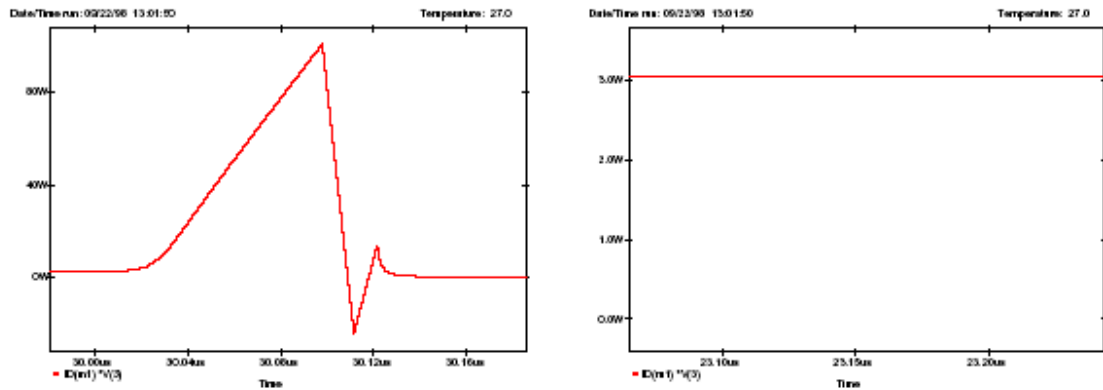


Kuva 11. Esimerkkihakkurin jännite- ja virtakäyrät sekä hetkelliset häviötehot.

Jos virta- ja jännitekäyrät kerrotaan keskenään, saadaan tulokseksi hetkellinen tehohäviö. Tämä on esitetty kuvassa 12 (a). Huomioi johto- ja kytkentähäviöiden aiheuttamat häviökomponentit kuva 12 (b).



Kuva 12 (a). Hetkellinen tehohäviö ja turn-on häviö.



Kuva 12 (b) Turn off-häviö ja johtohäviö

Johtohäviöiksi saadaan kuvan 12 (b) perusteella 3 W. Koska kytkimen johtotilassaolo-aika on puolet jakson ajasta (pulssisuhde), keskimääräinen johtohäviö on  $0,5 * 3 \text{ W} = 1.5 \text{ W}$ . Kytkevähäviöistä on tunnettava keskimääräinen häviöteho kytkennän aikana sekä kytkentätapahtuman kesto. Kuvien perusteella saadaan Turn on-häviö: 70 W (250 ns). Turn off-häviö: 40 W (80 ns). Kytkevähäviöiden aiheuttamaa keskimääräistä häviötehoa laskettaessa on huomioitava myös kytkentätaajuus.

Kytkevähäviö = keskimääräinen häviö kytkennän aikana \* kytkentäjakson pituus \* kytkentätaajuus, eli turn on-häviö:  $70 \text{ W} * 250 \text{ ns} * f$  ja turn off-häviö:  $40 \text{ W} * 80 \text{ ns} * f$ . Kokonaishäviöt saadaan laskemalla yhteen johto- ja kytkentähäviöt:

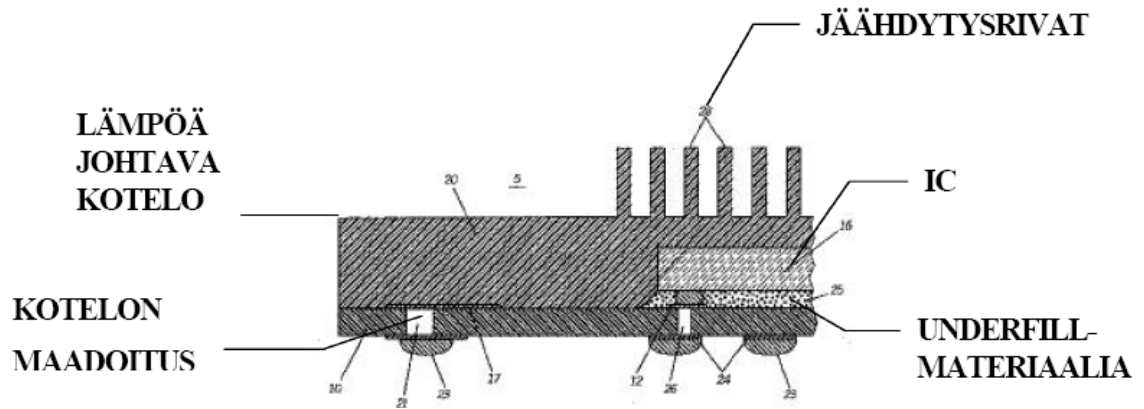
Kokonaishäviö = johtohäviöt + turn-on losses \* s \* f + turn-off losses \* s \* f

Kokonaishäviö =  $0,5 * 3 \text{ W} + 70 \text{ W} * 250 \text{ ns} * f + 40 \text{ W} * 80 \text{ ns} * f$ .

### Integroidun piirin piisirun eli IC:n kotelointi

Komponentin sydämen muodostava IC on kotelon sisässä. Kotelon tehtävänä on suojata herkkää komponenttia joutumasta suoraan kosketukseen ympäristön kanssa. Kotelomateriaalina käytetään yleensä muovia, keraamia tai lasia. Koska muovin lämpölaajenemiskerroin on n. 20 kertainen piihin verrattuna, ei piisirua voi suoraan liittää kotelon pohjaan suurten termisten rasitusten takia. Siksi sirun ja kotelon välissä on oltava erillinen kehys, jonka materiaalin lämpölaajenemiskerroin on oltava lähes sama kuin piillä. Kehysmateriaalina piisirun koteloinissa käytetään yleensä kuparia. Kuvassa 12 havainnollistetaan piisirun jäähtyysuunnittelu.





Kuva 13. IC-piirin lämpösuunnittelu. /4/

### Vesijäähdytys

Suurissa elektroniikkalaitteistoissa voidaan tehohäviöitä tuottavien komponenttien jäähdytykseen käyttää vesijäähdytystä. Jäähdytykseen tarvittavan veden virtausnopeus ja paine-ero vaikuttavat pumppaus vaatimuksiin ja siten laitteiston kokoon ja hintaan. Tämän takia varsinaisten lämmön vaihtimien (cold plate) suunnittelu on tärkeä osa vesijäähdytyksen suunnittelua. Materiaalit on hyvä valita siten, etteivät korroosiosta ja kars-tasta aiheudu ongelmia. Kupari on hyvä valinta lämmönvaihtimen materiaaliksi, sillä sen lämmönjohtavuus ja korroosion kesto on hyvä. Toisaalta alumiini on kevyempää, mutta korroosioherkempää. Itse lämmönvaihtimen voi valmistaa kahdella tavalla: poraamalla (drilled hole) tai pinta-asentamalla (Press-fit). Porattu versio valmistetaan poraamalla kuparilevyyn ensin leveyssuunnassa pienempiä reikiä, jotka sen jälkeen yhdistetään kahdella pituussuuntaisella paksummalla reiällä. Ylimääräiset porausaukot tuke-taan kovajuottamalla tai elektronisädehitsauksella. Pinta-asennettava versio on valmistustekniikaltaan edullisempi, sillä se valmistetaan asentamalla alumiinilevyyn työstettyihin uriin kupariputket. /4/

#### 4.2.1 Lämpösuunnittelun nyrkkisäännöt

Lämpösuunnittelu on otettava huomioon tuotteen suunnittelussa alusta asti, koska mekaaniset, sähköiset, EMC- ja lämpösuunnitteluratkaisut vaikuttavat läheisesti toisiinsa. Lämpösuunnittelun avulla voidaan saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä. Kaikki lämmönsiirtomekanismit on hyödynnettävä. Esimerkiksi ennen kuin laitteeseen suunnitellaan lämmönsiirtoa parantavia tuulettimia ja pumppuja, on varmistuttava siitä, että passiivinen lämmönsiirto toimii parhaalla mahdollisella tavalla. Kustannussäästöt voivat olla merkittäviä etenkin silloin, jos lämmönsiirto-ongelma voidaan ratkaista passiivista lämmönsiirtoa parantamalla. Elektronisten komponenttien elinikä puolittuu jokaista

lämpötilan 10 celsiusasteen nousua kohti. Elinajan lyheneminen johtuu komponenteissa tapahtuvien kemiallisten reaktioiden nopeutumisesta. Ideaalinen lämpötila-alue elektroniikan toiminnalle on noin -5 - 65 °C. /4/

Pienissä komponenteissa järkevin jäähdytystapa on lämmön johtumisen parantaminen. Imajäähdytteisillä jäähdytysrivoilla lämmönsiirtoa voidaan lisätä 10 - 100 W jäähdytysrivasta riippuen. Ilmanpoistoaukon tulee olla riittävän suuri, kun lämmönsiirtomekanismina käytetään pakotettua konvektiota. Suositeltava koko on 1,5-kertainen tuulettimen halkaisijaan verrattuna. Pakotetussa konvektiossa kannattaa pyrkiä turbulenttiseen ilmavirtaukseen komponentin pinnan lähellä, koska lämmönsiirto on tällöin tehokkaampaa kuin laminaarisessa ilmavirtauksessa. Lämpösuunnittelussa kannattaa mahdollisuuksien mukaan käyttää valmiita, jo olemassa olevia ratkaisuja. /4/

## 5 Piirilevysuunnittelu

Piirilevy eli piirikortti on lähes poikkeuksetta kallein rakenneosia elektroniikkalaitteissa. Laitteen käyttöolosuhteet ja luotettavuusvaatimukset määrittävät pitkälti piirikortin rakennemateriaalit. Komponenttien sijoittelussa on otettava huomioon myös käytettävä tuotantotekniikka, eli ladonta- ja juotostekniikan vaatimukset komponenttisijoittelulle.

Valmistusmenetelmät ja tekniikka kehittyvät nopeasti elektroniikan alueella. Suuntaus on yhä pienempiin komponentteihin ja piirilevyn valmistustekniikoihin. Nykyisin piirilevylle on mahdollista tehdä jyrksintävaiheessa jo osa komponenteista esim. kondensattoreita ja keloja. Integroitaessa aktiivi- ja passiivikomponentteja piirilevyn sisään tai pinnalle, on itse piirilevy jo alkeellinen toiminnallinen osa. /5/

Piirilevy on eristelevy, jolle kootaan komponentteja ja kytkentöjä juottamalla niitä kiinni levyllä oleviin kupariväyliin, jotka toimivat johtimina. Piirilevy valmistetaan kutakin kytkentää varten erikseen, räätälöimällä ne raakalevystä. Piirilevylle on laminoitu ohut yhtenäinen kuparikerros, josta poistetaan ylimääräinen osa, jäljelle jää halutut johtimina toimivat kupariväylät. Piirilevyn ja kuparipinnoitteen paksuus määräytyvät asiakastarpeiden mukaan. Laitteen käyttöolosuhteet ja luotettavuusvaatimukset määrittävät pitkälti piirilevyjen materiaalien valintaperusteet. /4/

## 5.1 Piirilevymateriaalien jaottelu

Piirilevymateriaalit jaotellaan palonkestävyyden (FR) mukaisesti. Palonkestävyys parane luokituksen numeron suurentuessa. Piirilevymateriaalit jaotellaan palonkestävyyden mukaisesti seuraavalla tavalla:

- FR1 Huono kosteudensieto.
- FR2 Hyvä kosteudensieto, soveltuu yksipuolisiin kulutuselektroniikan piirilevyihin.
- FR3 Kohtalaiset mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet.
- FR4 Erinomaiset mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet, soveltuu monikerroslevyihin.
- FR5 Erinomainen korkeissa lämpötiloissa, itsestään sammuva.
- G10 Suuri eristysvastus, hyvä lujuus, hyvä kosteudensieto.
- G11 Sietää liuottimia.

Piirilevyn historian alkuaikoina eristelevynä käytettiin hartsilla kyllästettyä paperia, jota kutsuttiin Pertinaxiksi. Pertinax-levyn etuna on, että reiät ja leikkaukset voidaan tehdä stanssaamalla ja levy on hinnaltaan edullinen. Pertinax-levyjen heikkouksina ovat sen hauraus, se on helposti murtuvaa ja kupariväylät tahtovat irrota kuumennettaessa. Huomioitavaa myös on, että Pertinax-levyllä on suuri lämpölaajenemiskerroin ja erittäin huono lämmönkesto. Pertinax-levyä ei nykyisin enää käytetä piirilevyissä. /4/

FR4 materiaali on tällähetkellä yleisin piirilevymateriaali. Se on epoksihartsilla kyllästettyä lasikuitua. Sen yleisyytensä ansiosta sitä on nykyään myös edullisinta työstää. Nimitys FR tulee sanoista Flame Retardend (paloa hidastava), eli piirilevymateriaali sisältää palonestoaineita, joiden käyttö tosin tullaan kieltämään uusien standardien myötä niiden matalissa lämpötiloissa palaessaan muodostamien dioksiinipäästöjen vuoksi. /6/

Epoksilasikuitu on nimensä mukaisesti lasikuidulla vahvistettua epoksia. Epoksilasikuidun lämpölaajennuskertoimeen voidaan vaikuttaa valmistusvaiheessa. Toisin sanoen, mitä pidempi kovettumisaika korttimateriaalilla on valmistuksessa, sitä pienempää on lämpölaajeneminen. Lämpölaajeneminen pysyy pienenä aina +125 °C asti, jonka

jälkeen se kasvaa voimakkaasti. Tästä johtuen +125 °C on tälle piirikorttimateriaalille käytännön asettama yläraja, jota kutsutaan lasisiirtymälämpötilaksi. /6/

Epoksilasikuidun etuina on sen soveltuvuus teollisuuslämpötila-alueelle (-40 - +80 °C), se on kohtuu hintainen, mekaanisesti kestävä ja sitä voidaan käyttää sotilaslämpötila-alueella (-55 - +125 °C) edellyttäen, että piirilevyllä ei ole yli 40-nastaisia mikropiirejä, jolloin sen lämpölaajeneminen olisi liian suurta. /6/

Nykyään kiinnitetään enenevässä määrin huomiota jätteiden hävittämiseen niiden kustannusvaikutusten vuoksi, joten on mahdollista, että komposiittilevy tulee syrjäyttämään FR4-materiaalit piirilevyissä. Kulutuselektroniikan osalta komposiittilevyt ovat nykyään yleisimpiä, koska tuotannossa pyritään minimoimaan vaaralliset pölyt, leikkausjäte sekä työstöterien kulutus. Komposiittilevyjä kutsutaan yleisesti keraamisiksi levyiksi ja ne valmistetaan alumiinioksidista. Alumiinioksidin lämpölaajeneminen on samaa luokkaa kuin laajan lämpötila-alueen omaavilla keraamisilla komponenteilla. Huonoina puolina mainittakoon, että se on mekaanisesti helposti murtuvaa ja sen hyvä lämmönjohtavuus voi muodostua ongelmaksi juotos- tai korjausvaiheessa. /6/

Muita piirilevymateriaaleja ovat polyimidi, keramiikat ja invar-metalli. Polyimidin ominaisuudet ovat hyvin lähellä epoksilasikuitua, mutta lasisiirtymälämpötila, eli lämpölaajenemisen kasvu alkaa +180 - +270 °C lämpötilassa. Polyimidin lämpölaajeneminen on pienempää kuin epoksilasikuidulla. Polyimidin etuna on laaja käyttölämpötila-alue (-55 - +200 °C), hyvin pieni lämpölaajenemiskerroin ja se on mekaanisesti erittäin kestävä. /6/

Alumiinioksidi on yleisin keramiikkamateriaali, jonka lämpölaajeneminen on sama, jos piirikorteilla olevien laajan lämpötila-alueen komponenttien kotelo on samaa materiaalia. Supertietokoneissa käytetään keramiikkakorttia sen erinomaisen lämmönjohtokyvyn ansiosta. Keramiikan etuna on pieni lämpölaajenemiskerroin, joka on sama kuin keraamisilla komponenteilla sekä sen erinomainen lämmönjohtokyky. Haittoina mainittakoon niiden helppo mekaaninen murtuvuus ja hyvä lämmönjohtavuus, joka tuottaa ongelmia juotos- tai korjausvaiheessa. /6/

Invar-metalli eli invar-lejeerinki on raudan ja nikkelin seos, jolla on hyvin pieni lämpölaajenemiskerroin. Invar-lejeeringistä valssattua levyä, jonka molemmat puolet ovat

yleensä kuparoituja, voidaan asettaa monikerrospiirikortin välikerrokseksi, jolloin epoksilasikuitu- tai polyimidikortin lämpölaajenemis- ja lämmönjohtavuusominaisuudet saadaan lähes keramiikkakortin tasolle. /6/

## **5.2 Piirilevyjen rakenne**

Piirilevyjen rakenteena voidaan käyttää yksikerrosrakennetta jossa on yksipuoleinen kuparointi, yksikerrosrakennetta jossa on kaksipuoleinen kuparointi ja monikerrosrakennetta.

### **Yksipuoleinen kuparointi yksikerrosrakenteessa**

Yksikerrosrakenne ei sovellu vaativien piirikorttien suunnitteluun. Jos yksikerrosrakenteessa käytetään molemminpuolista kuparointia, voidaan sillä toteuttaa melko monipuolinen kytkentä ja läpikuparoinnin ansiosta reikiin asennettavien komponenttien juotosluotettavuus on hyvä. Johdinkuparointi on vain piirilevyn yhdellä puolella. Juotettavuuden luotettavuutta voi parantaa läpikuparointitekniikalla, joka kannattaa tehdä varsinkin raskaammille komponenteille kuten muuntajille. /7/

### **Kaksipuoleinen kuparointi yksikerrosrakenteessa**

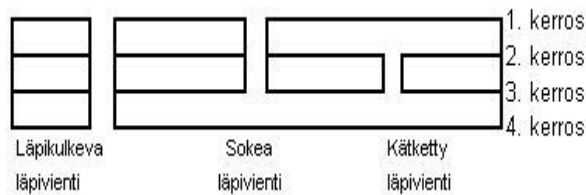
Tämä menetelmä soveltuu jo kohtuullisen monipuolisten kytkentöjen tekemiseen, sillä johdinkuparointia on piirikortin molemmin puolin. Läpikuparoinnin ansiosta reikään asennettavien komponenttien juotosten luotettavuus on hyvä, siksi että kuparikerrokset on yhdistetty läpikuparoinnein. /7/

### **Monikerrosrakenne**

Monikerrosrakenne muodostuu fyysisesti useista yhteenliitetyistä yksikerroskorteista, joita voidaan käyttää vaativampiinkin kytkentöihin. Johdinkerroksia voi olla paljonkin, esimerkkinä mainittakoon eräät supertietokoneet, joissa on jopa 48 kerrosta. Monikerroslevyissä johdinvetoja voidaan vetää myös piirikortin sisällä ja niihin voidaan suunnitella myös suojattuja johdinvetoja.

Monikerroskorteissa varataan yleensä jokin kerros maatasoksi. Lisäksi käyttöjännitteille varataan myös omat kerrokset. Näin kerrosten välistä kapasitanssia voidaan hyödyntää käyttämällä sitä by-pass eli ohituskondensaattorina käyttöjännitteen nopeita vaihteluita vastaan. /7/

Kuvassa 14 olevalla monikerrosrakenteella voidaan jo suunnitella vaativia kytkentöjä. Läpiviennit voivat olla laser-, sokeita-, kerrosten- tai piirilevyn läpi kulkevia läpivientejä. /7/



Kuva 14. Piirilevyn monikerrosrakenne. /7/

## Läpiviennit

Läpikulkeva läpivienti kulkee suoraan koko kortin läpi. Sokea läpivienti ulottuu vain kortin tiettyyn osaan asti. Kätetty läpivienti yhdistää kerroksia kortin sisällä, eikä näy mitenkään kortin ulkopuolelle. /7/

## Piirilevyt RF-tekniikassa

Piirilevylle voidaan suunnitella johdinvetoina myös keloja ja kondensaattoreita, joita RF-tekniikassa käytetään ja paksukalvotekniikalla voidaan valmistaa vastuksia suoraan piirilevylle. /7/

## Reikään asennettavat komponentit

Läpikuparointiholkkin sisähalkaisijan tulee olla sopiva asennettavaan komponenttiin nähden. Rakoleveyden tulee olla yli 0,05 mm, mutta alle 0,25 mm, sillä halkaisijan ero on kaksi kertaa rakoleveys. Optimi löytyy jostain tästä väliltä. Rakoleveyteen vaikuttaa juotteen rakenne ja piirikortin paksuus. Kun sisähalkaisija on sopiva, juote leviää tasaisesti piirikortin molemmille puolille. Jos rakoleveys jää alle edellämainitun 0,05 mm:n ei rako enää täyty kunnolla. Jos rakoleveys ylittää 0,25 mm, sen mekaaninen kestävyys heikkenee. /7/

## Juottaminen

Juottaminen on pastanpainon jälkeen suurin virheiden aiheuttaja elektroniikan valmistuksessa. Käsijuottamisessa on tärkeää käyttää mahdollisimman alhaista juotoslämpötilaa ja oikeankokoista, hyvin puhdistettua kärkeä. Reflow- ja aaltojuottamisessa kannattaa uuni valita oman kapasiteettitarpeen mukaan.

### **Aaltojuotos**

Aaltojuotos on yleisin sarjatuotannossa käytössä oleva juotosmenetelmä. Aaltojuotos on kehitetty reikään asennettavien komponenttien aikakaudella, joten pintaliitostekniikan käyttö aaltojuotoksessa vaatii sen huomioonottamista piirikortin suunnitteluvaiheessa. Aaltojuotoksessa juotospisteet eivät saa olla juotossuuntaan nähden liian lähellä toisiinsa, muutoin seurauksena voi olla juotossilta. Aaltojuotoksessa on pintaliitoskomponenteilla (Surface Mounted Device, SMD) huomioitava myös varjostusvaikutus. Kun komponentti siirtyy piirikortin mukana sulan juotteen yli, ei juote välttämättä tartu komponentin takaosaan. Tämän vuoksi juotospisteen tulee olla riittävän pitkä nimenomaan jättöreunalla, jotta juote kastelee myös tämän juotospisteen. Aaltojuotoksessa juote siis tulee aina alhaalta, joten SMD-komponentit on aina liimattava kiinni piirilevyyn. Aaltojuotoksen etuna on sen nopeuden lisäksi se, ettei se vaadi erillisen juotospastan käyttöä. /7/

### **Höyryfaasijuotos**

Höyryfaasijuotosjärjestelmä on kehitetty pintaliitostekniikan tarpeisiin, sillä se ei vaadi erityistoimenpiteitä piirilevysuunnittelussa. Juotospasta sulaa piirikortilla erikoisnesteen höyryssä, jonka lämpötila on nesteestä riippuen hieman alle tai yli +200 °C. Haittoina voidaan mainita myrkylliset höyrypäästöt, nesteiden kalleus ja tehokasta sarjatuotantoa ajatellen järjestelmän hitaus. /7/

### **Infrapunajuottaminen**

Infrapunajuottamisessa juotospasta sulatetaan Infrapuna- eli lämpösäteilyllä piirilevyille. Komponenttien väri vaikuttaa niiden vastaanottaman lämpösäteilyn määrään. Komponenttisijoittelussa on tällöin huomioitava komponenttien sijoitus suhteessa säteilylähteen sijoitukseen, jotta mikään komponentti ei varjosta toisen komponentin juotospistettä. /7/

### **Kuumahihnajuottaminen**

Kuumahihnajuottaminen soveltuu ainoastaan vain keraamisille piirikorteille. Piirikortti lämmitetään altpäin niin, että piirikortin yläpuolella oleva juotospasta sulaa. /7/

### **Kuumailmajuottaminen**

Kuumailmajuottamisessa juotospasta sulatetaan kuumailmapuhalluksella. Tämä menetelmä soveltuu pienille tuotantosarjoille, sillä siinä voidaan juottaa vain yksi komponentti

kerrallaan. Komponenttisijoittelussa huomioitava riittävä väljyys, jotta puhaltimen suukappale sopii komponentin ympärille.

### **Digitaalipiirien maahäiriöt**

Sähköisiä laitteita suunniteltaessa on kiinnitettävä huomioita useisiin varsin tärkeisiin seikkoihin, mutta ehkäpä kaikkein tärkein niistä on puhtaan ja vakaan käyttöjännitteen sekä maan takaaminen kaikille piireille. Käyttöjännitteen suuruus tai pienuus ei ole ratkaiseva tekijä järjestelmän hyvyydelle tai häiriöttömyydelle. Käyttöjännitteeksi lasetaan syöttöjännite (+3 V, +5 V, jne.) mutta yleensä puhuttaessa käyttöjännitteestä voidaan tarkoittaa myös käyttöjännitemaata. Kun sanotaan ”Kytke käyttöjännite tai käyttöjännitteet et kytke vain teholähteen positiivista napaa sähkölaitteeseen vaan myös maan. Englanninkielinen ”power supply” olisi ehkä hieman kuvaavampi nimi puhuttaessa käyttöjännitteestä. Käytännössä toimivan ja hyvän maadoituksen tekeminen on piirilevyn tai integroidun piirin teossa tärkein vaihe.

Analogia- ja digitaalipiirien maatasot on yleensä erotettu varsinkin RF-, IF- ja baseband-osien kesken kuten nykyaikaisissa radioissa, radiopuhelimissa ja tietokoneiden oheislaitteissa, etenkin ääni- ja digitaalisen signaalikäsittelypiireissä (Digital Signal Processing, DSP). Digitaaliset piirit tuottavat huomattavasti enemmän voimakkaita harmonisten taajuuksien häiriökomponentteja ympäristöönsä kuin analogiset piirit. On kuitenkin huomioitava, että yleistys ei ole aukoton. Ajatellaanpa vaikka perinteistä digitaalista kanavatransistoripiiriä (CMOS), jonka ominaisuutena on matala energian kulutus sen ollessa staattisesti 0- tai 1-tilassa. Muuttaessaan tilaansa nolasta ykköseksi tai päinvastoin kuluttaa kyseinen CMOS-piiri huomattavasti energiaa käyttöjohtimista, siis käyttöjännitteestä maahan. Tällöin hyvä maa joko järjestää paikalle nopeasti lisävarausta tai toimittaa sen pikaisesti pois. Hyvän maajohtimen tai -tason tehtävänä on siis pysyä sähköisesti paikallaan ja olla järkkymätön. /8/

### **Maahäiriön synty**

Maajohtohäiriöitä tuottavat nopeat muutokset käyttöjännite-, signaali- ja paluuvirroissa. Käyttöjännitteen häiriömuutokset pystytään kontrolloimaan oikein sijoitetuilla käyttöjännitekondensaattoreilla. Käyttöjännitejohtimen induktanssi viivästyttää virran kulkua ja siksi jännite notkahtaa jos jokin piiri nopeasti imaisee sähköä. Tällöin kyseisen piirin käyttöjännitteen ja maan väliin sijoitetaan esim. 100 nano faradin (nF) monikerroskondensaattori energiavarastoksi. Maajohtimen paluuvirtoja ei voida suodattaa kondensaat-



toreilla eikä niitä voida ohittaa fyysisesti, vaikka niille voidaankin antaa useita polkuja. Maajohtimen paluuvirran äkkinäiset muutokset ovat pääasiallinen syy järjestelmätason häiriöjännitteisiin ja sitä kautta sekä johtuviin että säteileviin häiriöihin. Jotta maajohtimessa tapahtuvaa häiriötä voisi pienentää, pitää maajohtimen tai -tason impedanssin olla mahdollisimman pieni. Jos piirilevyllä olevan 0,5 mm levyisen johdeliuskan, jolla on paluujohdin kaksipuoleisen levyn toisella puolella, jonka resistanssi on 5 milliohmia ( $m\Omega$ ) / cm, kapasitanssi 1 pikofaradia (pF) / cm ja induktanssi 6 nanohenryä (nH) / cm. Taulukosta 1 nähdään, kun taajuus ylittää 10 MHz, niin induktanssin impedanssi kasvaa huomattavasti. /8/

Taulukko 1. Pieninduktanssisen johtimen impedanssin riippuvuus pulssin nousuajasta ja taajuudesta. /8/

Taajuus (f/ MHz)	Nousuaika (tr/ns)	Impedanssi (Z/ $\Omega$ )
1	320	0.04
10	32	0.4
50	6.5	2
90	3.5	3.3
160	2	6

Jos signaalin nousuaika on nopeampi kuin 3 nanosekuntia (ns), maajohtimella on induktiivinen reaktanssi. Tästä johtuen piirilevy suunnittelussa on tärkeintä kiinnittää huomiota nimenomaan induktanssiin.

### Induktanssin pienentäminen

Induktanssin arvoa pienentäessä on hyvä tietää, kuinka sen arvo määräytyy piirin ja piirilevyvedon ominaisuuksista. Induktanssi on suoraan verrannollinen johteen pituuteen. Sellaiset maavedot, joiden läpi kulkee nopeiden signaaleiden äkkinäisiä muutosvirtoja kuten kellokiteen käyttöjännitteet tai väylän virta-ajurit eli driverit kannattaa pitää mahdollisimman lyhyinä. Vedolla tarkoitetaan kytkentää pinnistä pinniin tai tasoon. Vetoja ei pystytä pitämään lyhyinä varsinkaan suuremmissa järjestelmissä, poikkeuksena integroidut piirit. Laajamittaisesti integroiduissa digitaalipiiri-piireissä (Very Large Scale Integration, VLSI) on suuri määrä piirejä kytketty yhdelle integroidulle piirille (Integrated Circuit, IC) jolloin niiden välinen yhteys muodostuu väistämättä pieneksi. Tästä syystä suuren porttimäärän digitaalipiirien (Large Scaled integrated, LSI) johtimien induktanssi on pienempi. /8/

Induktanssi on kääntäen verrannollinen johteen halkaisijan logaritmiin tai tasojohtimen leveyteen. Yksittäisen pyöreän johtimen, joka on paluuvirta johtimen yläpuolella (samansuuntaisia) induktanssi on

$$L = 2 * \ln(4*h / d) * nH / cm \quad (5.)$$

missä johtimen halkaisija on  $d$  ja korkeus paluujohtimen yläpuolella  $h$ . Tasojohtimelle eli piirilevyvedolle induktanssi on

$$L = 0.2 * \ln(2*\pi*h / w) * nH / cm \quad (6.)$$

missä  $w$  on johtimen leveys. Jos edelliset yhtälöt 5 ja 6 asetetaan yhtä suuriksi, niin saamme yhteyden irrallisen johtimen halkaisijan ja piirilevyjohtimen leveyden välille. Johtimilla on sama impedanssi, jos seuraava ehto on voimassa

$$w = 1.57 d \quad (7.)$$

Yhtälö 5 osoittaa, että tasojohteella on sama induktanssi kuin ympyräjohteella, jos sillä on sama pinta-ala. Johtuen logaritmisesta suhteesta kaavoissa 5 ja 6 on vaikea saavuttaa suurta induktanssin arvon laskemista, vaikka johteen kokoa kasvatettaisiin. Tyypillisesti halkaisijan tai leveyden kaksinkertaistaminen (+100 %) vähentää induktanssia vain viidesosan (-20 %). Jos induktanssi haluttaisiin puolittaa, olisi johtimen pinta-ala kasvatettava viisinkertaiseksi (+500 %). Pinta-alan kasvattamista on käytettävä, jos aikoo pienentää induktanssia ja jos induktanssia on pienennettävä huomattavasti, niin on löydettävä muita keinoja sen pienentämiseksi. Yksi tapa pienentää induktanssia on tarjota piirissä vaihtoehtoisia paluupolkuja virralle. Näiden polkujen on oltava sähköisesti, mutta ei välttämättä fyysisesti rinnakkaisia. Jos kaksi induktanssia on rinnakkain, laskee yhteisinduktanssi puoleen jos keskinäisinduktanssia ei huomioida. Koska induktanssi on kääntäen verrannollinen rinnakkaisten polkujen määrään, on tämä menetelmä tehokas induktanssin vähentämiseen. /10/

### **Käytännön suunnittelu**

Nopeassa digitaalipiirejä sisältävässä laitteessa on oltava matalaimpedanssin eli matalainduktanssin yhteys kaikissa kytkennöissä. Käytännöllisin tapa on tarjota mahdollisimman monta reittiä signaalille. Näitä ovat kellosignaali, maa ja käyttöjännite. Toinen mahdollisuus on jättää välijohde kokonaan pois, toisinsanoen kytkeä signaali tai maa suoraan pinneihin. Jos kaksi edellä olevaa tapaa yhdistetään, havaitaan että yhtenäinen maataso piirilevyllä on hyvä vaihtoehto. Kun yhtenäinen maataso tarjoaa parhaimman mahdollisen maadoituksen sitä ei aina voida käyttää. Jos piirien välinen signalointi on vienyt jo kaiken piirilevyn pinta-alan, niin ei ole taloudellisesti järkevää kasvattaa piiri-

levyä tai laittaa useampaa kerrosta piirilevyyn pelkän maadoituksen takia. Näissä tapauksissa lähes yhtä hyvä tapa on tehdä maataso verkkomaiseksi vaaka- ja pystysuuntaan. Vaaka- ja pystysuuntaiset suuntaiset maavedot voidaan sijoittaa eri puolille korttia. Yhdistelmiä ja menetelmiä on monia ja niitä tutkimalla löytää mieleisensä. Tärkeintä on kuitenkin, että kaikissa digitaalisia piirejä sisältävissä piirilevyissä on joko maataso tai maaverkko, vaikka silloin menetetäänkin informaatio varmasta virran paluukanavasta. /10/

### **Silmukkasuunnittelu**

Yksi tärkeä suunnittelukeino induktanssin vähentämiseksi on silmukka-alueen käyttö. Siinä pyritään kutistamaan virran kulkema silmukka käyttöjännitejohdosta maajohtimeen. Kaksi johdinta joiden virrat ovat vastakkaiset muodostavat induktanssin  $L_t$ , joka noudattaa kaavaa

$$L_t = L_1 + L_2 - 2M \quad (8.)$$

$$L_t = L_1 + L_2 - 2M \quad (9.)$$

missä  $L_1$  ja  $L_2$  ovat johteiden itseisinduktanssit ja  $M$  on keskinäisinduktanssi johteiden välillä. Jos johteet ovat identtisiä niin edellinen yhtälö supistuu

$$L_t = 2 * (L - M) \quad (10.)$$

Jotta kokonaisinduktanssi suljetussa silmukassa saataisiin minimoiduksi, on keskinäisinduktanssi johteiden välillä saatava mahdollisimman suureksi. Tämän vuoksi johteet on sijoitettava mahdollisimman lähelle toisiaan, jotta alue niiden välissä tulisi niin pieneksi kuin mahdollista. Jos magneettisen kytketymisen kerroin  $k$  kahden johteen välillä on suurin mahdollinen ( $= 1$ ), keskinäisinduktanssi on yhtä suuri kuin itseisinduktanssi koska

$$M = k\sqrt{L_1 * L_2} \quad (11.)$$

ja kokonaisinduktanssi suljetussa silmukassa on nolla. Suurilla taajuuksilla koaksiaalijohto lähestyy tätä ihanteellista olosuhdetta. Tehokas keino induktanssin pienentämiseen on käyttöjännitevetojen sijoittaminen toistensa lähelle. Se voidaan tehdä teholahteesta esimerkiksi kierretyllä parikaapelilla tai koaksiaalijohdolla. Tällaisella asennuksella alle 20 nH / m induktanssit ovat saavutettavissa. Jos piiriin tehdään maataso tai maaverkko, niin virran paluureittiä ei voida ennustaa. Se palaa aina sähköisesti nopeinta reittiä, jota voi olla hyvin vaikea havaita pelkästään piiriä tarkastelemalla. /10/

## 6 WMob-piirilevysuunnittelu

Piirilevysuunnittelu alkaa aina siitä, että työhön etsitään tarvittavat komponentit ja niiden datalehdet. Samalla on hyvä kartoittaa vaihtoehtoiset komponentit, jotta turvataan niiden saatavuus myös tulevaisuudessa. Tässä työssä suunniteltiin kaksi piirilevyä isäntänä toimiva WMobMaster- ja orjana toimiva WMobSlave-piirilevyt.

### WMobMaster -ja WMobSlave-piirilevyt

Piirilevyjen suunnitteluohjelmanä käytettiin PADS-piirilevysuunnitteluohjelmaa. Lähtökohtana oli suunnitella RF-tekniikalla varustettu piirilevy, jolloin ensin kartoitettiin sopiva RF-piiri, joka täytti tutkimuksen asettamat vaatimukset. Piiriksi valittiin ChipCon 1010 lähetin-vastaanotin-piiri. CC1010-piiri toimii 433 MHz:n taajuudella ja siinä on oma 32-kilotavun ohjelmoitava flash-muistipiiri. Tällöin ei tarvita erikseen omaa ohjelmoitavaa mikroprosessori-piiriä. Taajuus 433 MHz valittiin, koska työssä haluttiin tutkia radiosignaalin etenemistä erilaisten materiaalien läpi ja saada signaalin kantomat-kasta mahdollisimman pitkä. Matalat radioaallot läpäisevät paremmin esteitä ja ovat muutenkin vähemmän herkkiä korruptoitumaan esteen kohdatessa. Lisäksi CC1010-piirissä on tarvittava määrä input-output liittymiä sekä kaksi erillistä sarjaporttiliityntää. Sarjaporteista UART 0 käytettiin ohjelmallisten virheiden jäljittämiseen (debug) ja UART 1 tiedon siirtämiseen WMobMaster-kortilla olevalle Wavecom 228 GSM-GPRS-moduulille. WMobSlave-kortille valittiin Sensirion yhtymän SHT11 lämpötila-anturi, jolla kerättiin ympäristön lämpötilatietoa, joka lähetettiin kortilla olevalla lähetin-vastaanotin-piirillä WMobMaster-kortille analysoitavaksi.

Opinnäytetyön piirikaaviot piirrettiin PADS PowerLogic-ohjelmistolla. Piirikaavioissa määriteltiin käytettävät komponentit ja niiden väliset yhteydet. Piirikaavioihin määriteltiin myös tärkeitä suunnittelusääntöjä kuten eristevälit ja kerrosmääritykset. Piirilevyt suunniteltiin PADS:n PowerPCB- ja BlazeRouter-ohjelmilla. Piirilevysuunnittelussa tehtiin mekaaniset määrittelyt, komponenttisijoittelut, reititykset ja dokumentointimerkinnot. BlazeRouterilla suoritettiin johdotus vuorovaikutteisesti.

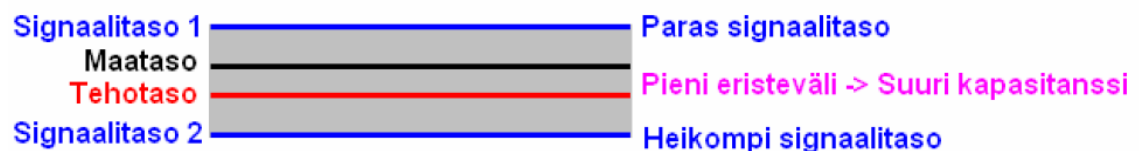
Ohjelmiston valmiit virheentarkastustyökalut (Design Rule Checking, DRC) tarkistavat tehokkaasti eristevälien etäisyydet ja reitityksen epäjatkuvuudet, mutta ovat sokeita muutamille vioille, kuten esimerkiksi tahattomasti syntyneet pieni-impedanssiset reitit maapotentiaaliin, jotka saattavat aiheuttaa virrankulutuksen kasvua tai jopa maadoittaa hyötysignaalin. Piirilevyn suunnittelun loppuvaiheessa on siis tärkeää tarkastaa omin silmin signaalipolkujen eheydet. Samalla tulee myös tarkkailla tuotannon kannalta

oleellisia seikkoja, joilla ei välttämättä ole mitään tekemistä itse piirin toiminnan kanssa. Esimerkkinä mainittakoon liian lähellä komponentin jalkaa olevat läpiviennit, jonne juotospasta pääsee kuumennettaessa valumaan. Tällöin komponentin liitos jää syntymättä.

Piirilevyjen materiaaliksi valittiin FR4, koska se on yleisin käytetty materiaali piirilevyissä ja samalla haluttiin pitää prototyyppien materiaalikustannukset alhaisina.

Piirilevyjen juotospadien materiaaliksi valittiin lyijyllinen tina, koska materiaalina lyijytön tina olisi kasvattanut materiaalikustannuksia. Lyijyllinen tina sopii hyvin prototyyppituotantoon, mutta varsinaisessa tehdastuotannossa yleisesti käytössä on lyijytön vaihtoehto, joka on RoHS-direktiivin mukainen.

RF-signaalien ollessa samalla tasolla ma- tai tehotason kanssa, aiheuttaa maajohtimien paaluuvirtojen nopeat muutokset häiriötä RF-signaaleille. Koska piirilevyillä käytettiin RF-taajuutta, jouduttiin kerrosmääräksi valitsemaan neljä kerrosta. Apujännitetasot estävät myös tehokkaasti signaalien ylikuulumista. Kerrokset valittiin siten, että teho- ja maatason eristeväli pidettiin mahdollisimman pienenä, jolloin jännite- ja maatason välinen kapasitanssi saatiin mahdollisimman suureksi ja piirilevyn tehosyötön impedanssi mahdollisimman pieneksi. Teho- ja signaalitason väli valittiin mahdollisimman suureksi, koska näin saatiin tehotason häiriöiden indusoitumista signaalitasolle pienennettyä, kuva 15.



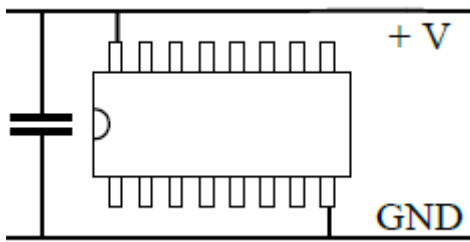
Kuva 15. Havainnollistava kuvaus neljän kerroksen käytöstä piirilevyllä. 4-kerrosrakenteella maapotentiaali ja käyttöjännitteet saatiin omille tasoilleen.

Komponenttien sijoittelussa noudatettiin seuraavaa järjestystä:

Kaikki komponentit sijoitettiin piirilevyn päällimmäiseen kerrokseen (top).

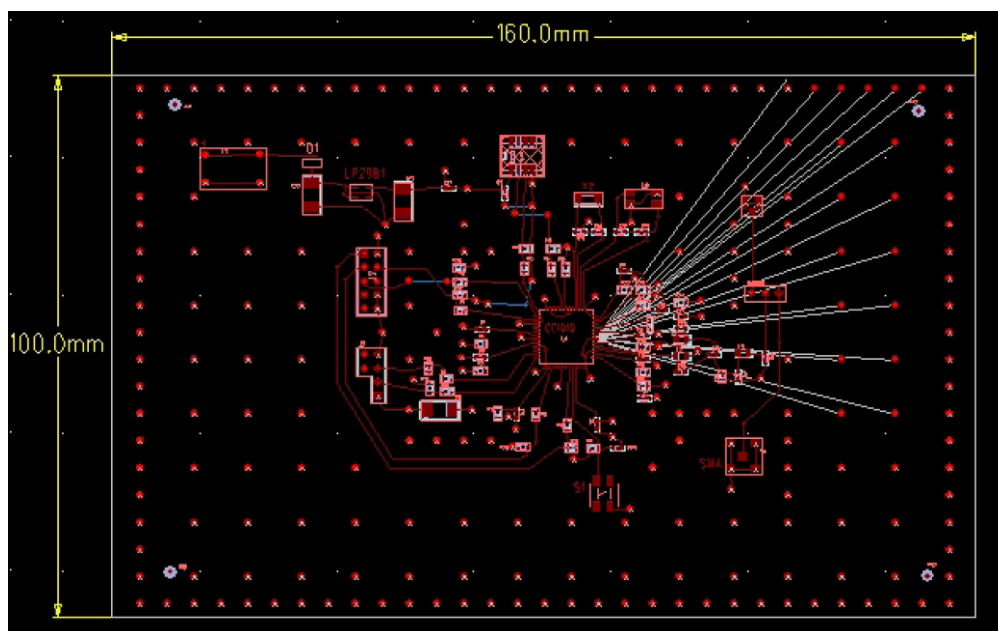
Ensin piirrettiin liittimet ja painikkeet, jotka sitten lukittiin paikalleen, ettei niitä enää vahingossa liikuteltaisi. Myös kaikki kytkemättömät signaalit kytkettiin maapotentiaaliin, ettei niistä muodostuisi ”antenneja” piirilevyille. Tämän jälkeen järjesteltiin loput komponentit toiminnallisiin ryhmiin ja katsottiin, että ryhmään kuuluvat komponentit ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Ohitus- eli suotokondensaattorit aseteltiin jokaisen piirin välittömään läheisyyteen, täten saatiin apujännitteiden vaihtelut piireiltä pie-

nemmäksi. Ohituskondensaattoreina käytettiin 100 nF nopeaa keraamista kondensaattoria, joka sijoitettiin apujännitteeseen syötettävän liittimen viereen, kuva 16.

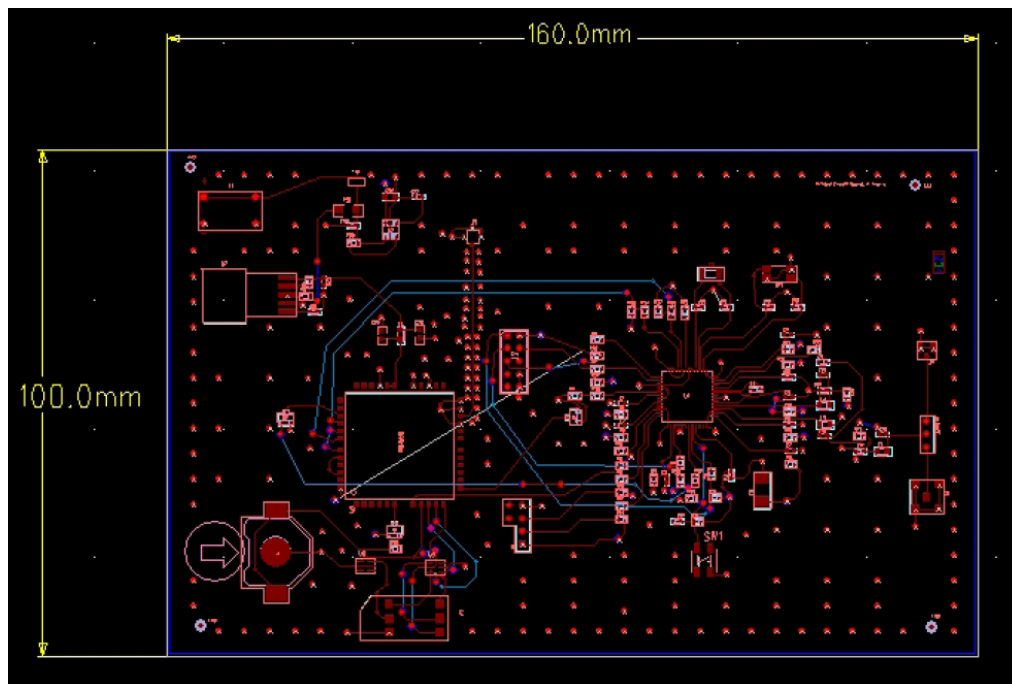


Kuva 16. Ohituskondensaattorin kytkentä piirin rinnalla.

Piirilevyjen kooksi suunniteltiin 160 mm x 100 mm, joka on nykyisen eurooppalaisen standardiformaatin, eli eurocard-kortin koko, kuvat 17 ja 18. Liitteessä 1 käy ilmi lojiikkakuvat WMobSlave-piirilevykortista ja liitteestä 2 WMobMaster-piirilevykortista. Piirilevyistä tehtiin yksi paneeli, jolla saatiin valmistusprosessissa aloituskustannukset vain yhteen piirilevyyn. Paneelissa piirilevyt piirrettiin samaan kuvaan, josta sen jälkeen tehtiin piirilevynvalmistuksessa tarvittavat dokumentit. Valmistuksessa tarvittiin seuraavia dokumentteja: kuviensiirtodokumentit, poraustiedot ja vetolista. Kuviensiirtodokumentissa esitellään kunkin kerroksen johdinkuvioita, suojapinnoitteita, merkintäpainatusta ja tinapastan levitystyökalua. Poraustiedot sisältävät porattavien reikien koordinaatit ja työkaluvaihtoehdot. Vetolistat ovat tarpeellisia piirilevyjen testausta varten.



Kuva 17. WMobSlave-layout suunnittelukuva.

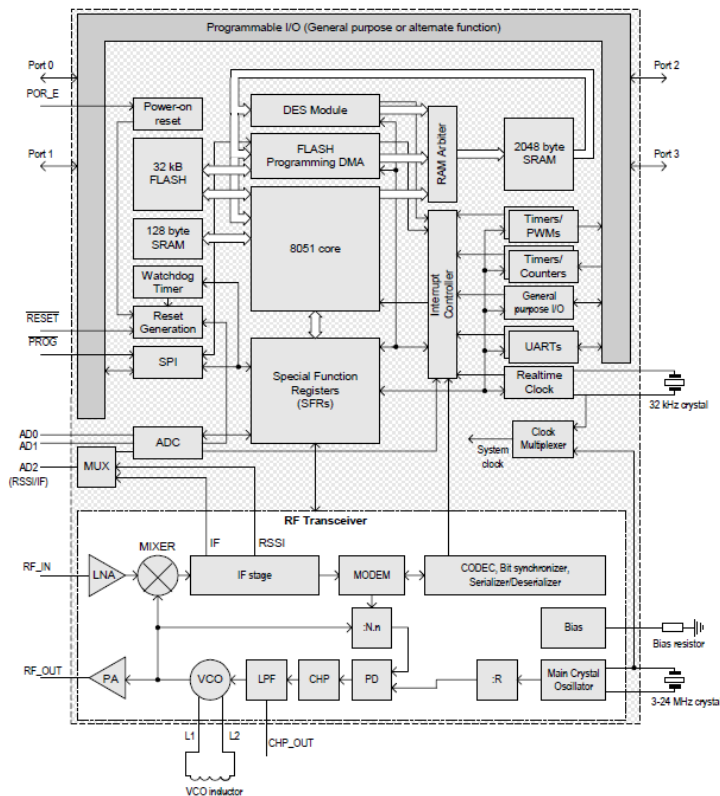


Kuva 18. WMobMaster-layout suunnittelukuva.

### ChipCon 1010 lähetin-vastaanotinpiiri

CC1010:ssä on integroitu 8051-perheen piiriin lähetin-vastaanotin-yksikkö, joissa on 32 kilotavua ohjelmoitava flash-muisti, kuva 17. Radiotaajuustunnistuksessa piiri voidaan ohjelmoida 300 – 1000 MHz:n taajuudelle. CC1010 ja muutamat passiiviset komponentit yhdessä muodostavat tehokkaan langattoman sulautettujen järjestelmien tiedonsiirron. /11/

CC1010:n tärkeimpiä ominaisuuksia ovat muun muassa 300 – 1000 MHz:n ohjelmoitava taajuus, alhainen virrankulutus 9,1 mA tiedon lähetyksessä sekä sen tiedonsiirtonopeus, joka on korkeimmillaan 76,8 kilobittiä sekunnissa. Lisäksi ulkoisten komponenttien määrä on pieni ja siinä on nopeasti asetettavissa vaihelukittu silmukka (Phase Locked Loop, PLL) taajuuden hyppelyä varten sekä vastaanotetun signaalin vahvuuden analysointi (RSSI). CC1010 lähetin- vastaanotinpiirissä on 32 kilotavua flash-muistia, 2048 + 128 tavua staattista suorasaantimuistia (Static Random Access Memory, SRAM) ja 3-kanavainen 10 bittinen analogia-digitaali-muunnin. Lisäksi siinä on neljä ajastinta, kaksi pulssimodulaatiolinjaa, kaksi sarjaporttiväylää, reaaliaikainen kello, rinnakkaisväyläliityntä ja 26 ohjelmoitavaa sisään - ulos-signaalia, kuva 19.



Kuva 19. CC1010 lohkokaaaviokuva. /11/

## 7 RFID

RFID, eli radiotaajuinen etätunnistus on menetelmä tiedon etälukuun ja -tallentamiseen käyttäen RFID-tunnisteita. RFID-tunnisteet ovat pieniä laitteita, jotka voidaan sisällyttää tuotteeseen jo valmistusvaiheessa tai liimata jälkikäteen tarrana. RFID-tunnisteet sisältävät antennin voidakseen lähettää ja vastaanottaa radiotaajuisia kyselyitä RFID-lähetin-vastaanottimelta.

Koska RFID-järjestelmistä erittyy säteilyä ympäristöön, niiden käyttö on viranomaisvalvonnan piirissä. Tämän vuoksi RFID-sovelluksiin käytettävissä olevat taajuusalueet sekä lukijoiden lähetystehot ovat viranomaismääräysten rajoittamia. Sovellettava taajuusalue vaikuttaa huomattavasti RFID-järjestelmän toimintaan ja suorituskykyyn.

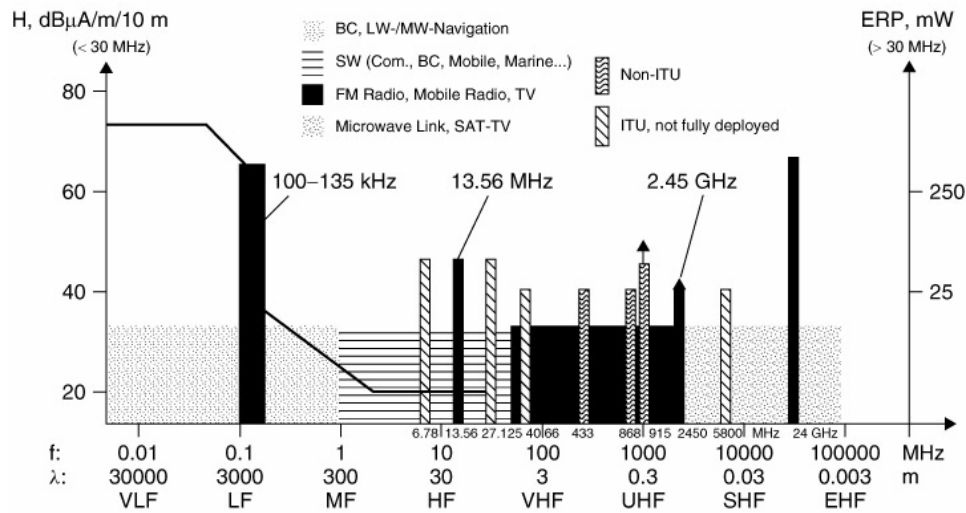
Standardoinnin puute on pitkään ollut RFID-tekniikan suurin este. Viime vuosina on panostettu paljon standardisointiin ja läpimurto saatiin vuoden 2004 lopussa, kun EPC Class 1 Gen 2 hyväksyttiin. Kesällä 2006 hyväksyttiin ISO-18000-6C-standardi, joka perustuu EPC Gen 2 -spesifikaatioon. Tämä parantaa järjestelmien yhteensopivuutta. Standardointityö ei ole vielä täysin valmis, esim. RFID-sovellusstandardeja on vielä työn alla. RFID:n kasvu on ollut hitaampaa kuin oli ennustettu, sillä monet yritykset



ovat lykänneet vielä tekniikan käyttöönottoa. Syitä tähän ovat muun muassa standardoinnin epävarmuus, tekniikan epäkypsyys (esimerkiksi ongelmia metallin ja nesteiden lähellä) ja pelko, että investoinnin takaisinmaksua ei saavuteta. Saattomuistien hinnat laskevat massavalmistuksella, mutta hinta voi silti olla liian korkea kuluttajapakkauksiin nähden. Näiden lisäksi syitä ovat tietoturva ja yksityisyyden suoja eli yksittäisten kuluttajien ostokäyttäytymisen ja ihmisten fyysisen seuraamisen mahdollisuus tuotetunnisteiden avulla, mikä askarruttaa tavallistakin kuluttajaa. Viivakoodi on käytössä logistiikassa vielä pitkään, joten teknologioiden läpimenokautena molempien tunnistustapojen on toimittava luotettavasti rinnakkain. /12/

Matalat taajuudet (125 kHz – 134 kHz ja 140 kHz – 148,5 kHz) ja korkea taajuus (13,56 MHz) ovat ainoita taajuuksia, joita voi käyttää globaalisti RFID-järjestelmissä ilman erikoislupia. Muut taajuudet ovat käytössä aluekohtaisesti. Esimerkiksi RFID-järjestelmien UHF-taajuutta ei ole standardisoitu globaalisti, vaan esimerkiksi Yhdysvalloissa käytetään vapaata taajuusalueita UHF-taajuudella toimiville RFID-järjestelmille. Samoin Japanissa käytetään eri taajuusalueita 952 MHz - 954 MHz. Teho sen sijaan on standardoitu UHF-taajuudella toimiville RFID-laitteille maksimissaan neljään wattiin Yhdysvalloissa, kun se taas Suomessa ja osassa Eurooppaa on kaksi wattia. Mikroaaltotaajuudella toimivien RFID-tunnisteiden taajuus on Euroopassa 2,45 GHz ja 5,8 GHz sekä teho 0,5 wattia, kun taas sisätiloissa säteilyteho saa olla neljä wattia. Standardin ISO 18000 eri osat pyrkivät määritellä taajuusalueita ja ilmarajapintoja RFID-järjestelmille, mutta valitettavasti sen osat eivät aina ole täysin yhteensopivia toistensa kanssa. /13,14,15/

RFID-järjestelmiä on maailmanlaajuisesti toteutettu pääasiassa neljällä erilaisella taajuusalueella: Alle 135 kHz taajuuksilla, 13,56 MHz:n taajuudella, UHF-taajuuksilla (433 - 928 MHz), ja mikroaaltotaajuudella (2,45 GHz), kuva 20. Yleisperiaatteena eri taajuusalueiden RFID-sovelluksista voidaan sanoa, että mitä korkeampaa taajuusalueita käytetään, sitä nopeampaan tiedonsiirtoon tunnisteiden ja lukulaitteen välillä päästään. Lisäksi taajuusalueen kasvaessa yleensä myös järjestelmän lukuetaisyys kasvaa.



Kuva 20. RFID-järjestelmissä toimivat taajuusalueet mustalla värillä korostetuna. /16/

### Passiivinen tunnistus

Virransaannin mukaan jaotelluista tunnistuksista passiiviset tunnistukset ovat suosituimpia koska ne ovat yksinkertaisia ja täten halpoja sekä kestäviä, sillä niissä ei ole paristoa, jonka tyhjeneminen lopettaisi tunnistuksen toiminnan. Tunnistukset saavat kaiken tarvitsemansa energian lukulaitteen lähettämästä sähkömagneettisesta kentästä. Tästä syystä tunnistuksen lukeminen on hitaampaa kuin aktiivisen tunnistuksen, sillä tunnistuksen on kerättävä tarpeeksi energiaa toimintansa käynnistämiseen ennen kuin sen kanssa voidaan kommunikoida. Samoin lukuetaisyydet ovat lyhyemmät kuin aktiivisilla tunnistuksilla, sillä lukulaitteesta saatavan energian määrä pienenee etäisyyden kasvaessa ja jossain vaiheessa virta ei enää riitä tunnistuksen toimintaan.

### Aktiiviset tunnistukset

Aktiiviset tunnistukset sisältävät oman virtalähteen eivätkä lukijalaitteen signaalia omassa virransaannissa lainkaan. Koska tunnistuksen ei tarvitse saada toiminnassaan tarvittavaa virtaa lukulaitteen signaalista, voi se kommunikoida lukulaitteen kanssa suuremmilla etäisyyksillä kuin passiivinen tunnistus. Tunnistuksen omaa virtalähdettä voidaan hyödyntää kommunikoinnin lisäksi muuhunkin toimintaan. Tällainen tunnistus voi sisältää vaikkapa ympäristöään havainnoivia antureita. Antureista saatava tieto tallennetaan tunnistuksen muistiin ja lukulaite lukee tiedot muistista tunnistuksen saavuttua sen läheisyyteen. Aktiivisten tunnistusten huonoja puolia ovat hinta sekä pariston kesto. Koska aktiiviset tunnistukset ovat monimutkaisempia kuin passiiviset, on niiden hinta moninkertainen. Aktiivinen tunnistus on riippuvainen paristostaan joka tyhjenee ajan kuluessa. Näin ollen aktiivisen tunnistuksen käyttöikä ei ole yhtä suuri kuin passiivisen.

## **Semipassiiviset tai semiaktiiviset tunnisteeet**

Semipassiiviset tai semiaktiiviset tunnisteeet sisältävät oman virtalähteen, mutta ne hyödyntävät myös lukulaitteen signaalia virran saantiin. Nämä tunnisteeet käyttävät kommunikointiin lukulaitteen signaalia aivan kuten passiivisetkin tunnisteeet, mutta käyttävät sen lisäksi omaa virtalähdettä muussa toiminnassaan. Syynä voi olla se, että tunnistee havainnoi ympäristöä anturien avulla keräten siitä tietoa tai sitten oman virtalähteen avulla kasvatetaan lukuetaisyysksiä siten että tunnistee käyttää lukulaitteen signaalia ainoastaan kommunikointiin, mutta muut toiminnot suoritetaan oman virtalähteen avulla. Tällöin lukulaitteen signaalista ei tarvitse saada niin paljoa energiaa kuin täysin passiivisen tunnisteen tapauksessa.

### **7.1 RFID-tunnisteiden ominaisuudet**

Tunnisteeet voidaan jaotella ominaisuuksiensa mukaan eri luokkiin. Yksinkertaisimmillaan RFID-tunnistee ei sisällä mitään tietoa, ainoastaan tunnisteen olemassaolo voidaan havaita. Tunnistee voi myös olla vain luettavaa tyyppiä. Tällöin tunnistee sisältää ainoastaan sarjanumeron, jota ei voi muokata. Monipuolisempien tunnisteeiden tietosisältöä voi myös muokata. Nämä tunnisteeet voivat myös sisältää erilaisia tietoturvaominaisuuksia.

#### **1-bittinen piiri**

Yksinkertaisin RFID-piiri on niin sanottu 1-bittinen piiri. 1-bittinen piiri ei sisällä varsinaisesti tietoa, kuten sarjanumeroa, vaan ainoastaan sen olemassaolo lukijalaitteen läheisyydessä voidaan havaita. Koska 1-bittinen piiri ei sisällä sarjanumeroa tai muuta tunnistetietoa, ei sitä useinkaan käsitellä RFID-tekniikan osana. 1-bittisen piirin havaitseminen toimii yksinkertaisena esimerkkinä passiivisen piirin ja lukulaitteen välisestä langattomasta kommunikaatiosta ja näin ollen sen toiminnan ymmärtäminen auttaa ymmärtämään monimutkaisempia RFID-piirejä. Piirin havaitseminen tapahtuu siten, että: Lukijalaite luo muuttuvan magneettikentän tunnisteeelle. Kun luettava tunnistee on riittävän lähellä lukulaitetta, sen kelaan indusoituu jännite. Mikäli piirin resonanssitaajuus on sama kuin lukijalaitteen lähettävä taajuus, alkaa se värähdellä. Tämä ilmenee lukijalaitteen kelan jännitteen tippumisena.

Lukijalaite ei itse asiassa lähetä vakiotajuutta, vaan se käy tietyn taajuusalueen läpi alarajasta ylärajaan. Kun muuttuva taajuus osuu samaksi kuin tunnistettavan piirin resonanssitaajuus, tippuu lukijalaitteen kelan impedanssi. Kelan impedanssi on vakio läpi käytävällä taajuusalueella lukuun ottamatta luettavan piirin resonanssitaajuutta. Luetta-

van piirin olemassaolo havaitaan siis lukijan antennin jännitteen putoamisena luettavan laitteen värähtelytaajuudella. Koska impedanssin putoaminen on todella pieni, on sen havaitseminen vaikeaa. Luettava piiri voidaankin havaita helpommin siten, että: Luettavassa laitteessa on antennin ja kondensaattorin kanssa kytketty vielä rinnan vastus, joka voidaan kytkeä päälle tai pois. Kun tätä vastusta kytketään päälle ja pois tietyllä taajuudella,  $f_s$ , voidaan tämä havaita lukijalaitteessa. Lukijalaitteen antennin impedanssissa tapahtuvat muutokset samalla taajuudella, jolla vastusta kytketään päälle ja pois. Tällöin kantoaallon rinnalle muodostuu alikantoaallot taajuudelle  $\pm f_s$ . Nämä voidaan suodattaa kaistanpäästösuotimilla ja näin ollen havaita huomattavasti helpommin kuin muutokset antennin jännitteessä lähetystaajuudella. Samalla periaatteella voidaan lukea myös monimutkaisempaa tietoa sisältäviä piirejä. Mikäli taajuutta  $f_s$  ei käytetäkään jatkuvasti, vaan pätkittäin, voidaan sen avulla siirtää tietoa luettavasta tunnisteesta lukijalle. /16/

### **Muistit**

Tunnisteissa käytettävät muistityypit vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Järjestelmissä, joissa ei ole tunnisteiden uudelleenohjelmointimahdollisuutta, eli kirjoitusoptiota, lyhyt tunnistus- tai sarjanumero kirjoitetaan tunnisteeseen muistiin valmistusvaiheessa. Näissä käytettävä muisti on lukumuistia (Read Only Memory, ROM). Uudelleenkirjoitettavia tunnisteita käytettäessä lukijalla on kolme erilaista tapaa halutun informaation kirjoittamiseksi tunnisteeseen. Yleisin tapa on käyttää sähköisesti tyhjennettävää muistia (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, EEPROM). Tämän muistityypin haittana on kuitenkin suuri virrankulutus kirjoitusvaiheessa sekä rajallinen kirjoitusoperaatioiden määrä (100 000 – 1 000 000 kpl). Rautamagneettinen suorasaantimuisti (Ferromagnetic Random Access Memory, FRAM) sen sijaan kuluttaa kirjoitusvaiheessa virtaa noin 20 % vähemmän kuin EEPROM ja kirjoitusaikakin on huomattavasti lyhyempi. FRAM-muistin yleistyminen on ollut vielä hidasta, sillä se on hankala valmistaa. Kolmas tapa on käyttää staattista suorasaantimuistia (Static Random Access Memory, SRAM), jolla kirjoitusvaiheet ovat erittäin nopeita. SRAM vaatii jatkuvaa virransyöttöä, joten tunnisteeseen on liitettävä myös paristo. /16/

### **Vain luettavat muistit (read only)**

Tietoa sisältävistä tunnisteista vain luettavat muistit (read only) ovat yksinkertaisimpia ja samalla myös halvimpia vaihtoehtoja. Tunniste sisältää ainoastaan sarjanumeron, jonka perusteella se voidaan tunnistaa. Sarjanumero on talletettu tunnisteeseen mikropiirille sen valmistusvaiheessa, jonka jälkeen sitä ei voida enää muuttaa. Kun tällainen tunniste

saapuu lukijan läheisyyteen, se alkaa välittömästi lähettää sarjanumeroaan. Tunniste lähettää tätä sarjanumeroa jatkuvasti, niin kauan kun se on lukijan läheisyydessä.

Tällaiset tunnisteet ovat yksinkertaisuudestaan johtuen halpoja valmistaa ja tästä syystä niitä käytetään sovelluksissa, jossa halpa hinta on ensisijaisen tärkeää ja tunnisteiden ei tarvitse sisältää muuta tietoa kuin sarjanumero. Useissa sovelluksissa pelkkä sarjanumero riittää, sillä tunnisteeseen liittyvät muut tiedot voidaan tallentaa tietokantaan, josta ne voidaan tarvittaessa hakea.

### **Luettavia ja kirjoitettavia (read write)**

Luettavia ja kirjoitettavia tunnisteita löytyy erikokoisilla muisteilla varustettuina alkaen tavusta useisiin kilotavuuihin. Tietojen lukeminen ja kirjoittaminen tapahtuvat useimmiten lohkoissa. Kun lohkon sisältöä halutaan muokata, luetaan sen sisältö ensin lukulaitteen muistiin, tehdään siihen halutut muutokset ja lopulta muokattu lohko lähetetään takaisin tunnisteeseen, jossa se kirjoitetaan muistiin. Nykyjärjestelmissä lohkojen koko vaihtelee kahden ja 16 tavun välillä. Yleensä nämäkin tunnisteet sisältävät normaalin käyttäjän muokattavissa olevan muistin lisäksi jo tehtaalla asetetun sarjanumeron, jota käyttäjä ei pääse muokkaamaan, vaan ainoastaan lukemaan. Tällaisia tunnisteita käytetään silloin kun tunnistettavaan kohteeseen liittyvät tiedot halutaan lukea suoraan tunnisteelta eikä erillisestä tietojärjestelmästä. Erillisen tietojärjestelmän käyttö ei aina ole tarpeellista ja tallennettaessa tiedot suoraan tunnisteeseen, voidaan järjestelmän rakennetta yksinkertaistaa. Osa tunnisteista sisältää vielä lisää ominaisuuksia tietojen suojaamiseksi ja tietojen luvattoman lukemisen estämiseksi. Luettavia ja kirjoitettavia tunnisteita käytetään, kun tunnisteet itsessään sisältävät tietoa jonka muokkaaminen tai päätyminen väärin käsiin halutaan estää. Ominaisuuksien lisääntyessä myös tunnisteiden hinta kasvaa. Tästä syystä yleensä halutaan käyttää mahdollisimman yksinkertaisia tunnisteita.

### **Radiotaajuuden vaimeneminen**

Ilmarajapinta, kuten mikä tahansa muukin rajapinta, aiheuttaa vaimennusta lähetettyyn signaaliin. Vapaantilan vaimennuksen tapauksessa, jossa lähetin ja vastaanotin ovat esteettömästi näköyhteydessä toisiinsa voidaan radiotien aiheuttama vaimenema  $L$  laskea seuraavasta kaavasta. Kaavassa  $l$  on lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys,  $\lambda$  lähetteen aallonpituus,  $f$  lähetteen taajuus sekä  $c$  valon nopeus tyhjiössä, kuva 21.

$$L = \left( \frac{4\pi l}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi f l}{c} \right)^2$$

Kuva 21. Vapaan tilan radiontienvaimennus. /17/

Puhdas heikkeneminen on vain yksi tekijä signaalin vaimentumisessa. Suuret esteet kuten talot ja mäet aiheuttavat heijastumia signaaliin. Heijastumat aiheutuvat siten muuten tasaiseen siirtolinjaan tulevasta epäjatkuvuuskohdasta tai epäpuhtaudesta. Hyötysignaalin amplitudi heikkenee ja heijastunut aalto syntyy, kun signaali törmää epäjatkuvuuskohtaan. Signaali voi myös siirtää kohdatessaan esteen tai tiheyden muutoksen matkalla lähettimestä vastaanottimeen. Sironnassa signaali muuttaa suuntaansa ja mahdollisesti energiaansa kohdatessaan esteen. Sironnan voimakkuus ja suunta riippuvat signaalin taajuudesta sekä kappaleen koosta ja muodosta. Diffraktoituminen tapahtuu signaalin kohdatessa sopivan raon, kiteen tai vain sopivan kappaleen reunan. Vaikka diffraktiota tapahtuu aina, kun signaali törmää esteeseen, on ilmiö voimakkaimmillaan silloin kun esteen tai raon koko on suhteellinen saapuvan signaalin aallonpituuteen. Diffraktiossa signaali taipuu poiketen alkuperäisestä kulkusuunnasta. Johtuen heijastumisesta, sironnasta ja diffraktiosta, lähetetty signaali kulkee monia eripituisia reittejä pitkin lähettimestä vastaanottimeen. Jokainen eripituista reittiä kulkenut signaali on hieman vaiheelltaan ja viiveeltään muuttunut kopio alkuperäisestä signaalista. Ilmiötä kutsutaan monitie-etenemiseksi ja sillä on kaksi haitallista vaikutusta: Interferenssi ja symbolien välinen keskinäisinterferenssi (Inter-Symbol Interference, ISI). Vastaanotettu signaali on siis aina summa eri reittejä kulkeneista signaaleista. Nämä signaalit voivat vahvistaa tai heikentää toisiaan. Ilmiöstä käytetään nimitystä konstruktiiivinen ja destruktiivinen interferenssi. ISI:ssa monitie-etenemisestä johtuen vastaanottimeen pidempää reittiä saapunut symboli menee päällekkäin myöhemmin lähetetyn symbolin kanssa. Toisin sanoen, signaali alkaa häiritä itseään. Ilmiötä voidaan parhaiten hallita lisäämällä vastaanotimen päähän ohjelmoitava ekvalisaattori. Ekvalisaattori korjaa vastaanotinta datan joukossa lähetetyn, ennalta tiedetyn sekvenssin perusteella adaptoitumalla ympäristön aiheuttamiin muutoksiin. /17/

## 8 Tiedonsiirto

Tiedon- ja energian siirron ajoittamiseksi passiivisen tunnisteiden ja lukulaiteiden välillä on kolme eri vaihtoehtoa: half duplex, full duplex ja vuoroittainen tiedonsiirto. Nämä eroa-

vat toisistaan sen mukaan, kuinka tiedon siirtovuorot määräytyvät ja miten tunnisteiden tarvitsema energia lähetetään sille. Half duplex-tilassa tiedonsiirto lukulaitteesta tunnisteeseen tapahtuu eri aikaan kuin tiedonsiirto tunnisteesta lukulaitteeseen. Lukulaite ja tunniste siis vuorottelevat lähetyksvuoroja. Lukulaite lähettää kuitenkin kantaaltoa jatkuvasti, jotta tunniste saa siitä energiansa. Kuvasta 22 nähdään half duplex-tiedonsiirron toimintaperiaate. Energian siirto on tauotonta, kun taas tiedonsiirto tapahtuu vuorotellen.



Kuva 22. Tiedonsiirto half duplex periaattella.

Full duplex tilassa toimivassa järjestelmässä tietoa voidaan siirtää sekä lukulaitteelta tunnisteelle, että tunnisteelta lukulaitteeseen yhtä aikaa. Tällöin tiedonsiirto tunnisteelta lukulaitteelle tapahtuu eri taajuudella kuin tiedonsiirto lukulaitteelta tunnisteelle. Tunnisteiden lähetystaajuus voi olla jokin lukulaitteen taajuuden kerroin tai täysin itsenäinen taajuus, kuva 23.



Kuva 23. Tiedonsiirto full duplex periaatteella.

Vuoroittaista tiedonsiirtoa käytettäessä tiedonsiirto lukulaitteelta tunnisteelle ja tiedonsiirto tunnisteelta lukulaitteelle tapahtuu myös eri aikaan. Tällaisessa järjestelmässä lisäksi energian siirto katkeaa tunnisteiden lähettäessä tietoa, eli lukulaite ei lähetä minäänlaista signaalia tunnisteiden lähettäessä tietoa. Tällöin tunniste toimii tietoa lähettäessään varastoimansa energian varassa, ja näin ollen sen on varastoitava riittävästi energiaa lukulaitteen signaalista omaa lähetyksvuoroaan varten, joka kuvasta 24 nähdään.



Kuva 24. Vuoroittainen tiedonsiirto ajoitusta käyttäen.

## 9 Langattoman tiedonsiirron tehostaminen

Ilmarajapinnan käyttöä voidaan tehostaa langattomassa tiedonsiirrossa kanava- ja linjakoodauksella, antenni- ja modulaatiotekniikoilla sekä virheenkorjauksella ja -tunnistamisella. Seuraavissa käydään läpi periaatteet näiden tekniikoiden toteuttamiseen.

### Kanavakoodattu tiedonsiirto

Kanavakoodauksella tarkoitetaan tyypillisesti toistokorjausta ja bittien lomitusta. Toistokorjauksessa lähetteeseen lisätään ylimääräisiä bittejä, joiden avulla siirron aikana lähetteeseen aiheutuneet virheet voidaan havaita ja korjata. Lisättävät bitit kaventavat hyötykuorman tiedonsiirtokaistaa, mutta vähentävät tarvetta tiedon uudelleenlähetykselle. Tehokkaimmillaan toistokorjaus on suhteellisen suurikaistaisilla ja pitkälataenssisilla yhteyksillä kuten satelliittiyhteyksissä, joissa pitkät välimatkat aiheuttavat väistämättä suuren viiveen signaaliin. Toistokorjausta käytetään kuitenkin lähes kaikissa tiedonsiirtoyhteyksissä sekä datatallenteissa. Toistokorjauksen ohella yksinkertaisempi tapa tiedonsiirron tehostamiseen on virheentunnistus. Tyypillisesti virheentunnistus toteutetaan kuten toistokorjauksessa, lisäämällä bittejä lähetteeseen. Lisätyt bitit ovat tarkiste lähetetylle datalle. Tarkisteeksi voidaan esimerkiksi määrittää lähetepurskeen bittien summa. Vastaanottimessa lähetteen bitit lasketaan yhteen ja verrataan tulosta vastaanotettuun tarkisteeseen. Jos tulokset eriävät, lähetetään uudelleenlähetyspyyntö lähettäjälle. Tunnetuin virheentunnistusalgoritmi on CRC (Cyclic Redundancy Check), jossa lähetteen tarkisteen muodostaa siirrettävän datan ja ennalta valitun polynomin jakojäännös. Suosittu CRC-algoritmi on CRC-16, jossa jakajapolynomi on kuvattu seuraavasti:  $P(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$ . Toisin sanoen, 17 bittiä pitkän tarkisteen kaksi ensimmäistä, kolmanneksi viimeinen ja viimeinen bitti, ovat arvoltaan 1. Loput bitit ovat arvoltaan 0.

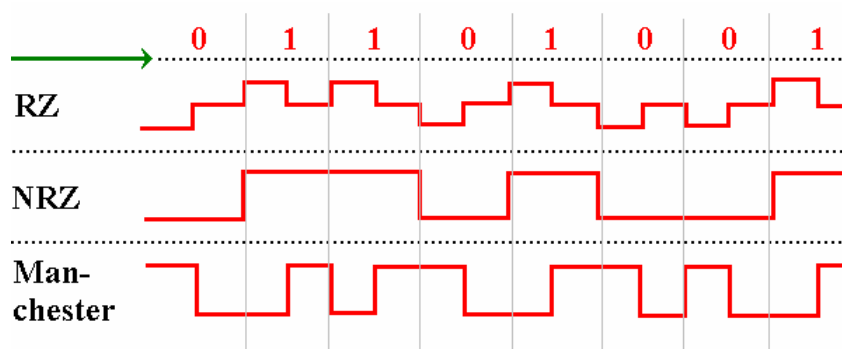
/18/

### Linjakoodattu tiedonsiirto

Linjakoodauksella määritetään tiedon muoto siirtotiellä. Käytännössä linjakoodauksella määritetään fysikaaliset suureet digitaalisen tiedon lähettämiksi tiettyä rajapintaa hyödyntäen. Toisin sanoen määritetään loogiset 1:t ja 0:t tietyiksi, tyypillisesti jännitearvoiksi. Muita tavoitteita linjakoodaukselle ovat epäsuotuisan tasavirtakomponentin poistaminen, kellopulssin johtaminen datavuosta ja pieni kaistanleveyden tarve. Digitaalisessa tiedonsiirrossa pyritään pitämään signaalien nousevat ja laskevat reunat mahdollisimman jyrkkinä kuin mahdollista. Tällöin aika, jolloin signaali on epämääräisessä tilas-



sa on mahdollisimman pieni. Yksinkertaisin tapa koodata johtimessa kulkeva bittivirta on NRZ-koodaus (Non-Return to Zero). NRZ-koodauksessakin jännitteen arvo on vakio bitin keston ajan. Lisäksi sekä 0- että 1-biteillä on omat jännitetasonsa. NRZI-koodaus (Non-Return-to-Zero Inverted) on muunnelma NRZ-koodauksesta. Tässä kuten NRZ-koodauksessa, jännitetaso pysyy vakiona bitin keston ajan. Tieto esitetään siten, että tason muuttuessa alkaa 0-bitti, ja tason säilyessä ennallaan alkaa 1-bitti, joten NRZI seuraa jännitteen tasojen sijasta niiden muutoksia. NRZ:n ongelmana ovat pitkät nolli- ja ykkössarjat, joiden aikana tahdistus helposti katoaa. Lisäksi vastaanottajan on vaikea erottaa pitkää nollasarjaa ja kuollutta linkkiä toisistaan. Pitkät ykkössarjat taas nostavat koko signaalin keskiarvoa, jonka perusteella vastaanottaja tekee eron ykkös- ja nollassignaalien välille. Manchester-koodaus kuuluu binääriseen kaksivaihemodulointi (biphase) -menetelmiin, joille on yhteistä se, että ne tarjoavat menetelmän, jolla kellopulssi voidaan muodostaa sisään tulevasta bittivirrasta. Jos lähetettävä bitti on 0, muuttuu tila nousevasti (alhaalta ylös), ja jos lähetettävä bitti on 1, muuttuu tila laskevasti (ylhäältä alas). Manchester-koodauksessa tarvitaankin yhden bitin siirtämiseen enimmäkseen kaksi tilamuutosta linjalla ja tämä kasvattaa siirrettävän signaalin tarvitsemää kaistanleveyttä. Kuva 25 esittää erot RZ:n, NRZ:n ja Manchester-koodauksien välillä. /18/



Kuva 25. RZ-, NRZ- ja Manchester -koodaustekniikoiden erot. /18/

## 9.1 Antennitekniikka

Nykyajan lähettimet olettavat, että antennipistokkeessa on 50 ohmin vastus lähtevälle radioaallossa. Tästä syystä sekä käytettävän kaapelin että antennin tulee olla 50 ohmista. Koaksiaalikaapelit täyttävät tämän ehdon, mutta avosyöttöjohdon kohdalla tarvitaan erikoisjärjestelyjä. Jos antennin vastus ei ole 50 ohmia, osa radioaallosta heijastuu takaisin kaapeliin ja summautuu vastaantulevaan radioaaltoon. Näin kaapeliin syntyy seisova aalto eikä lähetin näe kaapelia ja antennia 50 ohmisena.

Antennitekniikan oikealla valinnalla saavutetaan olosuhteisiin nähden paras kantama, vastaanottoherkkyys ja tehonkäyttö. Antennitekniikan valinnassa olennaisia tekijöitä ovat antennin tyyppi, käytettävissä oleva teho ja taajuusalue. Antennisuunnittelun lähtökohtana voidaan pitää antennin pituutta, jonka tulee tavallisessa maatasoantennissa olla vähintään  $\frac{1}{4}$  käytettävän taajuusalueen aallonpituudesta. Antennin suunnittelu tiettyyn tarpeeseen on erittäin monimutkainen prosessi, jonka parametreina ovat muun muassa aallon pituus, resonointitaajuus, impedanssi, vahvistus, apertuuri, polarisaatio ja kaistanleveys. Aallonpituus on erittäin tärkeä mitta antennisuunnittelussa. Aallonpituus tarkoittaa nimensä mukaisesti yhden värähdyksen eli aallon pituutta metreinä.

Aallon pituus metreinä lasketaan alla olevalla kaavalla 12.

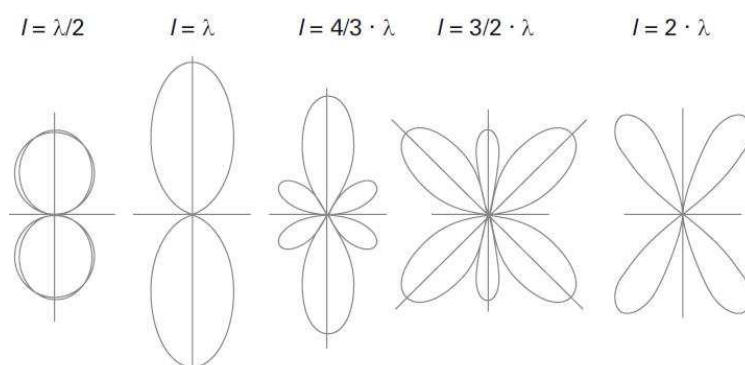
$$\lambda = 300 : f \quad (12.)$$

$\lambda$  = aallon pituus metreinä (lambda)

f = taajuus megahertseinä (MHz)

Näin ollen 433 MHz:n taajuusalueella toimivan antennin pituus lasketaan seuraavasti:  $300 : 433 \text{ MHz} = 0,6928406 \lambda / \text{m}$ . Saatu aallonpituus  $0,6928406 \lambda / \text{m}$  jaetaan neljällä saadaan likiarvo 0,1732 m. 433 MHz:n taajuusalueella toimivan antennin täytyy olla noin 17 cm pitkä.

Dipoliantenni on yleisin antennityyppi vastaanotettaessa UHF-taajuuksia. Yksinkertaisimmillaan dipoliantenni koostuu kahdesta neljännesaallon pituisesta johtimesta, jotka on kiinnitetty toisesta päästä koaksiaalikaapeliin ja toisesta ovat avoimia. Johdin on kiinni koaksiaalisen vaipassa ja toinen johdin keskijohdossa. Dipolin säteilykuvio muuttuu johtimen pituuden mukaan. Dipolin johtimen pidentyessä säteilykuvio muuttuu litistyneemmäksi ja pidempien johtimien kuviossa on sivukeiloja, kuva 26. /19/



Kuva 26. Dipoliantennin suuntakuviot johtimen pituuteen verrattuna /19/

Dipoliantenni on symmetrinen akselinsa suhteen, joten sen säteilykuvio on ”donitsin” muotoinen. Dipoliantennissa virta osoittaa aina pois päin akselista, joten se ei säteile joh-

timen päästä vaan johtimen koko matkalta. Kuuluvuuden parantamiseksi dipoli rakennetaan heijastavaan paneeliin, joka on asennettu puoliaallon mitan päähän dipolista. Tämä ratkaisu parantaa myös dipoliantennin laajakaistaisuutta. /19/

Tässä tutkimuksessa käytettiin kahta erilaista dipoliantennia: piiska- ja tasoantennia, kuvat 27 ja 28.



Kuva 27. WMob-järjestelmän tasoantenni. Kuva 28. WMob-järjestelmän piiska-antenni.

Antennien vahvistuksen määrittämiseen voidaan olettaa, että anteeniin syötetty teho on  $P$  ja antenni on ns. isotrooppinen antenni, eli säteilee samalla tavalla kaikkiin suuntiin. Tällaista antennia ei todellisuudessa voida valmistaa, mutta sitä käytetään yleisesti mallina teoreettisissa tarkasteluissa. Oletetaan isotrooppinen antenni sijoitetuksi  $r$ -säteisen pallon keskipisteeseen. Pallon pinta-ala on  $A=4\cdot\pi\cdot r^2$ . Tehotiheys  $S$  pallon pinnalla on siten:

$$S = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (13.)$$

Todellisen antennin tuottama tehotiheys vaihtelee suunnasta riippuen. Jos merkitään  $S$ =antennin tuottama keskimääräinen tehotiheys etäisyydellä  $r$  ja  $S_{\max}$  antennin tuottama maksimaalinen tehotiheys samalla etäisyydellä, määritellään antennin suuntaavuus  $D$  seuraavasti:

$$D = \frac{S_{\max}}{S} \quad (14.)$$

Edelleen määritellään antennin vahvistus  $G$  seuraavasti:

$$G = \frac{S_{\max}}{S} \quad (15.)$$

Vahvistuksen kaava pätee vain ideaaliselle, häviöttömälle antennille. Jos antennin hyötysuhde, eli säteilyn tehon suhde antenniin syötettyyn tehoon on  $\eta$ , on häviötehon osuus vähennettävä antenniin syötetystä tehosta. Kaava 16 saa tällöin muodon:

$$G = \eta \frac{S_{\max}}{S} \quad (16.)$$

Antennien vahvistus ilmoitetaan useimmiten desibeleinä:

$$G = 10 \log \frac{\eta S_{\max}}{S} \text{ dB} \quad (17.)$$

Integraalilaskennalla voidaan osoittaa, että puoliaaltodipolin vahvistus on 2,15 dB. /19/ Tutkimuksessa käytettyjen dipoliantennien vahvistukset olivat enimmillään 3dB.

Antennin tehollisella apertuurilla  $A_{\text{eff}}$ , joka saadaan kaavasta 18,

$$A_{\text{eff}} = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (18.)$$

tarkoitetaan sitä pinta-alaa jolla antenni kytkee tehoa tulevasta RF-aallosta kuormaan. Yhtälössä 18 esiintyvä  $G$  on antennin vahvistus ja  $\lambda$  on aallonpituus. /19/

Antennin polarisaatiolla tarkoitetaan sähkökentän voimakkuusvektorin suuntaa antennin läheisyydessä. Jos antenni on sijoitettu vaakasuuntaisesti, se kehittää vaakapolaroidun lähetteen. Jos antenni on asennettu pystysuuntaisesti, on lähete vastaavasti pystypolaroitu. Vastaanotossa vaakasuuntaisesti asennettu antenni ottaa parhaiten vastaan vaakapolaroitua lähetettä ja pystysuuntaisesti asennettu pystypolaroitua lähetettä. Sekä vaakapolaroitu että pystypolaroitu lähete ovat erikoistapauksia ympyräpolaroidusta lähettestä. Tässä lähetelajissa sähkökentän voimakkuusvektori kiertää antennista edettäessä ympyrän kehää siten, että vektorin kärki sijaitsee ruuviviivalla. Kiertosuunta voi olla joko myötäpäiväinen tai vastapäiväinen. Ympyräpolarisaatio saadaan syntymään esimerkiksi kahdella 90 asteen kulmaan toisiinsa nähden sijoitetulla puoliaaltodipolilla, joiden syötökaapelit vaiheistetaan sopivasti (ns. ristidipoli). /19/

## 9.2 RFDI-tunnistuksen hyödyt

RFID-tunnistuksen suurimmat hyödyt ovat teknologiset ja tiedon lisäämisen kautta saatavat hyödyt, joita ovat muun muassa tavaroiden ajantasainen seuranta ja jäljitettävyyden eli läpinäkyvyys toimitusketjussa ja prosessien automatisointi ja tehostaminen. RFID-teknologiassa lukijan ja saattomuistin välille ei tarvita näköyhteyttä ja yhdellä lukemi-

sella voidaan tunnistaa useampi kolli kerrallaan, lisäksi voidaan estää tai vaikeuttaa vääräntämistä, hävikkiä voidaan pienentää, takaisinkutsut saadaan kohdistettua jopa kappaletasolle ja organisaation tuottavuus paranee.

## **10 Yksityisyys ja tietoturva**

RFID-tunnisteita käytetään monenlaisiin käyttötarkoituksiin. Tunnisteiden sisältämät tiedot saattavat olla sellaisia, että niiden asiaton lukeminen tai muokkaaminen olisi syytä estää. Tunnisteen tietosisällön lukemisen estämisellä voidaan estää tunnisteen kopiointi. Tietosisällön muokkaamisen estäminen on tärkeää esimerkiksi RFID-tekniikkaa hyödyntävissä pääsylipuissa, jolloin lipun käyttäminen useaan kertaan estetään. Lukemisen ja muokkaamisen estämisen tarkoituksena on yleensä tunnisteita hyödyntävien tahojen etujen suojaaminen. Tunnisteita käytettäessä otettava huomioon myös yksityishenkilöt, joiden haltuun tunnisteet tai tunnisteita sisältävät tuotteet lopulta päätyvät. Loppukäyttäjien osalta on otettava huomioon heidän yksityisyytensä suojaaminen. Koska RFID-tunnisteet voidaan etälukea ilman näköyhteyttä, mahdollistavat ne tunnisteiden ja sitä kautta tunnisteen omistavan henkilön seuraamisen.

### **Tekniikat yksityisyyden suojaamiseksi**

RFID-tekniikkaa voidaan käyttää monella tapaa loukkaamaan käyttäjänsä yksityisyyttä. Tästä syytä onkin kehitetty erilaisia menetelmiä, joilla tunnisteen luvaton lukeminen voidaan estää ja näin varjella tunnisteen omistajan yksityisyyttä.

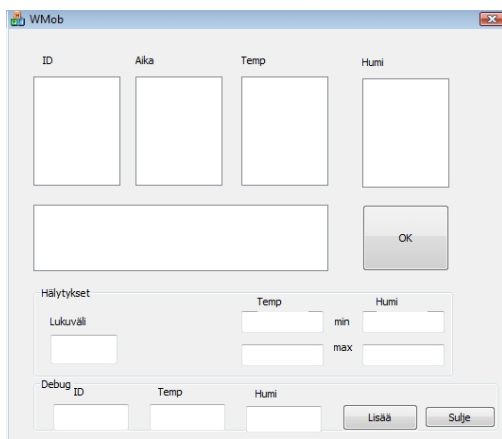
### **Tunnisteen lopettaminen**

Joillekin tunnisteille on mahdollista antaa käsky, jolla ne lopettavat itsensä. Tämän jälkeen tunniste ei toimi enää millään lailla, eikä sitä ole mahdollista herättää uudestaan henkiin. Tämän menetelmän tarkoituksena on lopettaa tunniste kun kuluttaja on ostanut ja maksanut RFID-tunnisteella varustetun tuotteen. Lopettamiskäsky vaatii itse käskyn lisäksi salasanan, jolla estetään luvaton tunnisteen tuhoaminen. Kun tunniste on tuhottu, ei sitä voi enää havaita lukulaitteella ja näin ollen kuluttajan yksityisyys ei ole enää uhattuna. Tunnisteen tuhoamisen huonona puolena on, että tuhoamisen jälkeen tunnistetta ei voida enää käyttää uudelleen. /20/

## **11 WMob-käyttöliittymä suunnittelu**

Tämän tutkimuksen toteuttamiseen tarvittava käyttöliittymä suunniteltiin Visual Studio 2008 -kehitysversion käyttäen. Käyttöliittymässä näytetään WMobMaster-

piirilevykortilta RS 232-sarjaväylällä lähetettyä lämpötilatietoa, joka analysoidaan, jos on tapahtunut käyttöliittymään asetettujen raja-arvojen ylitys tai alitus, ilmoitetaan siitä käyttöliittymäikkunan hälytyslohkossa. Käyttöliittymä rekisteröi sarjaväylältä tulevat lämpötilatiedot ja tallettaa ne tekstitiedostoon, kuva 29.



Kuva 29. WMob-käyttöliittymäikkuna.

### 11.1 RS 232-rajapinta

RS 232-sarjaväylää käytetään kahden tietokonelaitteen väliseen liikennöintiin, jossa siirrettävä data liikkuu bitti kerrallaan peräkkäin. Kun käytetään sarjaporttia vain kahden erillisen laitteen väliseen kommunikointiin, siten ettei modeemia käytetä (Null Modem), tarvitaan vain kolme johdinta. Lähtevä data (Transmit Data, TD), tuleva data (Receive Data, RD) ja signaalimaa (Signal Ground, SG), taulukko 2.

Taulukko 2. Null Modem liitäntä.

D9	D25				D25	D9
3	2	TD	→	RD	3	2
2	3	RD	←	TD	2	3
5	7	SG	←	SG	7	5
4	20	DTR		DTR	20	4
6	6	DSR		DSR	6	6
1	8	CD		CD	8	1
7	4	RTS		RTS	4	7
8	5	CTS		CTS	5	8

## **RS 232-standardit**

RS 232-standardi määrittelee sekä synkronisen että asynkronisen liikennöinnin. Näistä standardeista yleisimmin käytetty on asynkroninen tiedonsiirtotapa, joka tarkoittaa, että tiedonsiirto tapahtuu epäsymmetrisesti ilman sovittua ajoitusta. Synkroninen tiedonsiirto tarkoittaa, että jokaista siirrettävää merkkiä ei lähetetä erikseen, vaan merkkien siirto tahdistetaan kellosignaalin avulla. Laitteistojen väliset liitäntäpituudet voivat olla jopa 200 m, mutta pitkällä johtoyhteyksillä sähköverkon maataso-ongelmat lisääntyvät ja näin ollen tiedonsiirto laitteistojen välillä häiriintyy. Käytetyimmät laitteistojen väliset tiedonsiirtojohtimien pituudet ovat n. 2 - 3 m.

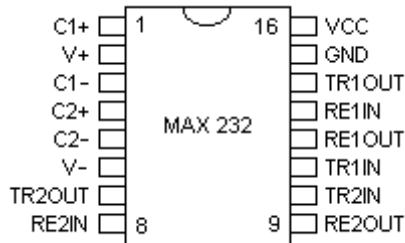
Laitteet jotka käyttävät sarjakaapelia laitteiden väliseen kommunikointiin on jaettu kahteen eri päätyyppiin: Single Masteriksi, jossa yksi kone ohjaa kaikkea tiedonsiirtoa ja multimasteriksi, jossa jokainen laite pystyy vuorollaan ohjaamaan tiedonsiirtoa, eli olemaan herrana. Ohjaavaa konetta kutsutaan isännäksi (host) ja ohjattavaa orjaksi (slave). RS 232-tiedonsiirtoväylä perustuu Single Master-ajatteluun, jossa päätelaite DTE (Data Terminal Equipment) on ohjaavana osana ja väylän toisessa päässä on DCE (Data Communication Equipment). Yleisimmin DCE-laitteena on käytetty modeemia. Nykyisin käytetyin siirtoprotokolla on "8N1" mikä tarkoittaa, että tietoa siirretään paketeissa, joihin sisältyy 8 data-bittiä, ei yhtään (None) pariteettibittiä (tarkistussumma) ja yksi stop-bitti. Data-bittien määrä voi olla myös 5, 6 tai 7 bittiä. Siirrettävä paketti aloitetaan aina start-bitillä, joka on nolla. Databitit siirretään niin että vähiten merkitsevä bitti ensin, sen jälkeen pariteettibitti, jos tarkistus on käytössä ja lopetusbitti, joka voi olla 1 ½ tai 2 bittiä. Jos käytössä siirtoprotokolla "8N1", niin paketin kokonaispituudeksi tulee 10 bittiä. Nopeudella 9600 baud eli 9600 bittiä sekunnissa siirtyy siis 960 eli 9600/10 kahdeksanbittistä merkkiä. Standardisoituja siirtonopeuksia ovat baudeina 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 56000, 115200, 128000, 256000. /21/

## **Datapaketti**

RS 232:n datapaketti on vain yksi tavu, kun se kehittyneemmissä verkoissa voi olla jopa useita kilotavuja. Tämän ansiosta RS 232:a voidaan käyttää prosessoreissa, joissa muistitila on rajattua.

## Jännitteen muunnin

Lisäksi tarvitaan vielä jännitteentaso- muunnin, joka muuntaa kortilla olevan +5 V jännitteen RS 232-väylän tarvitsemiin +/-12 V jännitteiksi. Tunnetuin tällainen piiri on MAX232, jossa on kaksi lähetintä ja vastaanotinta yhdessä kotelossa, kuva 30.



Kuva 30. MAX 232-jännitteenmuunnin.

## Kättelyt DCE ja DTE

Kuten kappaleessa 9 mainittiin, tyypillisimmin itse PC on tietoa ohjaava laite (DTE) ja modeemi tiedon liikennöintiin käytettävänä laite (DCE).

Laitteiden väliset kättelyt tulevat kyseeseen kun vastaanottava laite ei ehdi käsitellä saamaansa dataa siinä tahdissa, kuin lähettävä sitä antaa. Vastaanottava laite ilmoittaa tästä, jolloin lähettäjä keskeyttää toimintansa. Tähän on käytössä kolme tapaa:

Xon- tai Xoff-kättely, jossa vastaanottaja lähettää Xoff -merkin (^S, ASCII-merkki 19), kun väylä on täynnä. Kun väylällä on tilaa vastaanottaja lähettää Xon-merkin (^Q, ASCII-merkki 17). Tämä kättelytapa tarvitsee merkkien lähettämiseen sarjaportin johtimista TD- ja RD-linjoja. Hitailta siirtonopeuksilla tämä menetelmä hidastaa tiedonsiirtoa.

Lähetysvalmius- (Clear To Send, CTS) tai lähetyspyyntö - (Request To Send, RTS) kättelymenetelmä käyttää kahta johdinta RTS- ja CTS-aktivoitien esittämiseen sarjaportin tietoväylällä. Tämä menetelmä ei hidasta lähettämisaikaa niin kuin Xon- tai Xoff-kättely tekee. Kun PC lähettää tietoa, menetelmä aktivoi RTS-linjan. Jos modeemilla on tilaa vastaanottaa tietoa, niin modeemi vastaa asettamalla aktiiviseksi CTS-linjan ja PC voi aloittaa tiedon lähettämisen. Jos modeemilla ei ole tilaa vastaanottaa tietoa ei CTS-linjaa voida aktivoida.

None-kättelyssä laitteille ei lähetetä kättelyilmoituksia. Tämä tulee kysymykseen sellaisissa tilanteissa, joissa vastaanottava laite on riittävän nopea käsittelemään kaiken sille lähetettävän tiedon. /21/

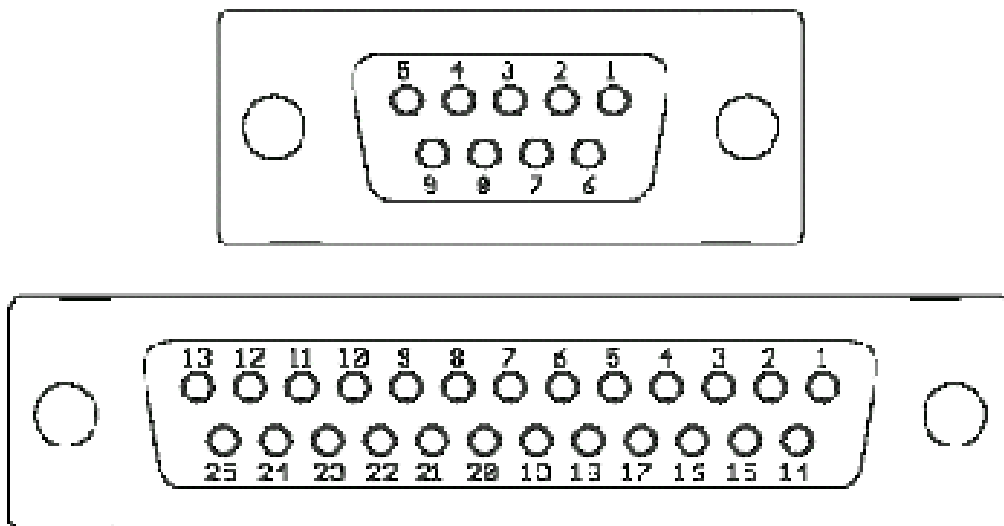


### Virheentarkistus

RS 232-standardissa virheentarkistus suoritetaan pariteettibitin asetuksella. Pariteetti voi olla parillinen tai pariton, jolloin parillinen pariteetti tarkoittaa, että varsinaisen tiedon (tavu tai sana) bittien määrä lasketaan. Jos bittejä on pariton määrä, tulee pariteettibitin olla 1, jotta tiedon ja pariteettibitin bittien summa on parillinen. Muussa tapauksessa pariteettibitin arvo on 0. Tarkistuksessa lasketaan sekä tiedon että pariteettibitin summa (eli ykkösbittien määrä) ja sen tulee olla parillinen. Jos se ei ole, jokin bitti on sotkeutunut tiedon siirrossa tai tallennuksessa. Yksinkertainen pariteettibitti ei kerro mikä biteistä on sotkeutunut, se voi siis olla myös paritettibitti. Lisäksi tarkistus ei ota huomioon tilannetta, missä useampi bitti on vaihtanut arvoa. Luotettavampien siirtojen yhteyksissä käytetään ohjelmallista tarkistusta. Yleisimpiin tiedonsiirtoprotokolliin sisältyy mahdollisuus käyttää virheentarkistusta. Pariteettitarkistusta käytetään merkkipohjaisessa tiedonsiirrossa ja yleensä se jätetään pois laitteisto-ohjauksissa ja tulostuksessa.

### Sarjaportin nastajärjestys

Nykyisissä PC laitteistoissa käytetään 9-nastaista sarjaporttia. Joissakin vanhemmissa koneissa on vielä 25-nastainen sarjaportti. Molempien nastajärjestys selviää oheisesta kaaviosta. Nastajärjestys on kuvattu PC laitteistoon liitettävän naarasliittimen juotospuolelta katsottuna. Nastojen numerot on yleensä merkitty myös liittimiin, kuva 31.



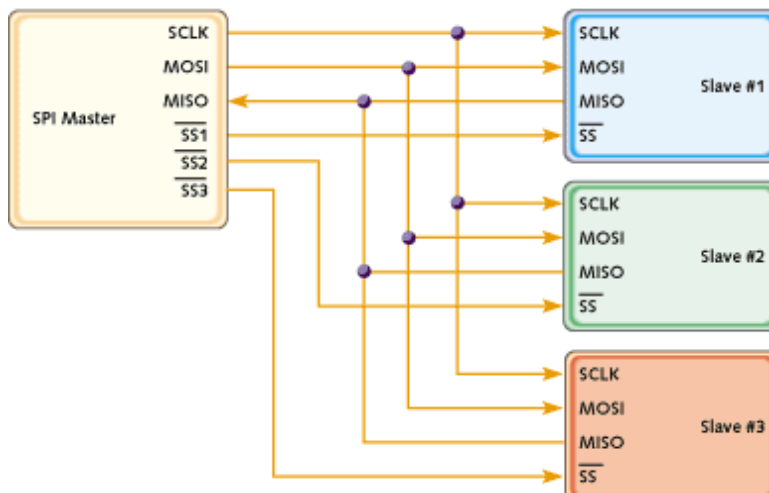
Kuva 31. 9 - ja 25-nastainen sarjaportti liittimen naaraspuolelta kuvattuna.

Taukukko 3. Nastojen signaalien merkitykset. 9 -ja 25-nastaisten sarjaporttien tehtävien kuvaukset, tummennettuna 9-nastainen sarjaportti.

Nasta		Lyhenne
1	Suojamaa (Chassis ground / Protective ground)	GND / PG
2 (3)	<b>Lähtevä tieto (Transmit data)</b>	<b>TxD / TD</b>
3 (2)	<b>Tuleva tieto (Receive data)</b>	<b>RxD / RD</b>
4 (7)	<b>Lähetyspyyntö (Request to send)</b>	<b>RTS</b>
5 (8)	<b>Lähetysvalmius (Clear To Send)</b>	<b>CTS</b>
6 (6)	<b>Siirtolaite valmiina (Data set ready)</b>	<b>DSR</b>
7 (5)	<b>Signaalimaa (Signal ground)</b>	<b>SG / GND</b>
8 (1)	<b>Kantoaaltotunnistus (Carrier detect)</b>	<b>CD</b>
9	Varattu	
10	Varattu	
11	Lähetyskanavan valinta (Select transmit channel)	STF
12	Apukanavan kantaaltotunnistus (Secondary carrier detect)	S.CD
13	Apukanavan lähetysvalmius (Secondary clear to send)	S.CTS
14	Lähtevä aputieto (Secondary transmit data)	S.TxD
15	Lähtevä ajastus (Transmission signal element timing)	TCK
16	Tuleva aputieto (Secondary receive data)	S.RxD
17	Tuleva ajastus (Receiver signal element timing)	RCK
18	(Local loop control)	LL
19	Apukanavan lähetyspyyntö (Secondary request to send)	S.RTS
20 (4)	<b>Päätelaite valmiina (Data terminal ready)</b>	<b>DTR</b>
21	(Remote loop control)	RL
22 (9)	<b>Soitonosoitus (Ring indicator)</b>	<b>RI</b>
23	Nopeuden valinta (Data signal rate selector)	DSR
24	(Transmit signal element timing)	XCK
25	(Test indicator)	TI

## 11.2 SPI-ohjelmointirajapinta

Sarja rinnakkaisväylä (Serial Peripheral Interface, SPI) on hyvin yleinen laitteiden sisäinen väylä, jolla ei yleensä ole liityntää laitteistoista ulos. Väylä on isäntä-palvelijatyypinen eli väylällä on aina yksi laite, joka hoitaa kommunikoinnin muiden laitteiden kanssa. SPI-väylä on myös todella nopea verrattuna muihin laitteistojen sisäisiin väylätyyppeihin. Lisäksi se on hyvin räätälöitävissä erilaisiin sovelluksiin. Nykyään monet SPI-väyläiset laitteet tukevat jopa 30 MHz:n nopeuksia. SPI-väylällä ei myöskään ole omaa standardoitua protokollaa, joten joissain tilanteissa hyödyttömät liikenteet saadaan näin vähennettyä ja samalla lisättyä tiedonsiirron nopeutta. SPI-väylä vaatii käyttöjännitteiden lisäksi neljä signaalia (Master Input Slave Output, MISO; Master Output Slave Input, MOSI; Serial Clock, SCLK; Slave Select, SS), joka on kaksin verroin enemmän kuin monet muut sarjamuotoiset väylät. Neljän signaalijohtimen ansiosta väylä on full-duplex-tyyppinen ja mahdollistaa sarja- ja rinnakkaistyyppiset kytkennät. Kuvassa 32 on esitetty kolmen asiakkaan ja yhden isännän rinnakkaismuotoinen kytkentä. /22/



Kuva 32. SPI-väylän rinnakkaismuotoinen kytkentä. /22/

WMob-järjestelmässä SPI-väylää käytettiin CC1010-piirien flashmuistien ohjelmoimiseen. Hexadecimal-tiedostoksi käännetty C-ohjelma ladattiin PC:n rinnakkaisporttiin flash programmer IDE-käyttöliittymän avulla. Rinnakkaisportin tieto muunnettiin SPI-väylän tukemaksi muodoksi väyläpuskuripiirillä (dongle), kuva 33.



Kuva 33. Väylämuunnin, jonka avulla rinnakkaistieto muuntuu sarjatiedoksi.

### ***11.3 SensorBus-tiedonsiirtoväylä***

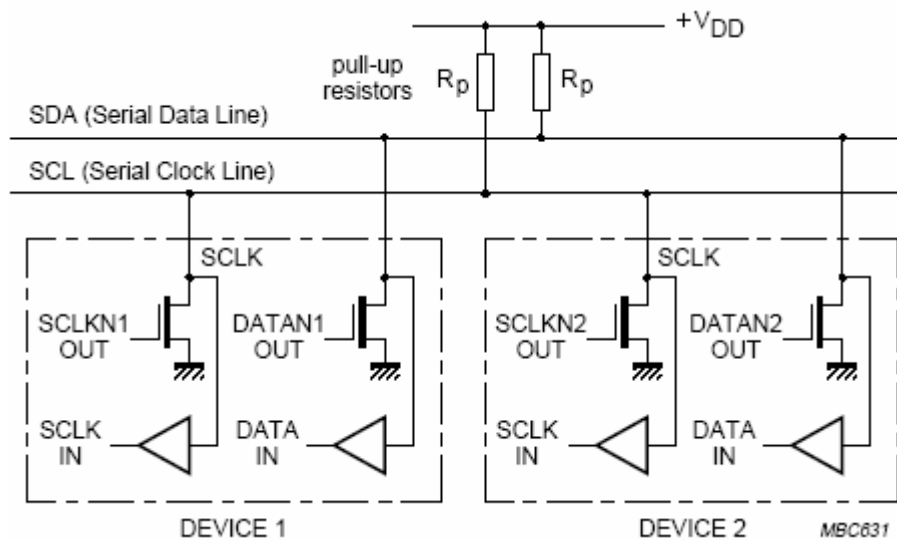
SHT11-lämpötila-anturi käyttää SensorBus-väylää, joka on lähes kopio Philips Semiconductors kehittämästä I2C-väylästä (Inter-Integrated Circuit bus).

SensorBus-väylä käyttää tiedonsiirron yhteyden aloittamiseen aloitus- ja lopetuskomentoa. Tämän vuoksi se ei ole I2C-väylä yhteensopiva, vaikka muuten toimiikin I2C-protokollan mukaisesti. WMobSlave-piirilevykortissa käytettiin lämpötila-anturissa SensorBus-tiedonsiirtoväylää, jossa myös käytettiin I2C-väylän protokollaa aloitusosion jälkeen.

#### **SHT11-lämpötila-anturirajapinta**

I2C-väylä soveltuu hyvin 8-bittisten mikro-ohjainten kommunikointiväyläksi, koska tieto siirtyy 8-bittisenä väylällä. Tiedonsiirtonopeus on 100 Kb/s (normaali moodi) tai 400 Kb/s (nopea moodi). Väylällä voi olla kahdenlaisia laitteita, master- ja slave-laitteita. Master voi aloittaa tiedonsiirron, slave ei, mutta molemmat voivat kuitenkin sekä lähettää että vastaanottaa tietoa. Väylällä on törmäyksien tunnistus (Collision Detection), siltä varalta että useampi laite yrittää lähettää samanaikaisesti. Jokaisella I2C-väylään liittyvällä laitteella täytyy olla oma yksikäsitteinen osoitteensa. Osoiteavaruus on yleensä 7-bittinen (joskus 10-bittinen). Sähköisesti väylään liitettäville laitteille on määrätty suurin mahdollinen kuormituskapasitanssi, joka on 400 pF.

Sekä SDA- että SCL-linjat on kytketty positiiviseen jännitteeseen. Kun väylä on vapaa, linjat ovat ylätilassa, mutta jos jokin lähtö menee alatilaa, vedetään koko linja alatilaa, kuva 34. /23/

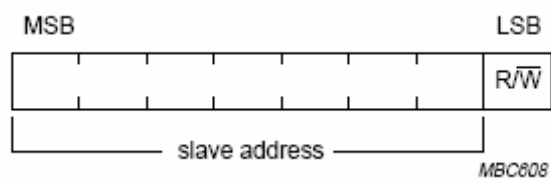


Kuva 34. Ylösvetovastuksien (pull-up resistors) kytkeytyminen I2C-väylään. /22/

### I2C-väyläprotokolla

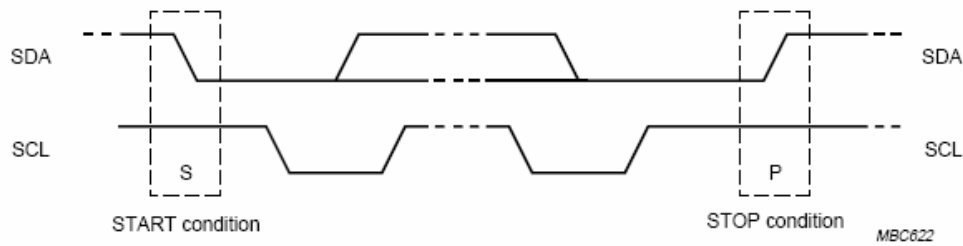
I2C on synkroninen kaksisuuntainen väylä, joka koostuu maatasen lisäksi signaaleista SDA (Serial Data Line) kaksisuuntaista linja dataa varten ja SCL (Serial Clock Line) kaksisuuntaista linja tahdistusta varten. Kaikilla väylään liitetyillä laitteilla on oma osoitteensa ja jokainen laitteista voi periaatteessa toimia lähettävänä ja vastaanottavana osapuolena. I2C-väylässä voi olla yhtä aikaa monta master-laitetta (multi-master bus) ja vain master-laitteet voivat aloittaa kommunikoinnin.

Tiedonsiirto alkaa Master-laitteen käynnistäessä lähetyksen STARTehdolla. Tämän jälkeen väylä on varattu aina siihen saakka kunnes Master-laite lähettää STOP-ehdon. START-ehdon jälkeen Master lähettää 7-bittisen Slave-osoitteen ja yhden tiedonsiirron suuntaa ilmoittavan bitin kuvan 35 mukaan. Jos tiedonsuuntabitti on nolla, tieto siirtyy Masterista Slave-laitteelle, ykkösbitillä puolestaan Slave-laitteesta Masterille. /23/

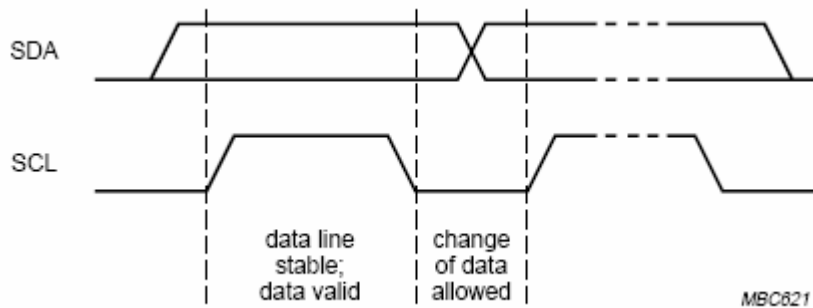


Kuva 35. I2C-väylän slave-osoite seitsemän bittiä ja kirjoitus- (Write, W) tai lukubitti (Read, R). /23/

START-ehto tapahtuu silloin kun SCL-linja on ylätilassa ja SDA-linja vedetty alatilaa. STOP-ehto taas kun SCL- ja SDA-linja ovat ylätilassa, joka vapauttaa aina väylän, kuva 36. SCL-linjalla tahdistetaan tiedonsiirto siten, että SDA-linjan tila voi vaihtua ainoastaan silloin, kun SCL alhaalla, kuva 37. /23/

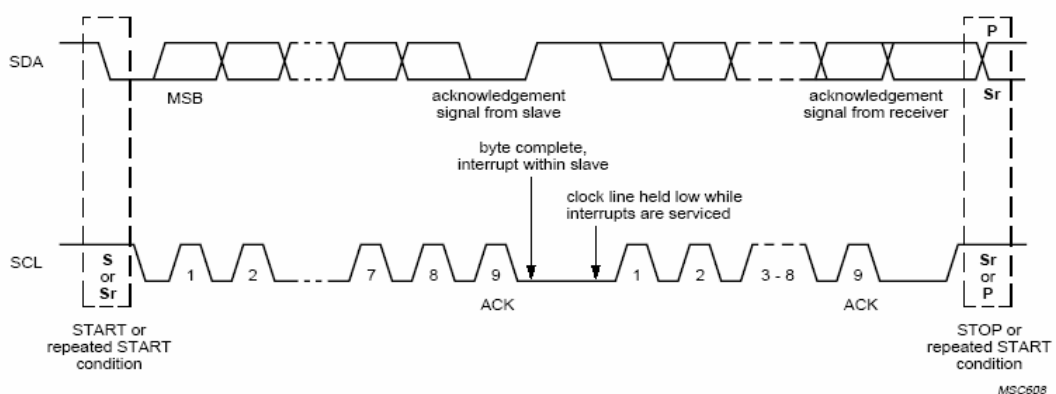


Kuva 36. START- ja STOP-ehto I2C-väylälle. /23/

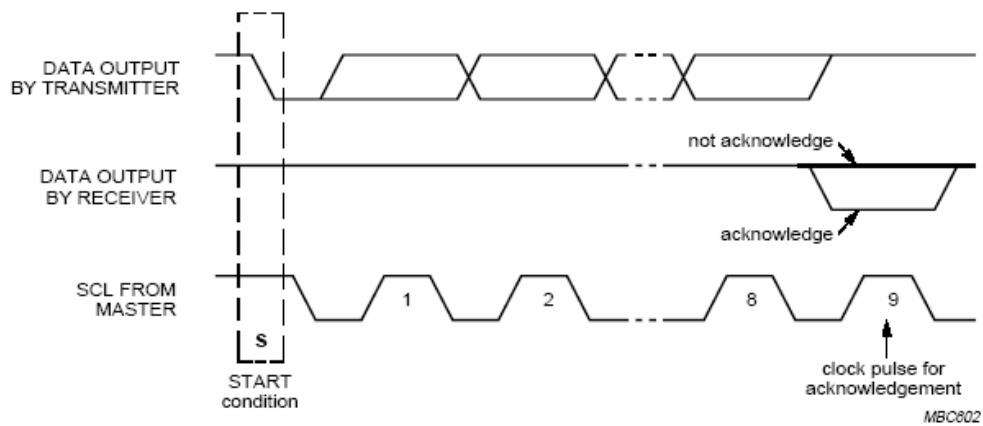


Kuva 37. Linjantilan vaihto aina kun SCL alhaalla. /23/

Tieto siirretään 8 bitin lohkoina ja eniten merkitsevin (Most Significant Bit, MSB) bitti ensin, kuva 38. Tiedon vastaanottaja kuittaa jokaisen vastaanotetun paketin ja voi tarvittaessa pysäyttää tiedonsiirron hetkeksi vetämällä SCL-linjan alatilaa, kuva 39. Lähetettyään yhden datapaketin Master-laite vetää SDA-linjan ylös ja kuittaava laite vetää SDA-linjan alas. I2C-laitteiden 7-bittiset osoitteet ovat yleensä osittain käyttäjän määriteltävissä (alimmat bitit).



Kuva 38. Tiedonsiirto I2C-väylällä. /23/



Kuva 39. Tiedon kuittaus I2C-väylällä. /23/

### 11.4 GSM-viestit ja AT-komentojen rajapinta

GSM-verkot (Global System for Mobile Communications) käyttivät alun perin 900 MHz:n radiotaajuusalueita, mutta verkkojen kasvaessa ja käyttäjien lisääntyessä otettiin käyttöön myös 1800 MHz:n taajuuksia. 1800 MHz:n taajuutta alunperin kutsuttiin 'Digital Cellular System 1800' eli 'DCS1800', ja se otettiin käyttöön Britanniassa vuonna 1998. Joissain maissa, lähinnä Pohjois-Amerikassa, GSM-verkkoja käytetään myös 1900 ja 850 MHz:n taajuuksilla. Kaikki GSM-puhelimet eivät kuitenkaan tue jokaista taajuutta eivätkä toimi eri taajuuksia käyttävissä verkoissa. Nykyään kaikissa merkittävässä GSM-verkoissa (850, 900, 1800 tai 1900 MHz) toimivat nelitaajuuspuhelimet ovat melko tavallisia. Näiden lisäksi on olemassa kaksitoimipuhelimia, joissa on sekä GSM että WCDMA-toiminnallisuus. WCDMA kertoo kuinka mobiililaitteet kommunikoivat tukiasemien kanssa ja miten signaalit moduloidaan. /24/

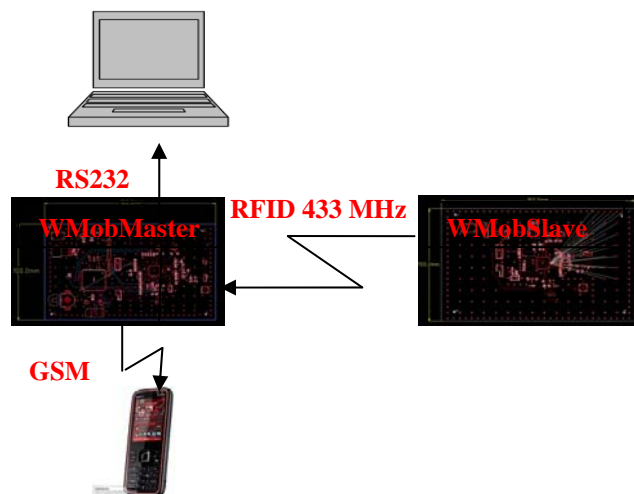
WMobMaster-piirilevykortilla olevan Wismo 228 GSM-moduulin rajapintana käytettiin RS 232-väylää ja GSM-tekstiviestien ohjelmointi tehtiin käyttäen AT-komentoja (Hayes-komentoja). AT-komennoilla moduuli ohjelmoitiin käyttämään tekstiä, valitsemaan vastaanottajan puhelinnumero ja maanumero sekä itse viesti. Viestinä lähetettiin esimerkiksi joko ”Alarm temperature low, ID: 1234, temp: -21 tai Alarm temperature high, ID: 1234, temp: 30”.

## 12 WMob-järjestelmä

WMob on lyhenne sanoista Wireless Mobile. Tässä tutkimuksessa kehitettiin WMob-järjestelmä logistiikan turvallisuuden ja laadun tarkkailuun. Järjestelmä koostuu kahdesta piirilevykortista, joissa kummassakin on RFID-lähetin-vastaanotin-piiri. WMobSla-

ve-piirilevykortille suunniteltiin lämpötila-anturi, jolla mitataan ympäristön lämpötilaa. Mitattu lämpötila lähetetään radiosignaalin WMoBMaster-piirilevykortille, jossa lämpötilatieto analysoidaan. Jos WMoBMaster-kortille ohjelmallisesti asetetut lämpötilarajat alitetaan tai ylitetään, siitä lähtee GSM-tekstiviesti kohdetta päivystävän työntekijän matkapuhelimeen. Lisäksi järjestelmään voidaan liittää RS 232-sarjakaapelilla PC-tietokone, jossa on oma käyttöliittymä vastaanottamaan mitattua lämpötilatietoa. Kun RFID-lähetin-vastaanotinpiiriksi valitaan aktiivinen omalla virtalähteellä itsenäisesti toimiva komponentti, on järjestelmään mahdollista kytkeytyä useampi lähetin-vastaanotin-piiri. Näin kytkeytymällä voidaan rakentaa anturiverkko, jossa voi olla useampia antureita mitattavana. Tutkimuksessa käytettävään piiriin on myös mahdollista kytkeä useampia antureita samanaikaisesti, sillä piirissä on SPI-väylä ja 26 ohjelmoitavaa input-output-porttia, esimerkiksi kiihtyvyyssanturi, paineanturi ja värinäanturi. Tässä tutkimuksessa on tarkoitus tutkia lämpötila-anturin avulla tiedonsiirtoa 433 MHz:n radiotaajuudella, kuva 40.

Koska tutkimuksessa tehtiin vain WMoBMaster- ja WMoBSlave-protokortit, eikä piirilevykortteja tämän vuoksi koteloitu, ei lämpösuunnittelua tässä työssä tehty. Levyjen koteloinnissa nousee usein esiin se, että piirilevyissä olevat komponentit esimerkiksi regulaattorit ja hakkurit kehittävät lämpöä, joka jää kotelon sisään. Tämä puolestaan aiheuttaa toisten piirilevyillä olevien komponenttien lämpenemistä. Lämpötila-anturi piirilevyllä saattaa siis lämmetä muiden komponenttien aiheuttamasta lämpenemisestä. Tällöin piirilevy-suunnittelussa on tehtävä lämpösuunnittelu ja suunniteltava jäähdytysmenetelmien käyttö.



Kuva 40. WMoB-järjestelmän kuvaus.



### **Tutkimuksessa käytetty radiotaajuus**

UHF-taajuus (Ultra High Frequency) 433 MHz omalla virtalähteellä valittiin radiopiiriksi, koska 433 MHz RFID-järjestelmät ovat nykyisin käytössä maailmanlaajuisesti ja se on useimmin käytetty taajuus logistiikan RFID-järjestelmissä. RFID:tä hyödynnetään maailmanlaajuisesti eri tuotantoketjujen verkostoissa, joita toimii yli 20 maassa, jäljittäen tuhansia meri-, ilma-, rautatie- ja maantiekuljetuksia päivittäin. 433 MHz RFID:tä on käytetty luotettavasti ja tehokkaasti päivittäisissä toiminnoissa satamissa, kuljetustermiinaaleissa, varastoissa ja muissa teollisuuden tiloissa. Lisäksi käytäntö on osoittanut, että 433 MHz RFID:tä voidaan käyttää ilman, että se häiriintyy muista samalla taajuusalueella olevista järjestelmistä. Sen toimintasäde on 100 metriä tai enemmän ja yhdellä lukijalla pystytään keräämään tuhansia tunnisteita. Lisäksi tunnistet havaitaan jopa 80 km / h nopeudessa ja silti ne tulevat virheettömästi sekä luotettavasti kerätyiksi. 433 MHz järjestelmä vaatii vähemmän kuin 1 milliwattia (mW) tehoa 100 metrin yhteydenottoon, kun puolestaan 915 MHz tarvitsee samaan yhteydenottoon 100 mW tai enemmän.

Aktiiviset RFID-tunnukset ovat jatkuvasti virtalähteessä, olipa se sitten lukijan taajuudella tai ei ja ovat siksi valmiina jatkuvasti tarkkailemaan ja tallentamaan anturien tilaa. Se on hyödyllinen lämpötilarajojen ja kontin sinetöinnin tilan mittaamisessa. Lisäksi aktiiviset RFID-tunnukset voivat antaa virran RFID-piirin sisäiselle reaaliaikaiselle kellolle ja edelleen lisätä tarkan ajan tai päivämäärän jokaiseen tallennettuun anturin arvoon tai tapahtumaan. /25/

### **CC1010-lähetin-vastaanotin-piirin tiedonsiirtomenetelmä**

Tutkimuksessa käytettiin CC1010-piirin tiedonsiirtoon perustuvaa yksinkertaisen datapaketin protokollaa (Simple Packet Protocol, SPP). ChipCon:in hyötykirjasto (ChipCon Utility Library, CUL) antaa mahdollisuuden lähettää ja vastaanottaa radiopaketteja käyttämällä yksinkertaista pakettiprotokollamenetelmää. Korkeamman protokollan kerrokset tai sovellukset voivat käyttää fyysisen kerroksen avulla SPP-liitäntää. SPP-rajapinnassa kalibroidaan radio ja modeemi sekä lähetetään ja vastaanotetaan ajastimella asetettuja datapaketteja. Keskeytyneen lähetyksen tai vastaanoton nollaus ja onnistuneiden paketien kuittaukset tehdään myös SPP-rajapinnassa. Tällä menetelmällä taataan, että paketti on lähetetty vain kerran, eikä sitä yritetä lähettää useampaan kertaan.

SPP-lähetysmetodissa lähetin asetetaan valmiustilaan, lähetysosaan kytketään virta ja otetaan käyttöön RF-keskeytys. RF-keskeytyksen ilmaantuessa datapaketti lähetetään vastaanottajalle ja vastaanottaja kuittaa sen saaduksi lähettämällä kuittibitin. Jos kuittibitti ei saavu lähettäjälle, jatketaan lähetystä niin kauan kunnes ohjelmallisesti asetettu kuittibittien lähetysohjeiden enimmäismäärä saavutetaan. Kun lähetys on päättynyt, asetetaan lähetin takaisin valmiustilaan.

SPP-vastaanottometodi toimii samalla periaatteella kuin lähetysmetodikin. Ensin kytketään virta vastaanotto-osaan ja otetaan RF-keskeytykset käyttöön. Kun RF-keskeytys tapahtuu, vastaanotetaan paketti ja pyydetään paketin lopuksi kuittibittiä. Kun kuittibitti on saatu ja varmistettu paketin oikeellisuus, kytketään virta pois vastaanotto-osasta ja asetetaan se valmiustilaan odottamaan seuraavaa pakettia.

Tiedon suojaus radiotiellä on tärkeää. Tietosuoja voidaan toteuttaa joko autentikoimalla tietty päätelaite toisen päätelaitteen tai keskitetyn palvelimen kanssa, jonka jälkeen päätelaitteen sallitaan käyttää tiettyä mediaa. Tässä tutkimuksessa käytettiin radiotietä salaamalla, eli kryptaamalla viesti siten, että vain vastaanottaja ja lähettäjä tietävät avaimen, jolla kryptattu viesti voidaan purkaa.

### **13 Tutkimuksen tulokset ja niiden analysointi**

Tutkimus oli tarkoitus suorittaa kolmessa erilaisessa ympäristössä: esteettömässä tilassa, toimistossa ja lastauslaiturilla. Esteettömällä tilalla tässä tapauksessa tarkoitetaan ulkona tapahtuvaa mittausta, että mitattava laite (WMobSlave) on näköyhteydessä mittaavaan laitteeseen (WMobMaster). Toimistotilassa mittaukset suoritetaan siten, että mitattava laite on toimistotilan eri huoneessa kuin mittaava laite, eli suoraa näköyhteyttä mitatulla ja mittaavalla laitteella ei ole. Lastauslaiturikohteessa tarkastellaan mittaavan kohteen sijoittumista eri korkeuksille mitattaavasta kohteesta. Tämän lisäksi jokaisessa kohteessa mitattavien ja mittaavien laitteiden välissä oli tarkoitus käyttää estemateriaalina nahkaa, muovia, puuta, alumiinia, kangasta ja betonia. Estemateriaalien asettamisella pyrittiin tutkimaan radiotaajuuden signaalin heikkenemistä esteen kohdatessa.

Näitä mittauksia ei tutkimuksessa kyetty täysin toteuttamaan. Suunnittelu onnistui ainoastaan WMobSlave-piirikortin osalta, johon onnistuttiin tekemään lämpötilaa mittaavan anturin ajuriohjelma sekä lähettämään lämpötilatietoa radiotaajuuden kautta WMobMaster-piirilevykortille. Ongelmaksi havaittiin, että WMobMaster-piirilevykortilla ole-

va lähetin-vastaanotin-piiri ei ottanut vastaan lähetettyä lämpötilatietoa. Tämä johtui piirilevykortin toteutuksessa tapahtuneista virheistä.

Tämän lisäksi tutkimuksen toteuttamisessa törmättiin useisiin erilaisiin ongelmiin. Piirilevysuunnittelussa tapahtui virheitä, jotka aiheuttivat piirilevyjen toteutuksessa oikosulkuja piirilevyille. Oikosulut johtuivat siitä, että piirilevysuunnitteluohjelmassa oli suunnitteluvaiheessa automaattinen johdintenvetoasetus päällä. Suunnitteluvaiheen jälkeen, tarkistusvaiheessa, havaittiin ylimääräisiä juotostäpliä joita poistettaessa automaattisesta johdintenvetoasetuksesta johtuen piirilevyssä meni jännitepuolen johtimien vedot maa-puolen johtimien päälle. Tämä puolestaan aiheutti oikosulkuja piirilevyllä. Oikosulut olisi voitu ehkäistä huomioimalla, että automaattinen johdintenvetoasetus olisi ollut pois päältä.

Ongelmia aiheuttivat myös komponenttien saatavuus. Piirilevysuunnittelu tehtiin tiettyä komponenttia silmällä pitäen. Yllätyksiä aiheutti komponenttien valmistuksen lopettaminen, jolloin suunnittelu jouduttiin tekemään uudelleen kyseisen komponentin osalta. Tämän tyyppisiä ongelmia voidaan välttää ottamalla huomioon komponenttien vaihtuvuus jo suunnitteluvaiheessa, esimerkiksi suunnittelemalla piirilevyille vaihtoehtoinen komponentti.

Edellä kuvatut virheet olisi voitu välttää varaamalla riittävät aika- ja taloudelliset resurssit tutkimuksen suunnitteluun ja toteutukseen. Tässä tutkimuksessa järjestelmän suunnitteluun arvioitu aika ja taloudelliset resurssit eivät kohdanneet näin laajaan tutkimushankkeen tarpeita. Oleellisen tärkeää on myös tämän tyyppisissä tutkimushankkeissa kiinnittää erityistä huomiota komponenttien saatavuuteen, prototyyppikorttien suunnitteluun ja yhteistyökumppaneiden sekä alihankkijoiden ammattitaitoisuuteen.

## 14 Pohdintaa

Edellä kuvaamani, tutkimushankkeen epäonnistumiseen johtaneiden syiden lisäksi havaitsin tutkimusta toteuttaessani muun muassa seuraavia kehittämiskohteita.

Koska järjestelmän suunnittelu tehtiin vain prototyyppiä varten, jäi siihen vielä useita kohtia, joita voidaan kehittää ja parantaa. Lähetin-vastaanotin-piirien välinen kommunikointi voitaisiin tehdä molemminpuoleisesti esimerkiksi siten, että kun orjalaitteelta (slave) radiotaajuudella lähetetty lämpötilatieto on analyysoitu isäntälaitteella (master) ja todettu sen olevan alle asetettujen raja-arvojen, voidaan isäntälaitteelta lähettää orjalaitteelle käsky, esimerkiksi siitä, että lämpötilatietoa

mitataan tiheämmin tietyn ajan. Näin toimimalla voidaan tarkastella mitattavan kohteen lämpötilan kehittymistä. Lisäksi isäntälaitteessa olevalla GSM-GPRS-piirillä olisi mahdollista lähettää hälytysviestit internetverkon yli palvelimelle, jossa olisi oma sovellus ottamassa vastaan GPRS-viestejä. Tästä palvelimelle tehdystä käyttöliittymä sovelluksesta voitaisiin myös lähettää asetustietoja (raja-arvot, mittaustiheys) isäntälaitteelle ja näin ohjata mittaavien laitteiden käyttäytymistä internetverkon ylitse.

Piirilevyjen koteloinnin suunnittelussa tulisi ottaa huomioon laitteiden kokojen optimoinnit ja jos piirilevyille on suunniteltu lämpötilaa mittaavia antureita, tulisi myös huomioida lämpösuunnittelua. Antennisuunnittelulla on mahdollista toteuttaa antenni, joka on integroituna piirilevyyn. Piirilevyyn integroitu antenni mahdollistaa pienikokoisten laitteiden suunnittelun.

Lopuksi haluan todeta, että RFID on lupaava tunnistustekniikka joka voi tuoda uutta tehoa moniin toimitusketjuihin ja jopa mahdollistaa täysin uudenlaisia logistisia toimintamalleja. Liiketoiminnan tai logistiikan lainalaisuuksia se ei kuitenkaan mullista, vaikka saattaakin muokata niitä joissain ympäristöissä huomattavasti. Pohdittaessa erityisesti missä tilanteissa RFID:tä kannattaisi ottaa ensiksi käyttöön, kannattaa keskittyä tarkastelemaan suoraan tunnistetilanteeseen liittyviä seikkoja ja RFID:n hyötyjä. RFID:stä on erityisesti hyötyä 1) mikäli tuotteiden tunnistaminen ja seuranta on tärkeää, mutta ei tehokkuussyistä ole mahdollista viivakoodiperusteisesti, 2) kun ympäristötekijät huomattavasti heikentävät viivakoodien suorituskykyä, 3) tilanteissa missä RFID:n tarjoamasta paremmasta tunnistamisen ja tiedonvaihdon turvallisuudesta voidaan hyötyä ja 4) kun RFID:n tarjoamaa rajoitettua ohjelmoitavaa muistikenttää kyetään tehokkaasti hyödyntämään (kuten esimerkiksi hyödynnettäessä RFID:tä kierrätettävissä kuljetuspakkauksissa).

RFID:tä ei pidä pelätä eikä tuomita sitä ainoastaan tulevaisuuden tekniikaksi jonka kehittymistä kannattaa vain seurata passiivisesti. Sen avulla saavutetaan jo tällä hetkellä huomattavia säästöjä. Oleellista on lähteä hakemaan käytännön toiminnan parannuksia sillä tasolla, että oikeasti määritellään mitä esim. RFID:n mahdollistamalla tarkemmalla toimitusketjutiedolla tehdään. Usein sillä voidaan mahdollistaa tehokkaampia toimintamalleja, mutta silloin pitää tietää kuinka ne toteutetaan.

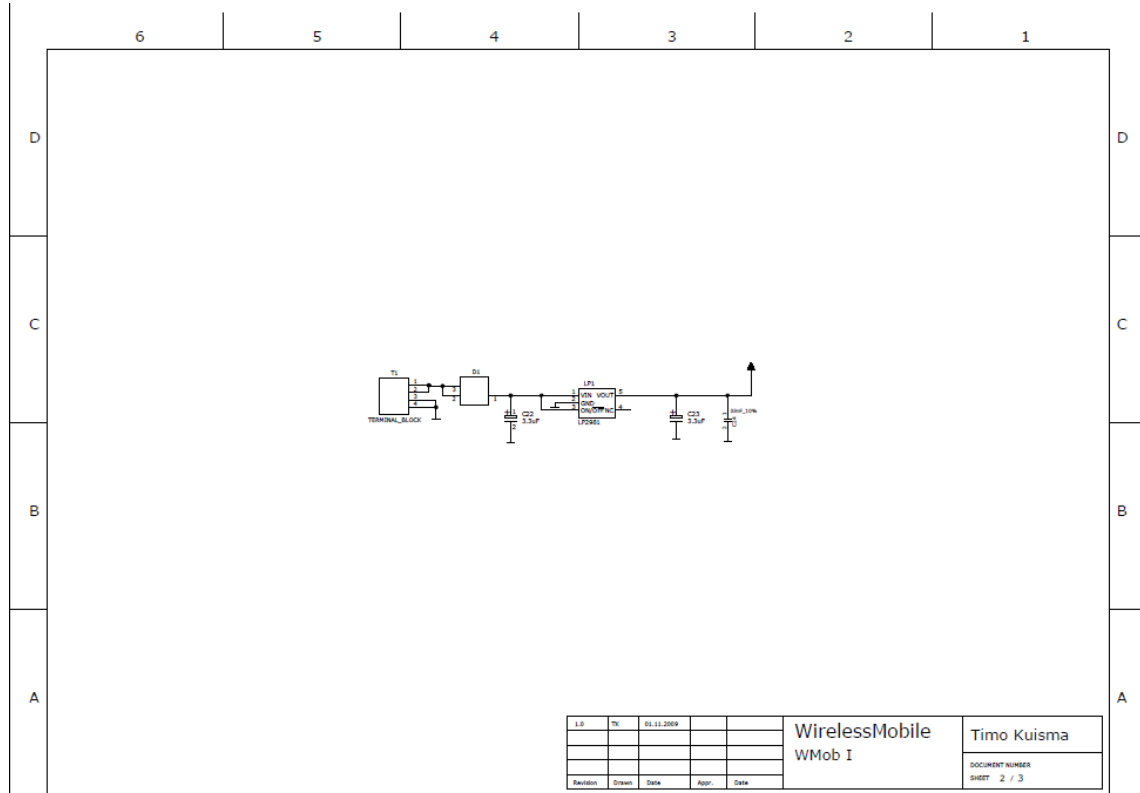
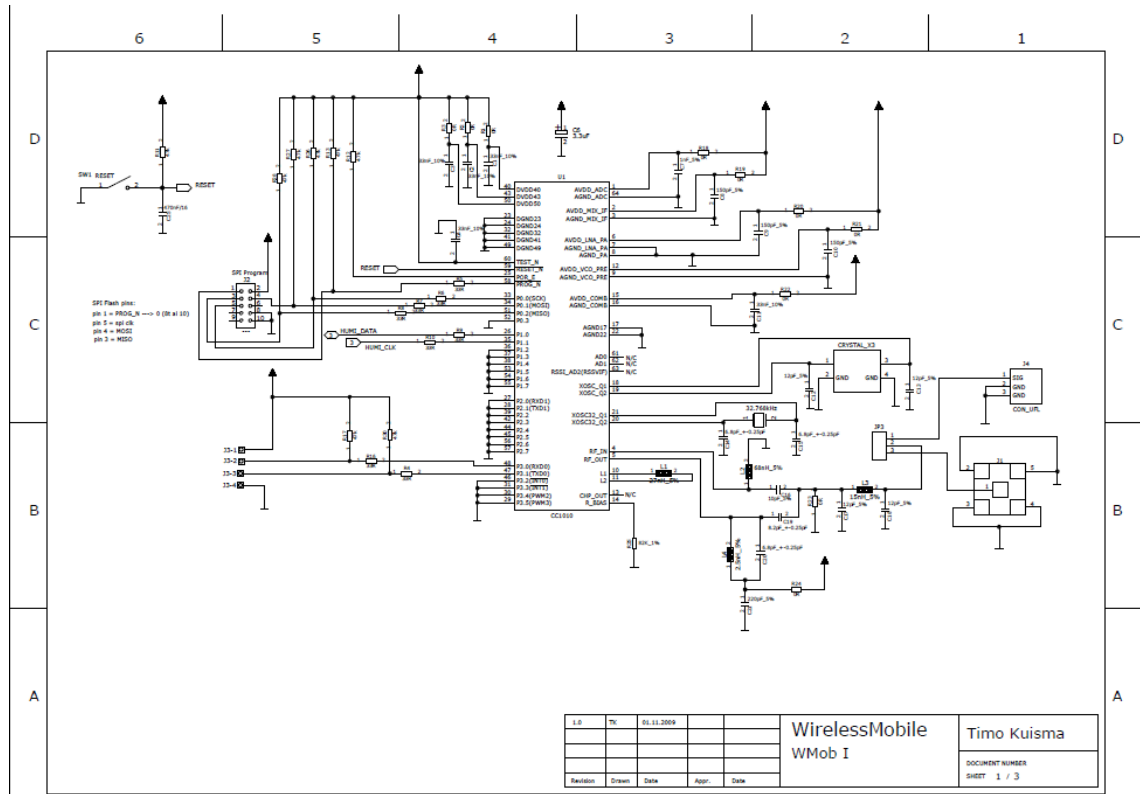
## Lähteet

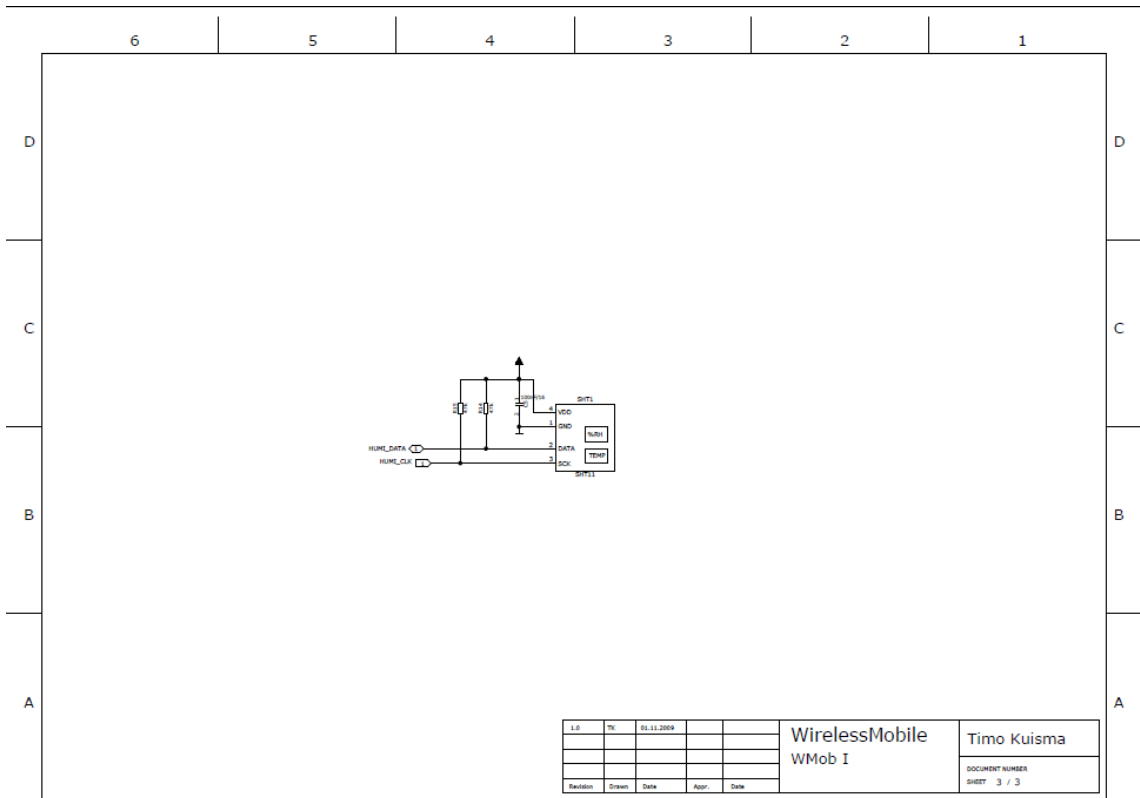
1. WWW-dokumentti.  
<http://www.tkk.fi/Yksikot/Liikenne/Opinnot/177/RFID.pdf>. Viitattu 15.1.2010.
2. WWW-dokumentti.  
[http://europa.eu.int/eurlex/lex/LexUriServ/site/fi/oj/2004/l\\_390/l\\_39020041231fi00240037.pdf](http://europa.eu.int/eurlex/lex/LexUriServ/site/fi/oj/2004/l_390/l_39020041231fi00240037.pdf) . Viitattu 2.1.2010
3. Mitä on EMC. Oppilaiden harjoitustyö. TKK, sähkö- ja tietoliikennetekniikka, Helsinki, 1998. <http://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38118/s98/htyo/32/>. Viitattu 2.1.2010.
4. Seppä Risto. Laitesuunnittelu, luentomateriaali. HAMK, tietotekniikka, Forssa, 2006.
5. Prosessori, Integroitujen piirimoduulien suunnittelu ja valmistus. Numero 13 ES Marraskuu 2000
6. Seppä Risto. Piirilevysuunnittelu, luentomateriaali. HAMK, tietotekniikka, Forssa, 2006.
7. Tikkanen Hannu. PADS piirilevysuunnitteluopas II. Gummerus Oy: Jyväskylä, 2004
8. Reitmaa-Gustafsson. Varma Digitaalielektroniikka EMC-, vianehkäisy- ja häiriötorjuntatekniikka, Otatieto, No 569.
9. Ott, Henry, W. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, sivut 274-297, 2nd Edition
10. Horowitz, Paul & Hill, Winfield. The Art of Electronics, sivut 599-612, 2nd Edition
11. Texas Instruments. WWW-dokumentti.  
<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc1010.html>. Viitattu 10.1.2010
12. WWW-dokumentti, <http://www.sfs.fi/it/standardit/>. Viitattu 10.1.2010.
13. WWW-dokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/RFID>. Viitattu 10.2.2010.
14. WWW-dokumentti. <http://fi.wikipedia.org/wiki/RFID>. Viitattu 10.2.2010.
15. WWW-dokumentti.  
<http://virtual.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2002/tasku%2520raportti.pdf>. Viitattu 10.2.2010.
16. Finkenzeller, Klaus. RFID handbook, fundamentals and applications in contactless smart cards and identification, sivut 427 - 446. Chichester, Wiley, 2003
17. Ahlin, Lars, Principles of Wireless Communications, 2. painos, 1998. Chapter 1, sivut 9 -15.

18. Granlund, Kaj, Tietoliikenne. Tietoliikennetekniikan peruskirja. Gummerus kirjapaino, Jyväskylä 1999.
19. Saunders, Simon R. Antennas and propagations for wireless communication systems. 1. painos. Wiley: England. 1999.
20. Juels, Ari, Rivest, Ronald L., Szydlo, Michael. The Blocker Tag: Selective Blocking of RFID Tags for Consumer Privacy. Proceedings of the 10th ACM conference on Computer and communications security.
21. WWW-dokumentti. <http://www.beyondlogic.org/serial/serial.htm#9>. Viitattu 10.1.2010.
22. Kalinsky, D. & Kalinsky, R. 1.2.2002. Introduction to Serial Peripheral Interface. WWW-dukumentti. Embedded System Design. Viitattu 15.1.2010. [http://embedded.com/columns/beginnerscorner/9900483?\\_requestid=466795](http://embedded.com/columns/beginnerscorner/9900483?_requestid=466795).
23. WWW-dukumentti. [http://www.nxp.com/documents/application\\_note/AN10216.pdf](http://www.nxp.com/documents/application_note/AN10216.pdf). Viitattu 16.1.2010.
24. WWW-dukumentti. <http://www.freebookcentre.net/mobile-books-download/Overview-of-GSM-GPRS-and-UMTS.html>. Viitattu 25.1.2010
25. WWW-dokumentti. [http://www.autoid.org/2002\\_Documents/sc31\\_wg4/docs\\_501-520/520\\_18000-7\\_WhitePaper.pdf](http://www.autoid.org/2002_Documents/sc31_wg4/docs_501-520/520_18000-7_WhitePaper.pdf). Viitattu 15.1.2010.

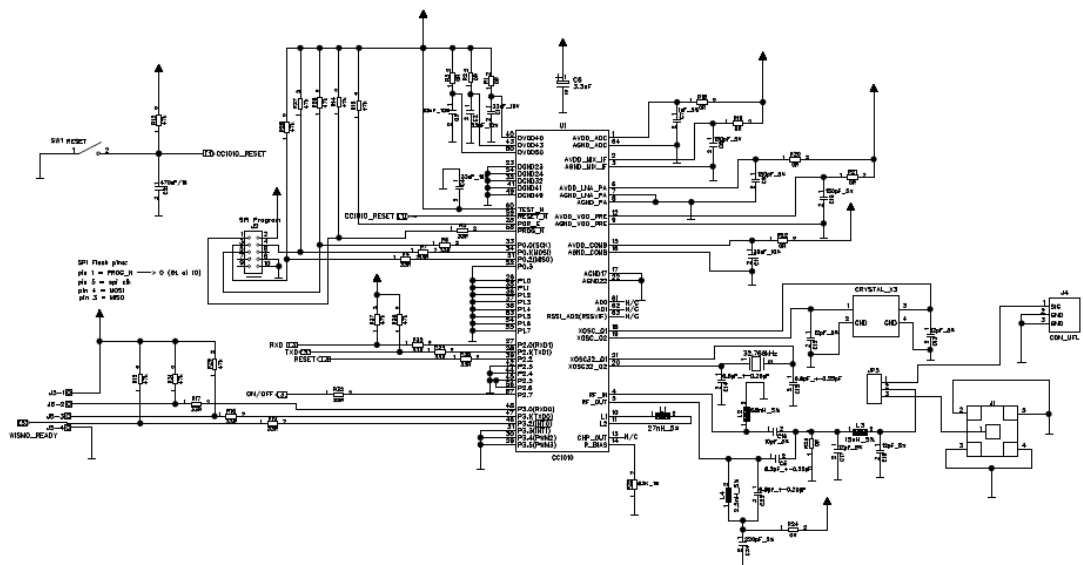
# Liitteet

## LIITE 1 WMobSlave-logiikkapiirustus



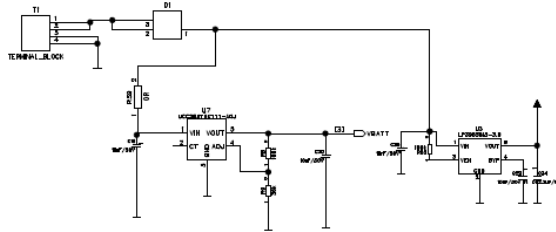
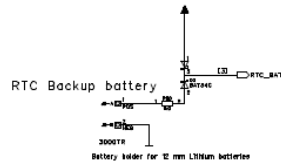


LIITE 2 WMobMaster-logiikkapiirustukset

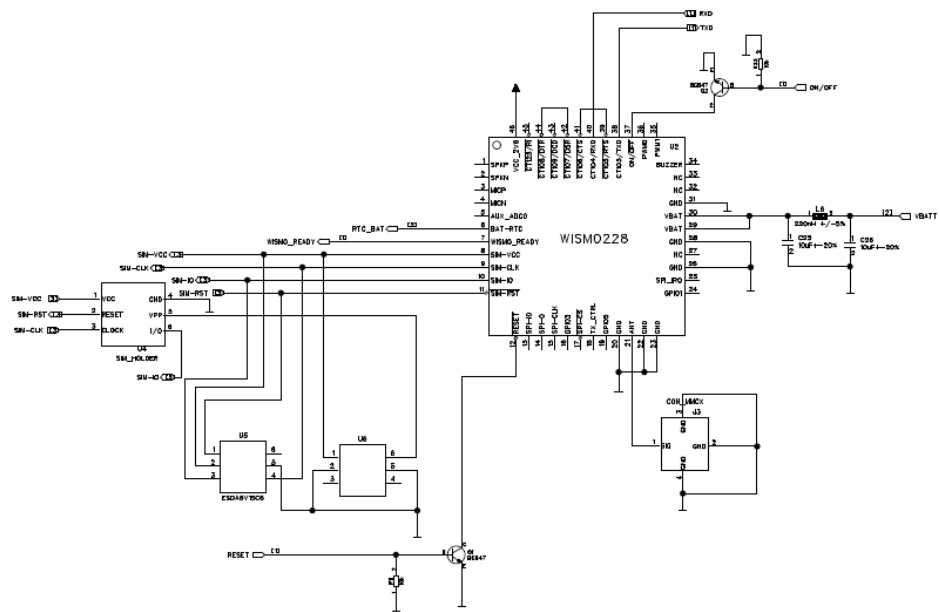


no	no	muutokset			Timo Kuisma	Timo Kuisma
					WMob_master	DOCUMENT NUMBER
Revision	Drawn	Date	Appr.	Date	CC1010	SHEET 1 / 4





LM	TM	Author				Timo Kuisma	Timo Kuisma
		Drawn				WMob_master	DOCUMENT NUMBER
		Date				CONNECTORS	SHEET 2 / 4
Revision	Drawn	Date	Appr.	Date			



LM	TM	Author				Timo Kuisma	Timo Kuisma
		Drawn				WMob_master	DOCUMENT NUMBER
		Date	Appr.	Date		GSM	SHEET 3 / 4
Revision	Drawn	Date	Appr.	Date			