

Jaakko Mäntymaa

**Haihtumattomat tallennusmenetelmät sulautetussa
anturijärjestelmässä**

Tietotekniikan
(Sulautetut järjestelmät)
pro gradu -tutkielma
25. lokakuuta 2006



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
TIETOTEKNIIKAN LAITOS

Jyväskylä

Tekijä: Jaakko Mäntymaa

Yhteystiedot: jahemant@cc.jyu.fi

Työn nimi: Haihtumattomat tallennusmenetelmät sulautetussa anturijärjestelmässä

Title in English: Non-volatile storage technologies in an embedded sensor system

Työ: Tietotekniikan (Sulautetut järjestelmät) pro gradu -tutkielma

Sivumäärä: 71

Tiivistelmä: Tässä Pro Gradu -tutkielmassa haetaan sopivinta haihtumatonta tallennusmenetelmää sulautettuun anturijärjestelmään, jonka käyttökohteena on pyörivän koneen kunnonvalvonta. Tarkoituksena on löytää sopiva korvaaja järjestelmässä aiemmin käytetylle kiinteälle flash-muistipiirille, joka ei täytä sille asetettuja vaatimuksia. Varsinaisena tutkimuskohteena käydään läpi erilaisia puolijohteisiin perustuvia haihtumattomia tallennusmenetelmiä. Vertailun perusteella esitellään SD-kortin käyttöön perustuva tallennusratkaisu sekä arvioidaan sen soveltuvuutta tutkittuun anturijärjestelmään ja yleisemminkin vastaaviin laitteisiin.

English abstract: This thesis aims to find the most suitable method of non-volatile storage for an embedded sensor system, which is used for condition monitoring of a rotary machine. Previous version of the system used an integrated flash memory chip that failed to meet the requirements. Non-volatile solid-state storage technologies are presented as the main subject of research. Based on the evaluation, the work presents a storage implementation based on the use of SD-cards. Finally, the thesis evaluates the applicability of the proposed implementation to the specific system and embedded sensor systems in general.

Avainsanat: haihtumattomat muistit, flash-muistit, muistikortit, kunnossapito, kunnonvalvonta, mittaustekniikka, sulautettu tietotekniikka

Keywords: non-volatile memories, flash memories, memory cards, maintenance, condition monitoring, measuring technology, embedded systems

Copyright © 2006 Jaakko Mäntymaa



Tämä teos on lisensoitu Creative Commons Nimi mainittava — Ei-kaupalliseen käyttöön — Ei jälkiperäisiä teoksia 1.0 Suomi -lisenssillä. Nähdäksesi lisenssin vieraile sivulla <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/fi/> tai lähetä kirje osoitteeseen Creative Commons, 543 Howard Street, 5th Floor, San Francisco, California, 94105, USA.

Esipuhe

Reilun puolen vuoden työn tulokset on nyt koottu näihin kansiin. Tätä tutkielmaa kirjoittaessani olen saanut tutustua moniin uusiin tekniikoihin ja monet luennoilla opitut asiat ovat avautuneet uudella tavalla. Vaikka opintoni yliopistossa lähestyvätkin loppuaan, monenlaista opittavaa riittää vielä pitkään — niin tietotekniikassa kuin elämässä yleensäkin.

Myös muut ovat vaikuttaneet tämän työn valmistumiseen. Haluan kiittää tutkija-opiskelija Tero Sihvoa työni ohjauksesta, professori Tapani Ristaniemeä työn tarkastuksesta sekä Oivallin Oy:ta ja Agora Centeriä taloudellisesta tuesta. Seppo Karjalasta ja Oivallin Oy:ta haluan kiittää myös mielenkiintoisesta aiheesta sekä Oivallin Oy:n henkilökuntaa viihtyisän työilmapiirin luomisesta.

Assistentti Tommi Hytönen Tietotekniikan laitokselta ansaitsee lämpimät kiitokset innostavasta ja tasokkaasta opetuksesta sekä monista hyvistä neuvoista opintojeni aikana. Vanhempani, sisareni sekä monet ystäväni ovat rohkaisseet ja tukeneet minua opiskeluvuosiinani sekä jotkut heistä myös antaneet hyviä kommentteja tästä työstä. Ilman heitä elämä olisi ollut paljon raskaampaa ja harmaampaa, joten heille osoitan siksi suuret kiitokset.

Jyväskylässä lokakuussa 2006

Jaakko Mäntymaa

Lyhenteet

A/D-muunnin on piiri, joka muuntaa analogisen signaalin digitaaliseen muotoon, jota tietokone voi käsitellä.

ATA, Advanced Technology Attachment on PC-tietokoneissa käytetty kiintolevyjen liitännäväylä.

CAN, Controller Area Network on alun perin autoteollisuuden käyttöön kehitetty tiedonsiirtoväylä.

CD, Compact Disc on optisesti luettava digitaalinen ääni- ja datalevy.

CF, CompactFlash on eräs muistikorttityyppi.

CHEI, Channel Hot-Electron Injection on flash-solun ohjelmointiin käytettävä menetelmä, jossa elektroneja kiihdytetään sellaiselle energiatasolle, että ne voivat läpäistä muistisolun lähteen tai nielun ja kelluvan hilan välisen eristekerroksen.

CMOS, Complementary MOS tarkoittaa mikropiirien valmistuksessa käytettyä tekniikkaa, jossa PMOS- ja NMOS-transistorit esiintyvät vastakkain.

CPRM, Content Protection for Recordable Media on 4C Entityn kehittämä kokoelma kopiointisuojausmenetelmiä.

CS, Chip Select tarkoittaa digitaalipiireissä käytettyä merkinantolinjaa, jonka avulla piiri valitaan käyttöön. Näin piiri tietää, että se voi käyttää esimerkiksi useiden piirien yhteiskäytössä olevaa tiedonsiirtoväylää.

D/A-muunnin on piiri, joka muuntaa digitaalisen signaalin analogiseen muotoon.

DMA, Direct Memory Access tarkoittaa toimintatapaa, jossa oheislaite voi suoraan käsitellä tietokoneen muistia ilman suorittimen ohjausta.

DRAM, Dynamic Random Access Memory tarkoittaa RAM-muistia, johon data-bitit tallennetaan kondensaattorien varauksina. Sitä sanotaan dynaamiseksi,

koska varaukset purkautuvat vähitellen ja muistia täytyy siksi säännöllisesti virkistää.

DSP, Digital Signal Processing tai Processor tarkoittaa digitaalista signaalinkäsittelyä tai digitaalista signaaliprosessoria.

DVD on CD-levystä erityisesti videon tallennusta varten kehitetty suurempikapasiteettinen optinen levy. Nimen on sanottu olevan lyhenne sanoista Digital Versatile Disk tai Digital Video Disk, mutta virallisesti se ei ole lyhenne.

ECC, Error Correction Code tarkoittaa tiedon siirrossa ja tallennuksessa käytettävää virheenkorjausta.

EEPROM, Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory tarkoittaa muistia, joka voidaan sekä tyhjentää että ohjelmoida sähköisesti.

EKG, Elektrokardiografia on sydämen sähköisen toiminnan mittaamiseen käytetty menetelmä. Samaa lyhennettä käytetään myös kyseistä menetelmää soveltavasta laitteesta elektrokardiografista sekä laitteen tulosteesta, elektrokardiogrammista.

EPROM, Erasable Programmable Read-Only Memory on muistia, joka voidaan tyhjentää ultraviolettivalon avulla ja sen jälkeen ohjelmoida sähköisesti.

FAT, File Allocation Table on Microsoftin 1970-luvulla MS-DOS -käyttöjärjestelmää varten kehittämä tiedostojärjestelmä. FATista on olemassa erilaisia versioita levykkeitä sekä pienehköjä ja suurempia kiintolevyjä varten.

F–N, Fowler–Nordheim -tunnelointi on kvanttimekaniikkaan perustuva menetelmä, jolla flash-muistisolun kelluva hila voidaan ohjelmoida tai tyhjentää tunneloimalla elektroneja solun kanavasta kelluvalle hilalle tai toisin päin.

FRAM, **FeRAM**, Ferroelectric RAM on uusi haihtumaton muistitekniikka, joka perustuu ferrosähköisen kondensaattorin polarisaation muutokseen.

G on eräs kiihtyvyydestä käytetty yksikkö. 1 G vastaa maan vetovoiman aiheuttaman putoamiskiihtyvyyden suuruista kiihtyvyyttä.

GPRS, General Packet Radio Service on GSM-verkossa toimiva pakettipohjainen tiedonsiirtotekniikka.

GSL, Ground Select Transistor on NAND-tyyppisessä flash-muistissa muistisoluketjun ja maalinjan välissä sijaitseva valintatransistori.

GSM, Global System for Mobile Communications on joukko digitaalisessa matkapuhelinviestinnässä käytettyjä standardeja.

HS-MMC, High Speed MultiMediaCard on MMC-kortin uusi, nopeutettu versio.

I/O, Input/Output tarkoittaa rajapintaa tai rajapintoja, joiden avulla siirretään dataa tietokoneesta ulos tai päinvastoin.

I²C, Inter-Integrated Circuit bus on Philipsin kehittämä synkroninen, kaksijohtiminen sarjaväylä.

MB/s, Megatavua sekunnissa, eräs tiedonsiirtonopeuden mittayksikkö.

MLC, Multi-Level Cell on flash-muistin kapasiteetin kasvattamiseen käytetty tekniikka, jossa yhteen muistisoluuun tallennetaan useampia bittejä käyttämällä ohjelmoinnissa useita eri varaustasoja.

MMC, MultiMediaCard on eräs muistikorttityyppi.

MMCA, MultiMediaCard Association on MMC-muistikorttistandardia ylläpitävä järjestö.

MOS(FET), Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor on eräs integroiduissa piireissä käytetty transistorityyppi.

NAND, Not-And tarkoittaa invertoitua AND-porttia tai samantyyppiseen rakenteeseen perustuvaa flash-muistia.

NOR, Not-Or tarkoittaa invertoitua OR-porttia tai samantyyppiseen rakenteeseen perustuvaa flash-muistia.

MRAM, Magnetoresistive RAM on uusi, magneettikentän suunnan aiheuttamaan resistanssin muutokseen perustuva haihtumaton muistitekniikka.

NR0M, Saifun Semiconductorsin kehittämä tekniikka, jossa flash-muistisolun rakenne on symmetrinen ja kelluva hila nitridipohjainen. Siten hilan kumpaankin päähän voidaan tallentaa erillinen bitti.

NVRAM, Non-Volatile Read-Only Memory tarkoittaa RAM-muistia, josta on tehty haihtumatonta paristo- tai EPROM-varmennuksen avulla.

OBS, Ocean Bottom Seismometer on meren pohjan tutkimiseen tarkoitettu seismometri eli maankuoren värähtelyjen mittauslaite.

OTP-EPROM, One-Time Programmable Erasable Programmable Read-Only Memory on EPROM-muisti josta puuttuu ultraviolettivalolla tapahtuvan tyhjennyksen vaatima ikkuna. Siksi piiri voidaan ohjelmoida vain kerran.

PC, Personal Computer tarkoittaa henkilökohtaista, yleiskäyttöistä tietokonetta, erotuksena erityiseen käyttöön suunnitelluista sulautetuista tietokoneista.

PCM, Phase-Change Memory on uusi haihtumaton muistitekniikka, joka perustuu aineisiin, jotka ovat pysyviä sekä kiteisessä että amorfisessa muodossa ja joiden resistanssi riippuu tästä muodosta. Myös lyhennettä PRAM (Phase-change RAM) käytetään.

PCMCIA, Personal Computer Memory Card International Association on PC Card -standardista vastaava yhteisö.

PROM, Programmable Read-Only Memory eli ohjelmoitava lukumuisti tarkoittaa muistityyppiä, joka voidaan sähköisesti ohjelmoida yhden kerran erityisen ohjelmointilaitteen avulla.

PSK Standardisointiyhdistys ry on suomalainen prosessiteollisuuden standardointijärjestö.

RAM, Random Access Memory eli hajasaantimuisti tarkoittaa sähköisesti luettavaa ja kirjoitettavaa muistia, joka tyhjenee, kun siitä katkaistaan virta.

RISC, Reduced Instruction Set Computer tarkoittaa suoritinta, jossa on suppea, yksinkertaisista käskyistä koostuva käskykanta.

ROM, Read-Only Memory eli lukumuisti tarkoittaa muistia, johon tieto on tallennettu pysyvästi jo valmistusvaiheessa.

RS-232 on kahden tietokoneen väliseen sarjamuotoiseen tiedonsiirtoon tarkoitettu liitäntästandardi. RS on lyhenne sanoista Recommended Standard.

RS-485 on useamman tietokoneen väliseen sarjamuotoiseen tiedonsiirtoon tarkoitettu liitäntästandardi. Tiedonsiirto on differentiaalista, eli data välitetään kahden johtimen välisenä jännitteenä.

RS-MMC, Reduced-Size MultiMediaCard on mobiililaitteita varten suunniteltu pienempi versio MMC-kortista.

SD, SecureDigital on eräs muistikorttityyppi.

SDHC, SecureDigital High Capacity on nimitys standardiversion 2.0 mukaisille SD-korteille. Uusi standardi mahdollistaa yli kahden gigatavun kokoisten korttien käyttämisen sekä määrittelee korteille standardin mukaiset nopeusluokat.

SDMI, Secure Digital Music Initiative on samannimistä musiikin kopiointisuojaustekniikkaa kehittänyt yhteisö.

SPI, Serial Peripheral Interface on Motorolan kehittämä mikro-ohjaimissa käytetty synkroninen, sarjamuotoinen tiedonsiirtoväylä.

SRAM, Static Random Access Memory tarkoittaa staattista RAM-muistia, jossa databitit on tallennettu yleensä kuudesta transistorista muodostuviin muistisoluihin.

SSL, Bit-line Select Transistor on NAND-tyyppisessä flash-muistissa muistisoluketjun ja bittilinjan välissä sijaitseva valintatransistori.

TCP/IP, Transmission Control Protocol / Internet Protocol tarkoittaa Internetissä ja lähiverkoissa käytettyjä kuljetus- ja verkkokerrosten protokollia.

UART, Universal Asynchronous Receiver/Transmitter tarkoittaa piiriä, joka muuntaa rinnakkaismuotoista dataa sarjamuotoon tiedonsiirtoa varten.

USB, Universal Serial Bus on tietokoneiden oheislaitteita varten kehitetty moderni sarjaväylä.

UTC, Coordinated Universal Time on atomikellojen aikaan perustuva aikajärjestelmä, jota käytetään ympäri maailman virallisena aikana. UTC korvasi GMT:n (Greenwich Mean Time) maailmanlaajuisena aikajärjestelmänä. Suomen normaaliaika on kaksi tuntia ja kesäaika kolme tuntia edellä UTC-aikaa.

WLAN, Wireless Local Area Network tarkoittaa langatonta lähiverkkoa. Yleensä tällä tarkoitetaan IEEE 802.11 -standardin mukaisia verkkoja.

Sisältö

Esipuhe	i
Lyhenteet	ii
1 Johdanto	1
2 Kunnonvalvonta ja sulautetut anturijärjestelmät sen toteuttajana	3
2.1 Kunnossapito ja kunnonvalvonta	3
2.2 Sulautetut anturijärjestelmät	5
3 Haihtumattomat tallennusmenetelmät	8
3.1 PROM ja EPROM	8
3.2 EEPROM	9
3.3 Flash	11
3.3.1 Flash-muistin toimintaperiaate ja kehitys	11
3.3.2 NOR- ja NAND-tyypin flash-muistit	14
3.3.3 Flash-muistin käytöstä	18
3.4 Haihtumaton RAM	20
3.5 Tulevaisuuden haihtumattomat muistit	21
3.6 Muistikortit	23
3.6.1 PC Card -muistikortit	24
3.6.2 CompactFlash	26
3.6.3 MultiMediaCard	28
3.6.4 SecureDigital	30
3.6.5 USB-muistit	34
4 Kunnonvalvontaympäristö	35
4.1 Isäntälaitteen rakenne ja tehtävä	35
4.2 Muistin käyttötarkoitus	36
4.3 Muistiin kohdistuvat vaatimukset	38
4.3.1 Tallennustilan määrä	38

4.3.2	Kirjoitus- ja lukunopeus	39
4.3.3	Toimintaolosuhteet	39
4.3.4	Liitettävyyys järjestelmään	40
5	Muistitoteutus SD-kortin avulla	41
5.1	SD-kortin valintaperusteet	41
5.1.1	Laitteistotaso	41
5.1.2	Ohjelmistotaso	42
5.1.3	Käyttäjätaso	42
5.2	Toteutus	43
5.2.1	Kytkentä	44
5.2.2	Tiedostojärjestelmä ja tallennusformaatti	46
5.2.3	Korttia ohjaava ohjelmisto	48
5.2.4	Esimerkkejä datan tallennuksesta	48
5.3	Toteutuksen arviointia	50
6	Yhteenveto	52
	Viitteet	54

1 Johdanto

Tämän tutkielman tarkoituksena on löytää sopiva haihtumaton tallennusmenetelmä sulautettuun anturijärjestelmään, jonka käyttökohteena on pyörivän koneen kunnonvalvonta. Kunnonvalvonta on teollisuudessa kasvava kunnossapidon ala, jonka tarkoituksena on saada tietoa koneiden ja laitteiden toimintakunnosta ja sen kehityksestä. Tavoitteena on pystyä ennakoimaan tulevia vikoja ja häiriöitä ja siten säästää kunnossapidossa säästöjä. Kunnonvalvontaan liittyvää tutkimusta on Suomessa tehty esimerkiksi Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa (lähteet [1], [2], [3]), Oulun yliopistossa (lähde [4]) sekä Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa (lähde [5]).

Tämän tutkimuksen kohteena on kehitteillä oleva kunnonvalvontajärjestelmä, jonka prototyyppejä Pekka Vänskä on esitellyt Pro Gradu -tutkielmassaan [6]. Järjestelmään kuuluu kunkin mitattavan koneen yhteyteen sijoitettava isäntälaitte, joka tarvitsee mittaustulosten tallentamiseen jonkinlaista haihtumatonta muistia. Laitteen vanhassa versiossa käytössä oli kiinteä flash-muistipiiri, joka ei kuitenkaan täyttänyt sille asetettuja vaatimuksia. Tarkoituksena on vertailla markkinoilla olevia tallennustekniikoita ja valita niistä isäntään paremmin sopiva ratkaisu. Samalla on tarkoitus myös yleisesti arvioida tekniikoiden sopivuutta sulautettuihin anturijärjestelmiin.

Tutkimuksen kuluessa mielenkiinto suuntautui erityisesti flash-muistiin perustuviin muistikortteihin. Niitä on aiemmin käytetty esimerkiksi lääketieteellisissä mitalaitteissa (lähteet [7], [8], [9]) sekä merenpohjan tutkimuksessa (lähde [10]).

Luvussa 2 esitellään yleisesti kunnonvalvontaa sekä sulautettujen anturijärjestelmien käyttöä kunnonvalvonnan toteutuksessa. Luvussa 3 käydään läpi erilaisia haihtumattomia tallennusmenetelmiä sekä niiden toimintaa, kehitystä ja käyttöä. Tutkimuksen kohteena olevaan kunnonvalvontajärjestelmään ja sen muistille asettamiin vaatimuksiin tutustutaan tarkemmin luvussa 4. Luvussa 5 perustellaan ja esitellään SD- eli SecureDigital -tyyppisiin flash-muistikortteihin perustuva tallennusratkaisu

sekä sen toteutus laitteisto- ja ohjelmistotasolla. Lisäksi arvioidaan ratkaisun onnistumista. Luku 6 on tutkielman yhteenveto.

2 Kunnonvalvonta ja sulautetut anturijärjestelmät sen toteuttajana

Sulautetuilla järjestelmillä tarkoitetaan sellaisia laitteita, joissa mikrotietokone on osana jotakin elektroniikkajärjestelmää. Niissä on siten itse laitteiston lisäksi myös ohjelmistolla tärkeä osuus. Sulautetut järjestelmät eivät ole yleiskäyttöisiä, vaan ne on suunniteltu jotain erityistä tarkoitusta varten. Sulautettuja järjestelmiä on nykyään kaikkialla ympärillämme. Esimerkiksi kauppojen elektroniset vaa'at, pysäköintimittarit ja juoma-automaatit sisältävät pienen tietokoneen. [11, s. 7–10]

Tämän tutkimuksen pohjalla on sulautettu anturijärjestelmä, jonka käyttökohteena on pyörivän koneen kunnonvalvonta. Tässä luvussa esitellään järjestelmän tarkoitukseen ja toiminta-alueeseen liittyviä käsitteitä.

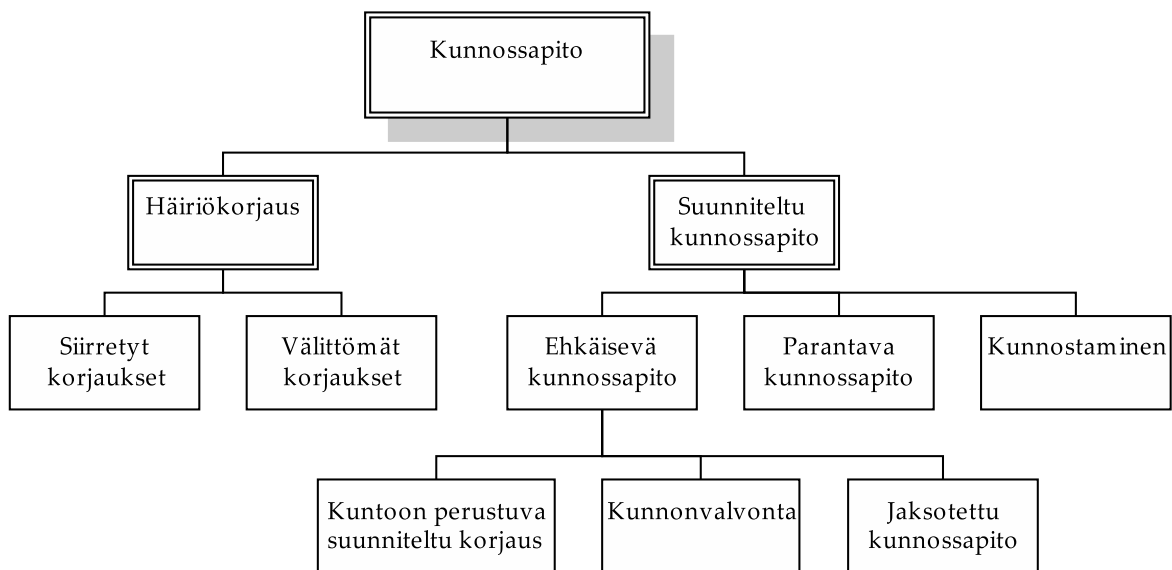
2.1 Kunnossapito ja kunnonvalvonta

PSK 6201 -standardissa *kunnossapito* määritellään seuraavasti [12, s. 2]:

Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon sen koko elinjakson aikana.

Käytettävyys eli prosessien jatkuva toiminta on noussut teollisuudessa erittäin tärkeäksi ja keskeiseksi asiaksi. Vikaantuneen koneen vaatima *korjaava kunnossapito* aiheuttaa suuria kustannuksia ja seisokeista aiheutuvia tulonmenetyksiä. Tavoitteena on kokonaisvaltainen kunnossapito, joka ei vaikuta vain kunnossapitokustannuksiin vaan tehostaa toimintaa myös muilla osa-alueilla. [13, Luku 23, s. 1]

Kuvassa 2.1 on esitetty kunnossapidon lajit. Nimensä mukaisesti *ehkäisevän kunnossapidon* tarkoitus on pitää laite toimintakunnossa ja palauttaa heikentynyt toiminta-



Kuva 2.1: Kunnossapidon lajit [12, s. 21].

kyky jo ennen vian tai vaurion syntymistä. Perinteinen *jaksotettu kunnossapito* käsittää määräajoin tapahtuvat tarkastukset ja huollot. [12, s. 22]

PSK 6201 -standardi määrittelee *kunnonvalvonnan* seuraavasti [12, s. 22]:

Kunnonvalvonnalla määritellään kohteen toimintakunnon nykytila ja arvioidaan sen kehittyminen mahdollisen vikaantumis-, huolto- ja korjausajankohdan määrittämiseksi.

Kunnonvalvonnan toimenpiteitä ovat aistein sekä mittalaittein tapahtuvat tarkastukset ja valvonta sekä mittaustulosten analysointi.

Kunnonvalvonta tuottaa lähtötietoja ehkäisevän kunnossapidon ja korjauksen suunnitteluun.

Parhaan kustannustehokkuuden saavuttamiseksi tavoitteena on tehdä vain tarpeellista kunnossapitoa oikeaan aikaan. Kunnonvalvontamittauksia tehdään jatkuvasti laitteen ollessa normaalisti käytössä, häiritsemättä sen toimintaa. Vikaantuminen tai sen uhka voidaan havaita niin aikaisin, että laite voi turvallisesti toimia vielä pitkäänkin. Tällöin huoltoja voidaan tehdä silloin, kun se on edullisinta ja käytännöllisintä, eikä tarvita osittain turhia kiinteitä määräaikaishuoltoja. Laitteista korjataan vain kulloinkin epäkunnossa olevat osat. [13, Luku 23, s. 1–2]

Suunnittelemattomien seisokkien vähentämisellä on laajempiakin vaikutuksia kuin vain koneiden parantunut käyttöaste. Kun korjauksia tehdään hallitummassa olosuhteissa, tapaturmia sattuu vähemmän ja yleinen työturvallisuus paranee. Kun esimerkiksi varaosia ja voiteluaineita kuluu vähemmän, on toimivalla kunnonvalvonnalla myös suotuisia ympäristövaikutuksia. [14, s. 7]

Kunnonvalvonta alana on kasvussa sekä Suomessa että ulkomailla. Suomessa kunnonvalvontamittauksia on tehty laajemmassa mittakaavassa 1980-luvulta lähtien. Hyviä kokemuksia on saatu erityisesti paperiteollisuudesta, ja siellä kunnonvalvonta onkin jo arkipäivää. Tekniikan kehittyessä myös pienemmissä laitoksissa on pyritty ottamaan järjestelmiä käyttöön. [13, Luku 23, s. 2]

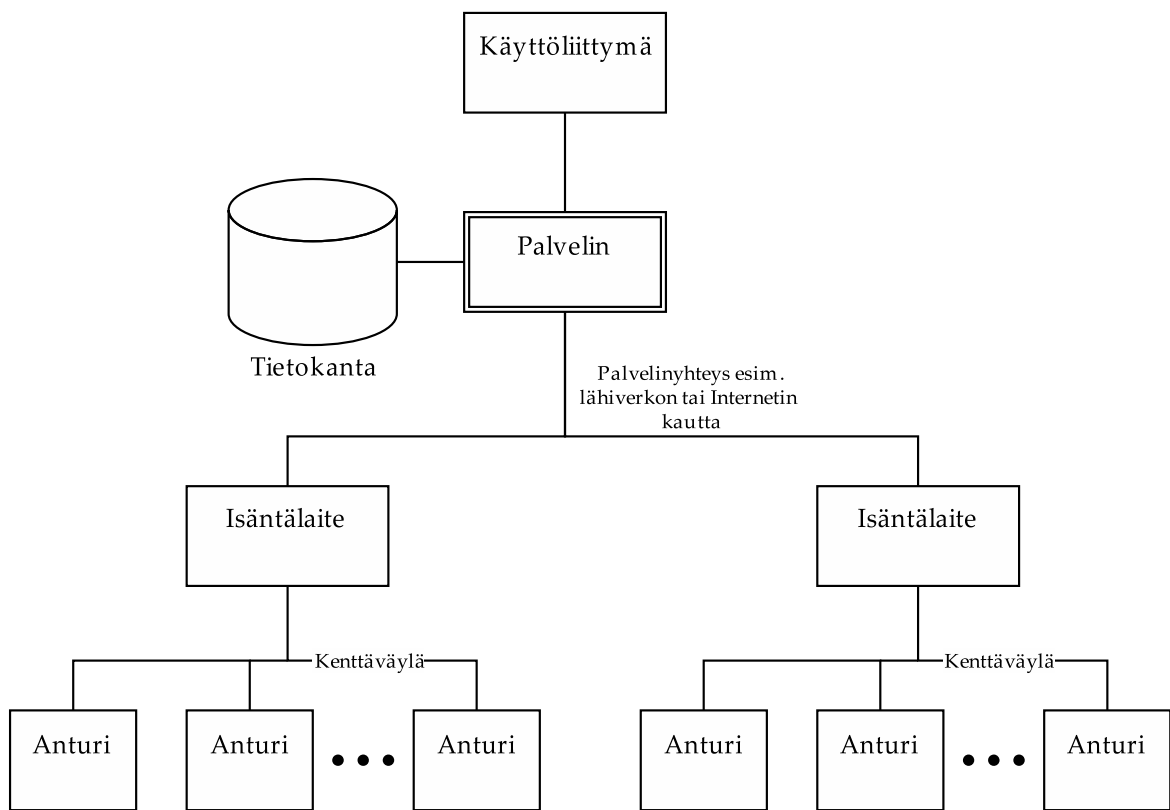
2.2 Sulautetut anturijärjestelmät

Sulautetulla anturijärjestelmällä tarkoitetaan tässä tutkielmassa erilaisia suureita mittaavien antureiden, mittaustiedot keräävän isäntälaitteen tai -laitteiden sekä ylemmän tason palvelimen muodostamaa kokonaisuutta.

Kuvassa 2.2 on esimerkki tällaisen järjestelmän rakenteesta. Alimmalla tasolla ovat mittaushoiteisiin asennetut anturit, joilta isäntälaitte kerää mittaustulokset. Tiedonvälitykseen käytetään tällä tasolla yleensä digitaalisia *kenttäväyliä*, jotka tarkoittavat teollisuuden vanhojen analogisten automaatioverkkojen tilalle kehitettyjä digitaalisia paikallisverkkoja [13, luku 5, s. 1–2]. Sellaisia ovat esimerkiksi CAN, Modbus ja Profibus [5, s. 31–32]. Langallisen kenttäväylän sijasta voidaan käyttää myös langatonta verkkoa, kuten Bluetooth-, WLAN- tai ZigBee-yhteyksiä [1].

Isäntälaitteelta data välitetään edelleen palvelimelle ja tietokantaan. Jos palvelin sijaitsee lähellä muuta järjestelmää, voidaan palvelinyhteyskin toteuttaa kenttäväylän avulla [2, luku 2.3]. Jos isäntäyksikön ja antureiden muodostamia kokonaisuuksia on useita ja laajalla alueella, on käytettävä pidemmälle välimatkalle soveltuvaa tiedonsiirtotekniikkaa, kuten TCP/IP -pohjaisia verkkoja. Siirtotienä voivat toimia esimerkiksi Ethernet- tai GSM-verkot [3].

Oulun yliopistossa on tutkittu langattomien verkkojen käyttöä kunnonvalvontajärjestelmissä, erityisesti antureiden mittaustulosten lukemista suoraan kannettavan laitteen, kuten matkapuhelimen tai kämmentietokoneen käyttöliittymään. Tulevai-



Kuva 2.2: Esimerkki sulautetun anturijärjestelmän rakenteesta [2, luvut 1 ja 2.3].

suudessa huoltomiehellä voi olla käytössään laajennetun todellisuuden tarjoavat datalaitteet, joiden avulla mittaustulokset voidaan näyttää suoraan näkökentässä tarkkailtavan kohteen kohdalla. [4]

Chang ym. [15] esittävät sulautetulle kunnonvalvontajärjestelmälle seuraavanlaisen nelitasoisen, loogisen arkkitehtuurin:

Mittaustaso käsittää varsinaiset anturien tekemät mittaukset. Mitattavia suureita voivat olla esimerkiksi lämpötila, paine, sähkövirta, jännite ja värähtelyt. Arvot siirretään sellaisenaan tai yhtenäiseen muotoon muunnettuna seuraavalle tasolle.

Datankäsittelytasolla mittaustuloksia käsitellään siten, että niistä voidaan tunnistaa mahdolliset viat ja vauriot.

Viantunnistus ja -määrittelytasolla kunnonvalvontajärjestelmä tekee käsiteltyjen mittaustuloksien perusteella päätelmiä tarkkailtavan laitteiston tilasta. Jos tilassa

todetaan poikkeama, vian tyyppi ja sijainti pyritään määrittämään ja tuloksista ilmoitetaan.

Kunnossapitostrategiatasolla järjestelmä vertaa tuloksia tietokantaan tallennettuihin kunnossapitostrategioihin ja päättelee, mitä toimenpiteitä laitteiston tila mahdollisesti edellyttää. Tällöin ilmoitukset voidaan ohjata oikealle henkilöstölle ja joitakin kunnossapitotoimia voidaan suorittaa jopa automaattisesti.

Mitä korkeamman tason toimintoja kunnonvalvontajärjestelmä toteuttaa automaattisesti, sitä vähemmän kunnonvalvonta vaatii ihmistyövoimaa. Pyrkimyksenä on myös tuoda älykkäämpiä toimintoja mahdollisimman lähelle antureita. DSP-toiminnot mahdollistavat datan käsittelyn heti antureissa. Eri suureille voidaan myös määritellä valvottavat hälytysrajat, joiden ylitys on merkki mahdollisesta viasta tai vauriosta. Kun hälytysrajoja valvotaan suoraan antureissa, verkossa liikuteltavan datan määrä vähenee. Toisaalta laitteistosta tulee tällöin monimutkaisempi. [3][16]

3 Haihtumattomat tallennusmenetelmät

Suoritettavan ohjelmakoodin ja käsiteltävän datan säilytykseen käytettävät muistit ovat olennainen osa jokaista tietokonejärjestelmää. Perinteisesti tietokoneiden muistit on jaettu RAM- ja ROM-tyyppisiin muisteihin. ROM eli *Read-Only Memory* on nimensä mukaisesti vain luettavaa muistia, johon data on tallennettu pysyvästi piirin rakenteeseen jo sen valmistusvaiheessa. RAM eli *Random Access Memory* puolestaan on muistia, jota voidaan tietokoneessa sekä lukea että kirjoittaa, mutta sen sisältö katoaa, kun laitteesta katkaistaan virta. [17, s. 1–2]

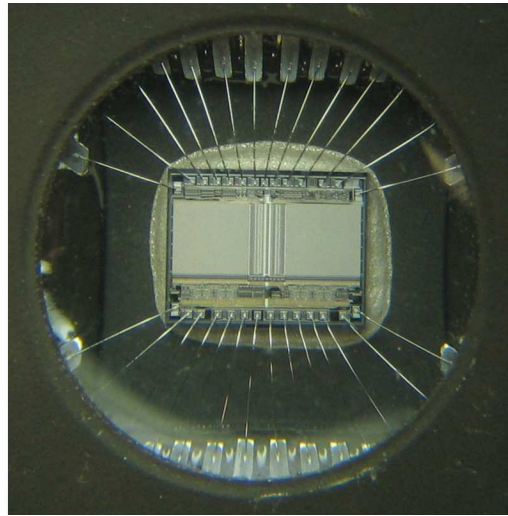
Viime vuosikymmeninä ovat kuitenkin yleistyneet muistitekniikat, jotka mahdollistavat sähköisen kirjoittamisen mutta säilyttävät silti tallennetun tiedon myös ilman jatkuvaa virransaantia. Siksi vanhemman RAM–ROM -jaottelun sijaan nykyisin puhutaan useimmiten *haihtuvista (volatile)* ja *haihtumattomista (non-volatile)* muisteista. [17, s. 1–2]

Tässä luvussa kerrotaan erityyppisistä haihtumattomista muisteista sekä niiden sovelluksista.

3.1 PROM ja EPROM

Vanhinta tekniikkaa edustavat kertaohjelmoitavat PROM-piirit (*Programmable ROM*). Niissä piirin muistikennot muodostuvat yleensä bipolaarisista transistoreista, joita kutsutaan *sulakkeiksi*. Kun sulake poltetaan ohjelmointilaitteella, sitä ei voi enää palauttaa alkuperäiseen tilaan. [11, s. 37]

Seuraavaksi kehitettiin EPROM-muisti (*Erasable Programmable ROM*), joka voidaan kirjoituksen jälkeen myös tyhjentää ultravioletin avulla. Sitä varten piirien koteloissa on ikkuna. Piirin tyhjennys kestää viidestä kahteenkymmeneen minuuttia, jonka jälkeen se on vielä ohjelmoitava erillisellä ohjelmointilaitteella. Koska ikkunalliset kotelot ovat suhteellisen kalliita, EPROM-piirejä on saatavilla myös umpinmaisissa koteloissa, jolloin puhutaan OTP-EPROM -muisteista (*One-Time Program-*



Kuva 3.1: Ikkunallisessa kotelossa oleva EPROM-muistipiiri sekä lähikuva ikkunan alla olevasta varsinaisesta muistisirusta. Koko piirin pituus on noin 37 millimetriä.

mable). Tällöin ohjelmistonkehityksen aikana käytetään ikkunallisia piirejä, mutta lopullisiin tuotteisiin asennetaan kertaohjelmoitavat umpinaiset piirit. Näin kehitystyö on joustavaa, mutta valmiista tuotteesta saadaan edullinen. [11, s. 38]

Kuvassa 3.1 on AMD:n valmistama AM27C512-tyyppinen ikkunallinen EPROM-piiri. Kyseisen piirin kapasiteetti on 512 kilobittia [18]. Kuvassa 3.2 sama piiri on esitetty tyhjennys- ja ohjelmointilaitteisiin asennettuna. Varsinaisen tyhjennyksen ajaksi piiri työnnetään laitteen sisään.

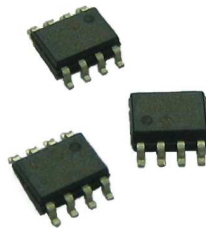
3.2 EEPROM

Ensimmäisen EEPROM-muistin eli sähköisesti tyhjennettävän lukumuistin (*Electrically Erasable Programmable ROM*) julkaisi Intel vuonna 1981. EEPROM-tekniikka kehittyi 1980-luvun kuluessa voimakkaasti nykyiselle tasolle. [11, s. 54]

Nykyaikainen EEPROM-piiri ei tarvitse erillistä ohjelmointilaitetta, vaan se voidaan ohjelmoida laitteen oman suorittimen avulla ilman mitään erityistä ohjelmointialgoritmia tai -ohjelmaa. Piiriä ei myöskään tarvitse erikseen tyhjentää ennen kirjoitusta, vaan uusi data voidaan kirjoittaa suoraan vanhan datan päälle tavu kerrallaan. Toisaalta useiden millisekuntien datankirjoitusaika tavua kohti on suhteellisen pitkä. Lisäksi piirit kestävät vain noin 10^4 – 10^5 kirjoituskertaa. [11, s. 38, 54]



Kuva 3.2: Vasemmalla EPROM-muistin tyhjennyslaite ja oikealla ohjelmointilaite. Kuvan 3.1 piiri on asetettu kumpaankin laitteeseen.



Kuva 3.3: 25LC040-tyyppisiä EEPROM-piirejä. Pisimmän särmän pituus on noin 5 millimetriä.

EEPROM-muistin tiheys on suhteellisen pieni, mikä nostaa sen hintaa. Siksi piirejä ei valmisteta kovin suurilla kapasiteeteilla. Parhaiten ne soveltuvat esimerkiksi yksittäisten parametrien ja konfiguraatietietojen tallentamiseen, kun datan kokonaismäärä on pieni ja kirjoitukset kohdistuvat lähinnä yksittäisiin tavuihin. [11, s. 38]

Pienten datamäärien haihtumattomaan tallennukseen on kehitetty sarjaliitännäisiä EEPROM-muisteja. Niissä käytetään tyypillisesti jotain standardoitua väylää, kuten I²C- tai SPI-väylää. Näin piirin liittäminen esimerkiksi mikro-ohjaimen on yksinkertaista, ja kun liitännänastoja tarvitaan vain vähän, piirit voidaan pakata hyvin pieniin koteloihin. [11, s. 82]

Kuvassa 3.3 on kolme Microchipin valmistamaa 25LC040-tyyppistä sarjamuotoista EEPROM-muistipiiriä. Yhden piirin kapasiteetti on neljä kilobittia ja liitännänä on SPI-väylä. [19]

3.3 Flash

Suurempien datamäärien tallennukseen sopii EEPROM-muistia paremmin flash-muisti. Flash-muistia valmistetaan NOR- ja NAND-tyyppisinä. Karkeasti jaettuna NOR-tyyppinen muisti soveltuu parhaiten ohjelmamuistiksi ja NAND-tyyppinen muisti datan tallentamiseen. Flash-muistin toimintaperiaate keksittiin vuonna 1984 Toshiba-yhtiössä. Ensimmäisiä kaupallisia tuotteita olivat Intelin vuonna 1988 julkaisemat NOR-tyyppiset piirit. Vuonna 1989 julkaistiin Toshiba ja Samsungin valmistama NAND-tyyppinen muisti. [20]

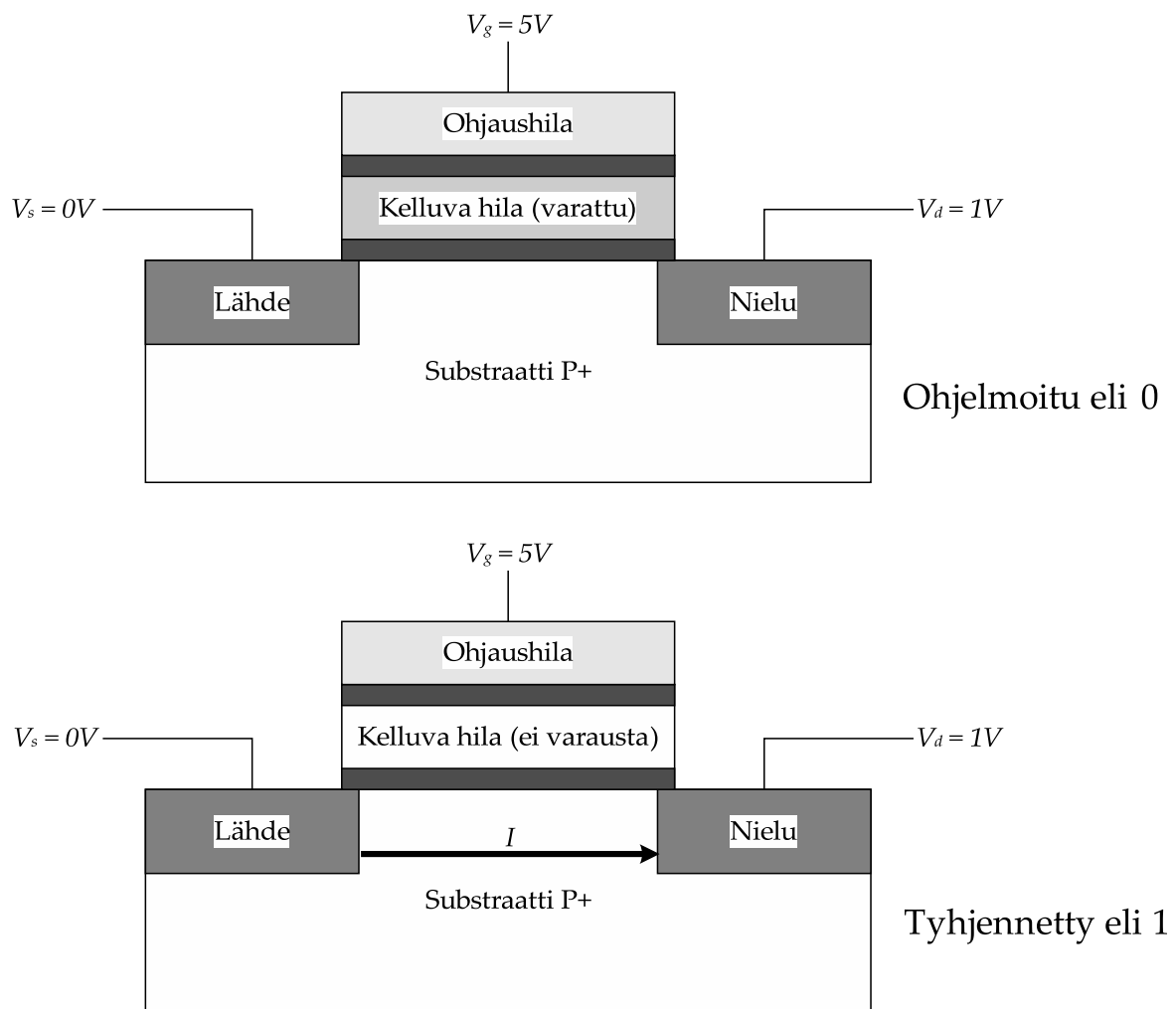
Flash-muistien kehitys on ollut erittäin voimakasta 1990-luvulta lähtien. Niille on tyypillistä, että muisti täytyy sähköisesti tyhjentää ennen kirjoittamista. Ensimmäiset flash-piirit oli tyhjennettävä kokonaan (*Bulk Erase*). Uudemmat piirit koostuvat sektoreista, jotka voidaan tyhjentää toisistaan riippumatta (*Sector Erase*). Jokainen tyhjennys ja ohjelmointi kuluttaa piirejä jonkin verran. Useimmat flash-piirit kestävät noin 10^5 – 10^6 kirjoituskertaa. Vanhemmat piirit tarvitsivat lisäksi erillisen, korkeamman jännitteen tyhjennystä varten. Nykyiset piirit toimivat pääosin yhdellä jännitteellä, ja tyhjennysjännite kehitetään piirin sisäisellä varauspumpulla. [11, s. 60]

3.3.1 Flash-muistin toimintaperiaate ja kehitys

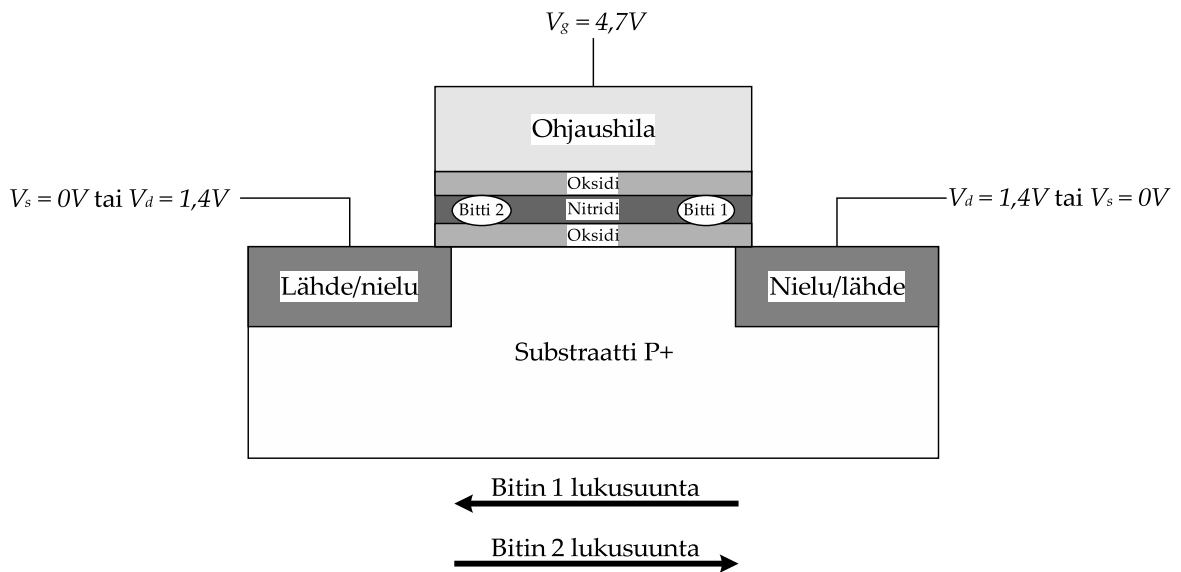
Flash-muisti koostuu soluista, joiden rakenne muistuttaa NMOS-transistoria sillä erolla, että varsinaisen ohjaushilan (*control gate*) ja p-tyypin puolijohteesta koostuvan kanavan välissä on ylimääräinen kelluva hila (*floating gate*). Kanavan vastakkaisissa päissä ovat transistorin n-tyypin puolijohteesta koostuvat lähde (*source*) ja nielu (*drain*). Flash-solun rakenne ja toiminta on esitetty kuvassa 3.4. [21]

Muistisolua luettaessa ohjaushilalle tuodaan jännite ja lähteeltä nielulle kulkeva virta mitataan. Tämä virta riippuu kelluvan hilan varauksesta. Kun solu on tyhjennetty, kelluvalla hilalla ei ole varausta. Tällöin virta lähteeltä nielulle kulkee hyvin ja solun katsotaan olevan tilassa 1. Ohjelmoidun solun kelluvalla hilalla on varaus, joka estää virran kulkemisen lähes kokonaan. Tällöin solun tila on 0. [21]

NMOS-transistorin tyyppisen rakenteen ansiosta flash-muistien skaalautuminen on seurannut CMOS-teknologian kehitystä, eli fyysisesti samankokoiseen piiriin saa-



Kuva 3.4: Flash-muistisolun rakenne ja toiminta [21].



Kuva 3.5: Nitridipohjaisen kahden bitin flash-muistisolun rakenne ja toiminta luettaessa [22].

daan mahtumaan aina enemmän muistisoluja. Piirien tallennustiheyttä on pyritty kasvattamaan myös muilla tavoilla. Yksittäiseen soluun voidaan tallentaa myös useampi bitti. Kelluvalle hilalle voidaan ohjelmoida erisuuruisia varauksia, jolloin myös solun läpi kulkevalle virralle saadaan eri tasoja. Esimerkiksi neljän varaustason avulla voidaan tallentaa kaksi bittiä. Tekniikkaa kutsutaan nimellä MLC eli *Multi Level Cell*. Tällaisen solun ohjelmointi on kuitenkin huomattavasti tarkempi ja hitaampi toimenpide kuin yksibittisen solun ohjelmointi. [21]

Kelluva hila voidaan myös korvata oksidi-nitridi-oksidi -kerroksella, jonka kumpaankin päähän voidaan ohjelmoida toisistaan riippumaton varaus ja siten tallentaa kaksi bittiä yhteen soluun. Tällainen solu on esitetty kuvassa 3.5. Solun rakenne on symmetrinen, jolloin molemmat päät voivat toimia sekä nieluna että lähteenä. Solun päiden käyttötavasta — eli käytännössä niihin kytketyistä jännitteistä — riippuu, kumpaa puolta nitridikerroksesta ohjelmoidaan tai luetaan. Luettaessa nieluna käytetyllä puolella oleva bitti ei vaikuta virran kulkuun, jolloin vain lähteen puoleinen bitti tulee luettua. AMD:n ja Fujitsun yhteisyrityksen Spansionin käyttämä MirrorBit-tekniikka perustuu tällaiseen ratkaisuun. Myös Saifun Semiconductors on kehittänyt samantyyppistä tekniikkaa nimellä NROM. Yksittäisen muistisolun kapasiteettia voidaan edelleen kasvattaa neljään bittiin yhdistämällä NROM-tekniikkaan MLC-tyyppinen useamman varaustason ohjelmointi. [22][23]

3.3.2 NOR- ja NAND-tyypin flash-muistit

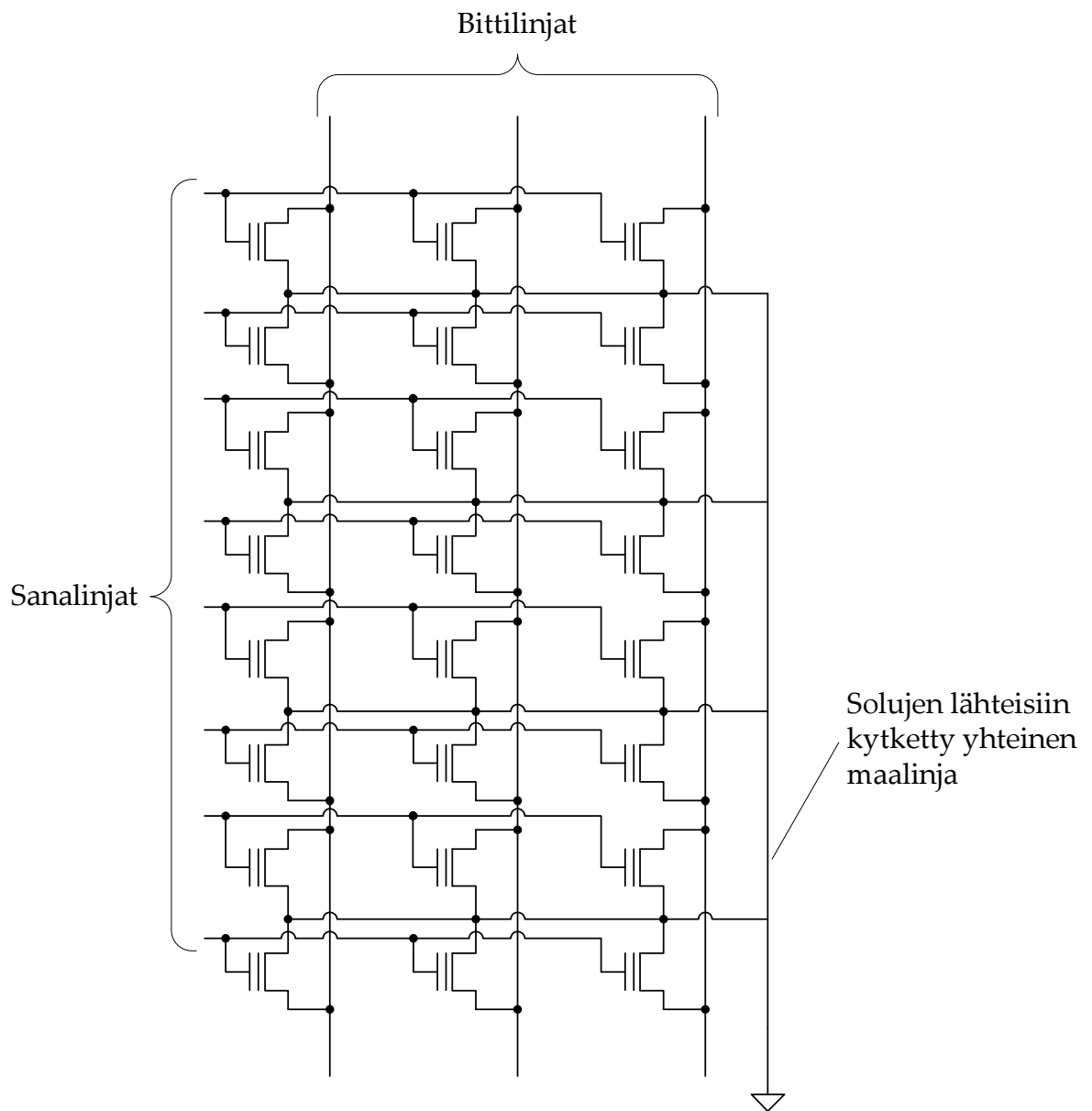
Flash-muistia valmistetaan kahta rakenteeltaan erilaista tyyppiä, NOR- ja NAND-flashia. Yksittäiset muistisolut ovat molemmissa tyypeissä periaatteessa samanlaisia, mutta solut on järjestetty eri tavoilla ja yksittäisen bitin ohjelmoinnissa käytetään erilaista tekniikkaa. Kuvissa 3.6 ja 3.7 on esitetty NOR- ja NAND-tyyppisten muistimatriisien rakenne. Myös muita flash-tyyppejä on kehitetty, mutta NAND ja NOR ovat hallinneet markkinoita. [24]

NOR-tyyppinen flash kehitettiin alun perin nimenomaan EPROM-muisteja korvaamaan, ja ensimmäiset sovellukset muistuttivatkin niitä jonkin verran. Esimerkiksi piirin ohjelmointia varten tarvittiin ohjelmointilaite ja erillinen, 12 voltin jännite. Muistityypin nimi tulee solujen NOR-tyyppisestä järjestyksestä. Tämä tarkoittaa, että solut on kytketty lähteistään rinnan yhteiseen maahan ja solujen nielut on kytketty suoraan bittilinjoihin. Suora kytkentä bittilinjoihin ja suhteellisen suuri virta mahdollistavat yksittäisen solun nopean lukemisen. [24][25, s. 378]

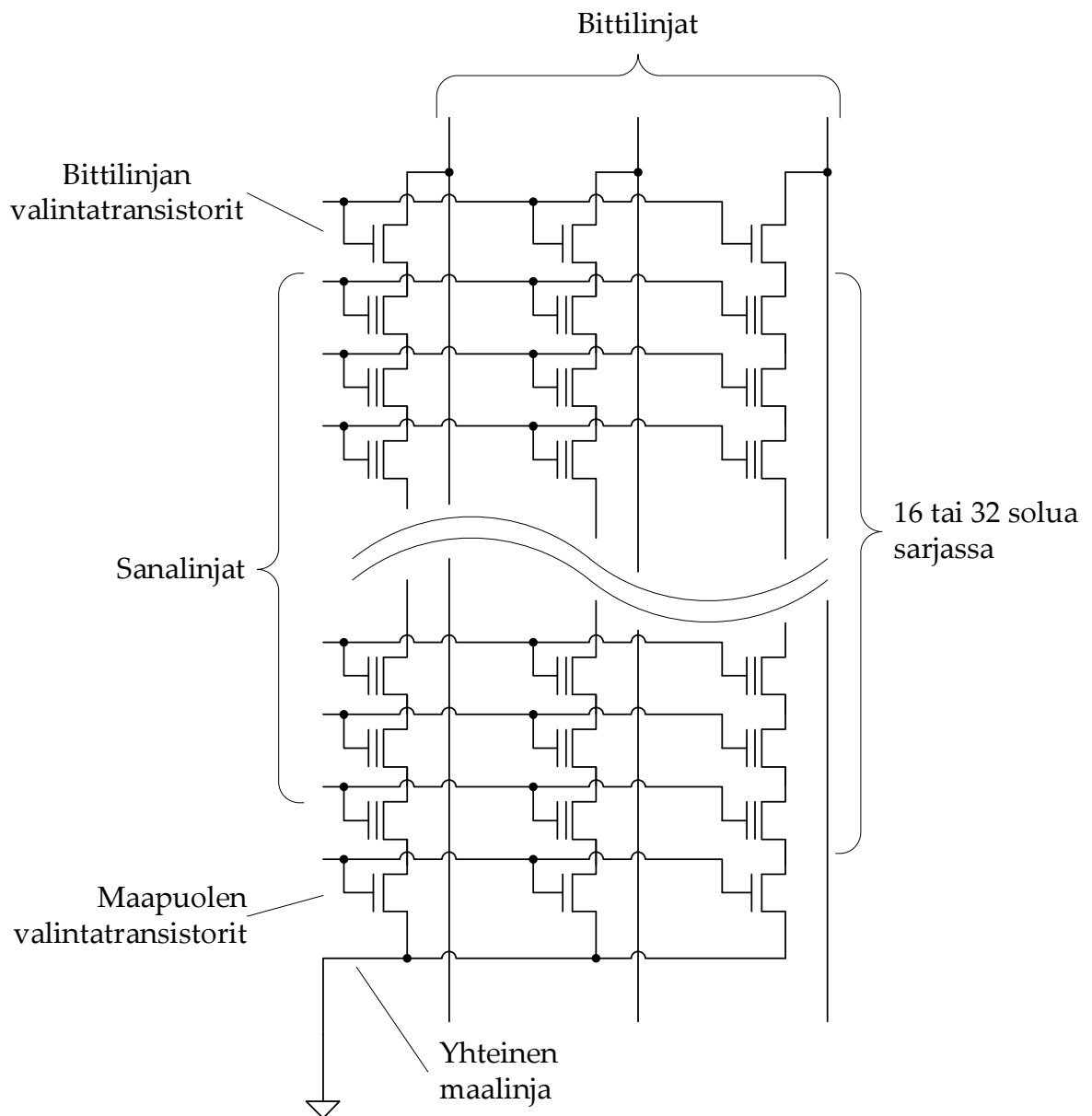
NOR-solun ohjelmointiin käytettyä tekniikkaa kutsutaan nimellä *Channel Hot-Electron Injection* (CHEI) Siinä elektroneja kiihdytetään sellaiselle energiatasolle, että ne voivat läpäistä muistisolun lähteen tai nielun ja kelluvan hilan välisen eristekerroksen. CHEI soveltuu kuitenkin ainoastaan solun ohjelmointiin. NOR-solun tyhjennykseen käytetään kvanttimekaniikkaan perustuvaa tekniikkaa nimeltä *Fowler–Nordheim-tunnelointi* (F–N). Siinä elektroneja tunneloidaan solun kanavasta kelluvalle hilalle tai toisin päin. [25, s. 340, 343]

CHEI-tekniikalla kirjoitettu data säilyy muistissa erittäin hyvin. Muistin luotettavuus pysyy hyvänä skaalattaessa valmistuskokoa pienemmäksi ja myös NOR-tyyppinen solujärjestys auttaa torjumaan erilaisia häiriöitä käytettäessä suuria luku- ja kirjoitusnopeuksia. [24]

NAND-tyyppisessä flash-muistissa 16 tai 32 yksittäistä solua on kytketty sarjaan bittilinjan ja maan väliin. Muistisoluketjun ja bittilinjan välissä on bittilinjan valintatransistori (*Bit-line Select Transistor, SSL*) sekä ketjun ja maalinjan välissä maapuolen valintatransistori (*Ground Select Transistor, GSL*). NAND-muistin lukeminen tapahtuu siten, että luettavan solun sanalinja kytketään maahan ja muiden samassa sarjassa olevien solujen sanalinjat käyttöjännitteeseen. Luettavan solun arvo tunnistetaan bittilinjaan kytketyn tunnistusvahvistimen avulla. Sarjakytkennästä joh-



Kuva 3.6: NOR-tyyppisen muistimatriisin rakenne [24][25, s. 378–379].



Kuva 3.7: NAND-tyyppisen muistimatriisin rakenne [24][25, s. 392–393].



Kuva 3.8: K9K4G08U0M-tyyppinen NAND flash -piiri. Piirin suurin leveys on noin 20 millimetriä.

tuen käytettävä virta on huomattavasti pienempi kuin NOR-tyyppisessä muistissa ja sen takia hakuajat ovat selvästi pitempiä. Tyypillisesti NAND-solun haku aika on mikrosekunteja ja NOR-solun kymmeniä nanosekunteja. Hyvänä puolena sarjakyt-kentä vaatii vähemmän kytkentöjä piirillä, jolloin sama määrä muistisoluja saadaan pakattua pienempään tilaan. [24][25, s. 392–393]

NAND-muistissa sekä datan kirjoittamiseen että muistin tyhjennykseen käytetään F–N -tunnelointia. Kirjoitustekniikkana se ei ole yhtä luotettava kuin NOR-muistissa käytetty CHEL. Tämä vaatii virheenkorjauksen käyttöä, joka edelleen vaikeuttaa hajasaanti-tyyppistä käyttöä. Toisaalta F–N ei vaadi suuria sähkövirtoja, mikä mahdollistaa rinnakkaisen kirjoittamisen piirin sisällä ja siten korkean tallennusnopeu-den. [24]

Muistityyppien toisistaan poikkeavat ominaisuudet vaikuttavat huomattavasti nii-den käyttökohteisiin. Nopea hajasaanti ja luotettava datan säilyminen ovat tehneet NOR-flashista ohjelmamuistin, jota käytetään esimerkiksi mikro-ohjaimissa. Ohjel-makoodia voidaan ajaa suoraan flash-muistista tarvitsematta erikseen siirtää sitä RAM-muistiin. NAND-tyyppisen flashin parempi kirjoitusnopeus ja suurempi tal-lennustiheys ovat tehneet siitä mobiililaitteiden massamuistin. Piirivalmistajien ke-hittämät erilaiset sovellukset ovat kuitenkin jonkin verran hämärtäneet NOR- ja NAND-flashien käyttökohdejakoja. [21]

Kuvassa 3.8 on Samsungin valmistama NAND-tyyppinen flash-piiri K9K4G08U0M. Muistin kapasiteetti on 512 megatavua. [26]

3.3.3 Flash-muistin käytöstä

Flash-muistilla on tiettyjä ominaispiirteitä, jotka täytyy ottaa huomioon muistia käyttävää laitetta suunniteltaessa. Jos esimerkiksi muistin kulumista ei huomioida, laitteen käyttöikä voi lyhentyä huomattavasti. Myös kirjoitus-, luku- ja tyhjennysnopeudet sekä kerralla tyhjennettävän lohkon koko on otettava huomioon korvattaessa muita tallennustekniikoita flash-muistilla. Erityisesti NAND-flashin käyttöön liittyvät olennaisesti virheenkorjaus ja virheistä toipuminen. Flash-pohjaista massamuistia käytettäessä myös tiedostojärjestelmän valintaan täytyy kiinnittää huomiota sovellustasolla.

Flash-muisti kestää rajallisen määrän tyhjennys- ja kirjoituskertoja. Monet sovellukset johtavat siihen, että joihinkin tiettyihin kohtiin muistissa kirjoitetaan hyvin usein. Tyypillinen esimerkki tästä on massamuistikäytössä tarvittava tiedostojärjestelmä, jonka tilanvaraustaulukoita joudutaan päivittämään aina, kun muistiin kirjoitetaan uusia tiedostoja tai vanhojen koko muuttuu. Muistialueen alussa olevat lohkot, joissa tilanvaraustaulukot yleensä sijaitsevat, kuluvat tällöin huomattavasti varsinaisen datan tallennukseen käytettäviä lohkoja nopeammin. Lohkorakenteen ansiosta yhden lohkon loppuunkuluminen ei suoraan tee koko piiriä käyttökelvottomaksi. Sovelluksen olisi kuitenkin jollakin tavalla toivuttava toimivan tallennuskapasiteetin vähentymisestä sekä siitä, että tilanvaraustaulukoita ei voida enää ylläpitää samassa paikassa. [25, s. 329][27, 2. luku]

Käytettäessä NAND-tyyppistä flashia massamuistina, dataa tallennetaan ja luetaan tyypillisesti sivuina, joiden koko on usein kiintolevyjen sektorin tapaan 512 tavua. Muistista kuitenkin tyhjennetään kerrallaan vähintään yksi lohko, joka koostuu useista sivuista. Jos yhden sivun sisältöä halutaan muuttaa, koko lohko täytyy siirtää turvaan esimerkiksi RAM-muistiin lohkon tyhjennyksen ajaksi, jonka jälkeen lohko voidaan kirjoittaa päivitettyinä takaisin flashiin. Jos järjestelmässä tapahtuu häiriö tämän toimenpiteen aikana, saatetaan kokonaisen lohkon sisältämä data menettää. [27, 2. luku]

Käyttämällä kulumisen tasausta (*wear leveling*) voidaan koko piirille taata tasainen kuluminen ja siten maksimoida sen käyttöikä. Tämä voidaan toteuttaa ylläpitämällä fyysisten muistiosoitteiden lisäksi myös loogisia osoitteita. Sovelluksen kannalta dataa tallennetaan loogisiin sivuihin. Kun dataa päivitetään, se kirjoitetaan fyysisesti eri paikkaan muistissa ja looginen osoite asetetaan viittamaan tähän uuteen paik-

kaan. Datan uudeksi fyysiseksi sijoituspaikaksi voidaan valita mikä tahansa vapaa, tyhjennetty muistilohko. Näin kaikkiin muistin fyysisiin lohkoihin kirjoitetaan keskimäärin yhtä paljon, riippumatta muistialueen loogisesta rakenteesta. Samalla datan kirjoittamisesta tulee turvallisempaa, kun muokattavan datan kanssa samassa lohkoissa sijaitseva muu data pysyy ennallaan. [27, 2. luku]

Tällä tavalla toteutettu kulumisen taseus vaatii myös jonkinlaisen muistinsiivouksen käyttöä, eli vanhentuneeksi merkittyä dataa sisältäviä lohkoja on ajoittain tyhjennettävä. Etuna tässä on se, että tyhjennystä ei välttämättä tarvitse tehdä aina kirjoittamisen yhteydessä, vaan esimerkiksi silloin, kun laite on muuten joutilaana. Data saattaa kuitenkin pirstoutua siten, että vaikka vapaata muistitilaa on runsaasti, täysin käyttämättömänä olevia lohkoja ei juuri ole, vaan lähes kaikissa lohkoissa on ainakin yksi käytössä oleva sivu. Kokoamalla ajoittain tällaisia yksittäisiä sivuja kokonaisiksi lohkoiksi saadaan vapautettua lohkoja tyhjennystä varten. [27, 2. luku]

Erityisesti NAND-tyyppiset flash-piirit ovat herkkiä häiriöille. Piireissä voi valmistusprosessista johtuen olla valmiiksi viallisia soluja, tai vikoja voi muodostua piirin käytön aikana. Joissakin tuotteissa, kuten AMD:n UltraNAND-piireissä on pyritty virheettömään tuotantoon. Toisissa tuotteissa puolestaan sallitaan tietty määrä vikaantuneita soluja tai lohkoja. Yksittäisien viallisten solujen vaikutusta voidaan poistaa käyttämällä virheenkorjausta (*Error Correction Code, ECC*). Jokaista 512 tavun datasivua kohti on tyypillisesti varattu 16 tavua virheenkorjaustietoa varten. [25, s. 394, 400][28]

Kokonaan vialliset lohkot voidaan merkitä pois käytöstä. Piirillä saattaa sitä varten olla jonkin verran muistille ilmoitettua maksimikapasiteettia enemmän fyysisiä muistilohkoja. Näin vikaantuneet lohkot voidaan määrättyyn rajaan asti korvata ehjillä ilman, että muistin sovellustasolle näkyvä kapasiteetti pienenee. [29]

Käytettäessä flash-muistia kiintolevyjen tapaan massamuistina, tarvitaan jonkinlainen tiedostojärjestelmä. Tämä voidaan toteuttaa pääpiirteissään kahdella tavalla, joko käyttäen jotain yleiskäyttöistä, valmista tiedostojärjestelmää tai omaa, juuri kyseiseen käyttötarkoitukseen räätälöityä järjestelmää. Kummassakin ratkaisussa on omat etunsa ja haittansa. Käyttämällä esimerkiksi muistikortilla jotain yleistä tiedostojärjestelmää, kortti voidaan suoraan lukea valmiilla, yleisesti saatavilla olevilla lukulaitteilla, käyttöjärjestelmillä ja ohjelmilla. Oma järjestelmä puolestaan voidaan sovittaa juuri sovelluskohteeseen sopivaksi, ja siitä voidaan tehdä kevyt, jolloin ra-

jallisia laitteistoresursseja säästyy. Tällöin kuitenkin tarvitaan myös omat lukulaitteet ja -ohjelmat. [8]

On myös kehitetty erilaisia tiedostojärjestelmiä nimenomaan flash-muistia varten. Lähteessä [30] esitetään hajautuspohjainen järjestelmä, jonka tarkoitus on tarjota tehokkaat hakutoiminnot pienitehoisessa laitteessa. Järjestelmä ottaa huomioon myös kulumisen tasauksen ja erilaiset luku- ja kirjoitusnopeudet. Lähteessä [27] on vertailtu erilaisia flash-muisteissa käytettyjä tiedostojärjestelmiä ja algoritmeja käyttäen lähteenä vapaasti saatavilla olevaa kirjallisuutta sekä patenteja.

3.4 Haihtumaton RAM

Myös RAM-muistista voidaan tehdä haihtumatonta NVRAM-muistia (*Non-Volatile RAM*). Koska RAM-muisti tyhjenee, kun käyttöjännite katkaistaan, muistin haihtumattomuus toteutetaan joko pariston tai EEPROM-muistin avulla. [11, s. 39]

Paristovarmennettu NVRAM sisältää integroidun litiumpariston, jonka avulla vähän virtaa kuluttava CMOS-pohjainen SRAM-muisti voi säilyttää sisältönsä yli kymmenen vuotta. Samaan piiriin voidaan integroida myös muita katkeamatonta syöttöjännitettä tarvitsevia piirejä, kuten reaaliaikakello. [11, s. 54]

EEPROM-varmistettu NVRAM sisältää varsinaisen RAM-muistin lisäksi vastaavan kokoisen EEPROM-muistin, johon data tallennetaan ennen käyttöjännitteen katkaisua. Kun piiriin kytketään uudelleen jännite, data palautetaan automaattisesti RAM-muistiin. Tyypillisesti tällaista muistia käyttävän laitteen virtalähde antaa prosessorille keskeytyksen, kun jännite katkeaa, jolloin datan varmistus voidaan tehdä suotokondensaattorien varauksen turvin. [11, s. 54]

NVRAM-tekniikka on muihin haihtumattomiin muisteihin verrattuna suhteellisen kallista. Toisaalta tällainen muisti toimii käyttömuistina kuten mikä tahansa SRAM-muisti. Kirjoitus- ja lukuoperaatiot ovat nopeita eivätkä kuluta muistipiiriä. [11, s. 54]

3.5 Tulevaisuuden haihtumattomat muistit

Vaikka flash-muistit kehittyvät edelleen voimakkaasti, niiden skaalautumisessa tulee jossain vaiheessa raja vastaan. Tutkijat ovatkin alkaneet jo varautua tähän tilanteeseen kehittämällä uudenlaisia haihtumattomia muistitekniikoita. Samalla pyritään myös entisestään hämärtämään puolijohdemuistien jakoa RAM- ja ROM-muisteihin tai haihtuviin ja haihtumattomiin. Tarkoituksena on kehittää jonkinlainen yleismuisti, joka soveltuisi yhtä hyvin niin käyttömuistiksi kuin datan pysyvämpäänkin tallentamiseen. Tämä tavoite on kuitenkin vielä toistaiseksi saavuttamatta. [24]

Kolme tärkeintä kehitteillä olevaa tekniikkaa ovat Ferrosähköinen RAM (*Ferroelectric RAM*, FRAM tai FeRAM), Magnetoiresistiivinen RAM (*Magnetoresistive RAM*, MRAM) sekä aineen olomuodon muutokseen perustuva PCM (*Phase-Change Memory*, tai PRAM, *Phase-change RAM*). Jokaisella tekniikalla on omat etunsa, mutta mikään niistä ei ole vielä osoittautunut täydelliseksi tulevaisuuden muistiksi. [24]

FRAM-muistisolun muodostuu kondensaattorista, joka koostuu kahdesta elektrodista sekä niiden välisestä ferrosähköisestä kalvosta. Tämä muistuttaa jonkin verran DRAM-muistissa käytettyä kondensaattoria, johon data tallennetaan sähkövarauksena. FRAM-solussa data tallennetaan kuitenkin sähkövarauksen sijaan ferrosähköisen kalvon kiderakenteeseen. Käytetyillä perovskiittikiteillä on kaksi pysyvää polarisaatiotilaa, joiden välillä voidaan siirtyä kytkemällä aineeseen sähkökenttä. [25, s. 443–446]

Koska dataa ei tallenneta sähkövarauksena, muistisolun tilaa ei voida suoraan sähköisesti tunnistaa. Sen sijaan FRAM-muisti luetaan ohjelmoimalla se jompaan kumpaan tilaan. Tällöin voidaan kondensaattorista purkautuvan varauksen suuruudesta havaita, tapahtuiko solussa tilanmuutos, vai oliko se jo valmiiksi siinä tilassa johon sitä ohjelmoitiin. Lukuoperaatio on siis *destruktiivinen*, eli tallennettu data häviää luettaessa ja se on lukemisen jälkeen kirjoitettava piirille uudestaan. Siksi jokainen lukuoperaatio kuluttaa muistia kirjoitusoperaation tapaan. [25, s. 443–446, 467]

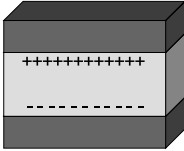
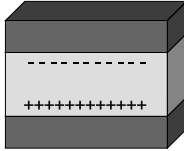
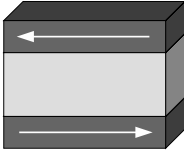
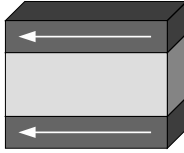
MRAM-muistisolun koostuu päällekkäisistä magneettisista ja ei-magneettisista kerroksista. Magneettisten kerrosten magneettikenttien suunnat määräävät muistisolun tilan. Solua luetaan mittaamalla sen resistanssia. Jos magneettisten kerrosten

magneettikentät ovat samansuuntaisia, resistanssi on alhainen. Vastakkaissuuntaiset magneettikentät puolestaan aiheuttavat suuremman resistanssin. Kenttien tiloja muutetaan ulkoisen magneettikentän avulla. MRAM-muistin vahvoina puolina mainitaan suuri kirjoitus- ja lukunopeus, kestävyys, suhteellisen yksinkertainen valmistusprosessi sekä hyvät skaalautuvuusmahdollisuudet. Ongelmia sen sijaan ovat solun suhteellisen suuri koko, suuri virrankulutus kirjoituksen aikana, lämpötilan kesto sekä resistanssin mittaukseen liittyvät ongelmat. [25, s. 551–555]

PCM-muistit perustuvat aineisiin, jotka ovat pysyviä sekä kiteisessä että amorfisessa muodossa. Optiset ja sähköiset ominaisuudet riippuvat niiden olomuodosta, jota voidaan muuttaa sähköisillä tai optisilla energiapulsseilla. Siten näitä aineita voidaan käyttää datan tallentamiseen. Tällaisia aineita ovat alkuaineiden jaksollisen järjestelmän 16. eli happiryhmän alkuaineiden muodostamat yhdisteet, joita kutsutaan englanniksi nimellä *chalcogenide materials*. Näitä aineita käytetään esimerkiksi kirjoitettavissa CD- ja DVD-levyissä, joita luetaan optisesti. Osasta näitä aineita voidaan kuitenkin valmistaa myös sähköisesti luettavia muisteja. Kiteisessä muodossa näiden aineiden resistanssi on alhainen ja amorfisessa muodossa suuri. Tilanmuutokset saadaan aikaan kuumentamalla ja jäädyttämällä ainetta nopeasti. [25, s. 602–607]

Flash-muistiin verrattuna PCM-muistisolut voidaan tyhjentää yksitellen ja 10–100 kertaa flash-solua nopeammin. Ohjelmointiin ei tarvita korkeita jännitteitä, mikä parantaa muistien yhteensopivuutta CMOS-teknologian kanssa. Koska PCM perustuu fyysiseen muutokseen aineessa, se sietää hyvin ulkoista säteilyä. Toisaalta suurempien muistimatriisien kestävyyttä ei ole vielä saatu riittävän hyvälle tasolle. Ongelmia on aiheuttanut myös muistin tyhjennykseen tarvittava suhteellisen suuri sähkövirta, jota on alennettava, ennen kuin suuria muistimatriiseja voidaan valmistaa. [24][25, s. 602–607]

Taulukossa 3.1 on esitetty yhteenveto näistä kolmesta uudesta muistitekniikasta. Mikään näistä ei ole vielä laajamittaisessa käytössä ja tuotannossa. Pieniä, noin 512 kilotavun FRAM-muisteja on jo kaupallisesti saatavilla, mutta suurempien piirien valmistus on osoittautunut vaikeaksi [31]. Myös ensimmäiset kaupalliset MRAM-piirit ovat tulleet markkinoille [32]. Valmistajat ovat lupailleet kaupallisia PCM-muisteja vuosikymmenen lopulle [33]. Tarvitaan kuitenkin vielä sekä uusia teknologisia innovaatioita että tuotantomenetelmien kehitystä, jotta nämä uudet muistitekniologiat voivat tulla yleiseen käyttöön. On kuitenkin todettu, että perinteisempiä

Tekniikka	Muistisolun perusta	Ylätilan tallennus	Alatilan tallennus
FRAM	ferrosähköinen kondensaattori		
MRAM	magneettisten ja ei-magneettisten kerrosten pino		
PCM	Happiryhmän yhdiste	Amorfinen tila	Kiteinen tila

Taulukko 3.1: Tulevaisuuden haihtumattomat muistitekniikat [24][31].

muisteja voidaan vielä edelleen kehittää, joten muistien kehityksen hidastumisen ei odoteta rajoittavan yleistä tekniikan kehitystä. [24][34]

3.6 Muistikortit

Jo 1990-luvun alkupuolelta lähtien on valmistettu flash-muistipiireihin perustuvia muistikortteja. Nykyisin niiden tärkein käyttökohde ovat kannettavat multimedia-laitteet, kuten digitaalikamerat, audio- ja videosoitinimet sekä matkapuhelimet. [20]

Erilaisia korttiformaatteja on lukuisia, eivätkä kaikki markkinoille tuodut formaatit ole päätyneet yleiseen käyttöön. Kortteja on kehitetty eri lähtökohdista, joihin ovat vaikuttaneet kortteja kehittäneet yritykset sekä niiden tavoitteet. Yleinen kehitys kulkee kuitenkin kohti fyysisesti entistä pienempiä kortteja sekä suurempaa tallennuskapasiteettia ja siirtonopeutta.

Muistikorttien käyttö on yleistymässä myös sulautetuissa järjestelmissä. Vaikka paljaat muistipiirit ovat halvempia, on korttien käytössä kuitenkin etuja. Erityisesti laitesarjan alkuvaiheessa muistin vaihdettavuudesta on hyötyä. Lisäksi useimmilla korteilla on itse muistipiirien lisäksi myös ohjainpiiri valmiina. [20]

Flash-piirien lukemiseen ja kirjoittamiseen liittyvät algoritmit ja komennot vaihtelevat muistin tyypistä ja valmistajasta riippuen. Muistikortille sisäänrakennettu ohjainpiiri tarjoaa korttia käyttäville laitteille yhtenäisen, korttistandardissa määritellyn rajapinnan. Tällöin korteilla voidaan käyttää lähes mitä tahansa muistisiruja ulkoisen liitännän muuttumatta. Lisäksi ohjainpiiri huolehtii flash-muistin käyttöön olennaisesti liittyvistä toiminnoista, kuten kulumisen tasauksesta ja virheenkorjauksesta. 1990-luvun lopulla CompactFlash oli ainoa suosittu ohjainpiirin sisältävä muistikorttiformaatti. Sittemmin tilanne on kääntynyt päinvastaiseksi, sillä lähes kaikissa uusissa korteissa on ohjainpiiri. [20][35]

Sulautetuissa järjestelmissä kortin mahdollisimman pieni koko ei ole niin tärkeää kuin kuluttajatuotteissa. Enemmän huomiota kiinnitetään kortin toimintaan ja kestävyteen vaativissa käyttöolosuhteissa. Joistakin korteista valmistetaan erityisiä teollisuuskäyttöön suunniteltuja versioita, jotka sietävät paremmin voimakkaita värähtelyjä sekä suurempia lämpötilanvaihteluita. Mekaanista kestävyyttä voidaan parantaa täyttämällä kortin kotelo eristävällä ja vaimentavalla massalla. Tehokkaampi virheenkorjaus parantaa luotettavuutta, mutta kuluttaa samalla muistikapasiteettia. [36]

Eräs muistikorttia valittaessa huomioitava asia on kortin käyttöjännite. Vanhimmat kortit toimivat viiden voltin jännitteellä, mutta nykyisin 3,3 voltia on yleisin. Lisäksi joistakin korttityypeistä on kehitetty myös 1,8 voltin versioita uusia, alhaisella jännitteellä toimivia mobiililaitteita varten. [20]

Seuraavassa tutustutaan tärkeimpiin muistikorttityyppeihin sekä korttien käyttöön sulautetuissa järjestelmissä. Taulukossa 3.2 on esitetty yhteenveto eri korttityyppien teknisistä tiedoista. Tässä esiteltyjen korttien lisäksi käytössä on myös MemoryStick- ja xD Picture Card -kortteja. Niitä koskevat standardit ovat kuitenkin suljettuja, eikä niiden toiminnasta ole juurikaan saatavilla julkista tietoa [20].

3.6.1 PC Card -muistikortit

PCMCIA-yhteisön kehittämä PC Card -liitännä on tuttu kannettavista tietokoneista. Alun perin liitännä kehitettiin nimenomaan muistikortteja varten. Tarve PC Card -korttien tyyppisen teknologian kehittämiseen tuli teollisuudesta. Magneettiset nauhoihin ja levyihin perustuvat tallennusmenetelmät eivät olleet tarpeeksi luotettavia

Formaatti	Mitat (mm)	Liitäntä- nastojen määrä	Datalinjojen määrä	Suurin siirtonopeus (MB/s)	Käyttöjännite (V)
PC Card	85,6 × 53,8 × 3,3 (tyyppi I) 85,6 × 53,8 × 5,0 (tyyppi II) 85,6 × 53,8 × 10,4 (tyyppi III)	68	8, 16 tai 32	16	3,3 tai 5,0
CompactFlash	42,8 × 36,4 × 3,3 (tyyppi I) 42,8 × 36,4 × 5,0 (tyyppi II)	50	8 tai 16	66	3,3 tai 5,0
MultiMediaCard (MMC)	24 × 32 × 1,4	7	1	2,5	3,3
RS-MMC	24 × 18 × 1,4	7	1	2,5	1,8 tai 3,3
MMCplus	24 × 32 × 1,4	13	1, 4 tai 8	52	1,8 tai 3,3
MMCmobile	24 × 18 × 1,4	13	1, 4 tai 8	52	1,8 tai 3,3
MMCmicro	14 × 12 × 1,1	10	1 tai 4	26	1,8 tai 3,3
SecureDigital (SD)	24 × 32 × 2,1	9	1 tai 4	10	3,3
miniSD	20 × 21,5 × 1,4	11	1 tai 4	10	3,3
microSD	11 × 15 × 1,0	8	1 tai 4	10	3,3

Taulukko 3.2: Yhteenvedo muistikorttiformaateista [20][37][38].



Kuva 3.9: PC Card -muistikortteja. Kuva julkaistu SanDiskin luvalla.

likaisiin ja täriseviin oloihin. Muistikorttien tukeva rakenne ja liikkuvien osien puuttuminen sopi paremmin tehtaiden lokinpitojärjestelmiin. [39]

Ensimmäinen versio PC Card -standardista julkaistiin vuonna 1990. Kortit ovat pinta-alaltaan luottokortin kokoisia ja niissä on 68-nastainen liitäntäväylä. Jo alusta alkaen kortille suunniteltiin monenlaisia käyttökohteita tietokoneista digitaalikameroihin. Seuraavana vuonna julkaistu standardin toinen versio toi mahdollisuuden käyttää liitäntää myös erilaisten oheislaitteiden liittämiseen. Siten PC Card -väylästä tuli kannettavien tietokoneiden ensimmäinen standardoitu liitäntäväylä. [39]

Flash-muistin lisäksi PC Card -korteissa on tiedon tallennukseen käytetty myös pienikokoisia kiintolevyjä [39]. Kuvassa 3.9 on esitetty PC Card -muistikortteja.

3.6.2 CompactFlash

Kannettavia tietokoneita pienempiin laitteisiin PC Card soveltuu huonosti kohtalaisen suuren kokonsa vuoksi. Se loi paineita kehittää pienempiä formaatteja. SanDisk-yhtiö esitteli vuonna 1994 CompactFlash-kortin, jolla on PC Cardin kanssa yhteensopiva rajapinta. Määrittelyä ylläpitää CompactFlash Association. [20]



Kuva 3.10: Erilaisia CompactFlash-kortteja: tavallinen ja teollisuusstandardit täyttävä CF sekä muistikortin ja WLAN-sovittimen yhdistelmä. Kuva julkaistu SanDiskin luvalla.

CompactFlashin liittimessä on vain 50 nastaa, mutta sen yhdistäminen PC Card-paikkaan onnistuu pelkällä passiivisella adapterilla. Tyypin I CF-kortin paksuus on noin puolet ja tilavuus neljäsosa tyypin II PC Cardista. Tyypin II CF-kortit ovat hieman suurempia, mutta nekin ovat tilavuudeltaan yli puolta pienempiä PC Cardiin verrattuna. PC Cardin tapaan myös CompactFlash-korttipaikkaan voidaan muistikorttien lisäksi liittää myös muita oheislaitteita sekä pienikokoisia kiintolevyjä. Kuvassa 3.10 on esitetty erityyppisiä CompactFlash-kortteja. [40]

Vaikka markkinoilla on monia vielä pienempiä korttiformaatteja, CompactFlashia käytetään yleisesti ammattilaistason digitaalikameroissa. Niissä tarvitaan mahdollisimman suurta tallennuskapasiteettia, jonka kortin suurempi fyysinen koko mahdollistaa. Vastaavasti jopa kymmenien megapikselien tarkkuudella otettujen kuvien tallennuksessa on etua myös suuresta siirtonopeudesta, joka saavutetaan kahdeksantai kuusitoistabittisellä rinnakkaisliitännällä. Yhteensopivuus PC Cardin sekä kiintolevyjen ATA-standardin kanssa takaa laajan tuen eri ympäristöissä. [20]

CompactFlash-kortteja on käytetty myös sulautetuissa järjestelmissä ja niistä on markkinoilla myös teollisuusstandardit täyttäviä malleja [20][41][42]. Nevins ym. esitte-

levät artikkelissaan [7] ihmisen selkärangan asentoja kiihtyvyyssantureiden avulla tarkkailevan laitteen, joka käyttää tiedon tallentamiseen CF-korttia. Kevyt laite on tarkoitettu pidettäväksi mukana arkipäivän toiminnoissa. Myöhemmin mittaustulokset voidaan ladata muistikortilta tietokoneelle jälkikäsitteilyä ja tarkastelua varten.

Panahi ym. [10] ovat kehittäneet merenpohjan tutkimukseen käytettyjä *seismometrejä* (*Ocean Bottom Seismometer, OBS*). Tällaisia seismometrejä asetetaan määrätysajaksi jopa kuuden kilometrin syvyyteen merenpohjaan mittaamaan värähtelyitä itsenäisesti. Tyypillisesti laitteissa on käytetty kiintolevyjä tiedon tallentamiseen. Tämä on kuitenkin rajoittanut laitteiden toiminta-aikaa ja tarkkuutta. Kiintolevyt kulluttavat suhteellisen paljon tehoa, jota langattomasti toimivassa mittalaitteessa on vain rajoitetusti saatavilla. Lisäksi kiintolevyn toiminta aiheuttaa häiriöitä mittaustuloksiin. Kiintolevyn korvaaminen CF-korteilla on selvästi korjannut näitä puutteita. Tallennustilan maksimoimiseksi laitteeseen voidaan kytkeä useita muistikortteja, joista tehon säästämiseksi kuitenkin vain yhteen kerrallaan kytketään virta. Korkean siirtonopeuden ansiosta kirjoitusjaksot jäävät lyhyiksi.

3.6.3 MultiMediaCard

Muistikortteja käyttävien laitteiden yhä pienentyessä on kehitetty edelleen pienempiä korttityyppejä. SanDisk ja Siemens esittelivät 1997 MultiMediaCardin eli MMC:n, joka kehitettiin Siemensin kehittämän, pelkkää ROM-muistia sisältäneen kortin pohjalta [43]. Kortista saatiin selvästi CompactFlashia pienempi vaihtamalla 50-nastaisen rinnakkaisliitännän tilalle seitsennastainen sarjaliitäntä [20].

MMC-määrittelyä ylläpitää vuonna 1998 perustettu MMCA- eli MultiMediaCard Association -yhteisö. Yhteisö pyrkii kehittämään korttiformaattiin liittyviä avoimia standardeja sekä edistämään niiden yhteensopivuutta. MMC-korttien tärkeimpiä käyttökohtia ovat erilaiset pienikokoiset mobiililaitteet kuten puhelimet ja digitaalikamerat. MMCA:n jäsenenä on yli 200 yritystä, joukossaan muistipiirien ja -korttien sekä erilaisten mobiililaitteiden valmistajia. [44]

CompactFlashien tapaan myös MMC-korteissa on sisäinen ohjainpiiri, joka tarjoaa korttia käyttäville laitteille standardinmukaisen rajapinnan. MMC-korttien yksibittinen sarjaliitäntä on kehitetty mikro-ohjaimissa yleisen SPI-väylän (*Serial Pe-*



Kuva 3.11: Erilaisia MultiMediaCard-kortteja samassa mittakaavassa: MMCplus, RS-MMC, MMCmobile ja MMCmicro. Kuva julkaistu ATP Electronicsin luvalla.

ripheral Interface) pohjalta. SPI-tilassa kortti voidaan helposti liittää suoraan yleisimpiin mikro-ohjaimiin. SPI-tilan lisäksi MMC-korteilla on toinenkin toimintatila, jossa käytössä on oma pakettimuotoinen siirtoprotokolla. MMC-toimintatilassa samaan väylään voidaan liittää 30 korttia ja SPI-tilassa 10. [43]

MMC-kortin perusversiosta on kehitetty edelleen nopeampia ja pienikokoisempia malleja. Kuvassa 3.11 on erityyppisiä MMC-kortteja. *RS-MMC* (Reduced Size) on perusmallia puolet pienempi kortti. Liitäntäosa on kuitenkin samanlainen, joten isommille kortteille suunnitellut lukulaitteet toimivat myös niiden kanssa. MMC-määrittelyn uusimmissa versioissa on esitelty *HS-MMC* -laajennus, joka lisää kortilla olevien liitäntänastojen määrää. Tällöin voidaan sarjaväylän sijaan käyttää neljän tai kahdeksan bitin rinnakkaisväylää, jolloin saavutetaan suurempi tiedonsiirtonopeus. Uuden määrittelyn mukaan isompia kortteja kutsutaan nimellä *MMCplus* ja puolta pienempiä nimellä *MMCmobile*. Uudetkin kortit tukevat silti myös vanhoja yksibittisiä MMC- ja SPI-toimintamuotoja [20][38]

Pienin MMC-määrittelyn mukainen kortti on matkapuhelimiin ja muihin pienimpiin mobiililaitteisiin tarkoitettu *MMCmicro*. Sen muoto poikkeaa jonkin verran isommista malleista, mutta mekaanista sovitinta käyttämällä se sopii samoihin korttipaikkoihin. [38]

Deniz ja Yilmaz esittelevät artikkelissaan [8] mukana kuljetettavan EKG-mittarin, joka käyttää tulosten tallentamiseen MMC-kortteja. Sairaaloissa tehtävien mittausten lisäksi usein halutaan mitata potilaan sydämen toimintaa myös päivittäisessä elämässä, koska joitakin poikkeavuuksia voidaan havaita vain esimerkiksi henkisen tai fyysisen rasituksen aikana. Vanhojen laitteiden kookkaiden, äänekkäiden ja epäluotettavien analogisten tallennusvälineiden korvaaminen digitaalisella muistikortilla on huomattavasti parantanut laitteiden laatua ja käyttömukavuutta sekä laskenut kustannuksia.

3.6.4 SecureDigital

Matsuhita, SanDisk ja Toshiba kehittivät MMC-kortin pohjalta *SecureDigital*- eli SD-kortin. Kortin nimi kertoo siihen liitetystä tiedonsalaustoiminnosta, jonka tarkoitus on pääasiassa estää musiikin luvaton kopiointia. Turvatekniikka on yhteensopiva CPRM:n (*Content Protection for Recordable Media*) SDMI-määrittelyn (*Secure Digital Music Initiative*) kanssa. Määrittely kehitettiin IBM:n, Intelin ja SD-kortin kehittäjien yhteistyönä. Tekniikka sallii tiedon kirjoittamisen ja lukemisen suojattuihin osioihin vain, kun korttiin liitetyt laitteet ovat hyväksytyä tyyppiä. Käytännössä turvaominaisuuksia on käytetty hyvin vähän. SD on erityisesti kuluttajamarkkinoille suunnatuissa digitaalikameroissa suosituin korttiformaatti ja muutenkin laajassa käytössä. [20][45]

SD-kortin ulkoiset mitat ovat samat kuin MMC-kortilla sillä erolla, että SD-kortti on 0,5 mm paksumpi. Lisäksi SD-korttiin on lisätty kaksi liitäntänaamaa, jotka mahdollistavat liitäntäväylän laajentamisen yksibittisestä sarjaväylästä nelibittiseksi rinnakkaisväyläksi. Näin saavutetaan suurempi siirtonopeus. SD-kortit tukevat kuitenkin myös MMC-korttien alkuperäistä sarjamuotoista liitäntää, jonka ansiosta kortit ovat hyvin pitkälle yhteensopivia. SD-korttipaikoissa voidaan käyttää molempia korttityyppejä, mutta SD-kortti ei välttämättä mahdu pelkästään MMC-kortteille tarkoitettuihin liittimiin. [20]

SD-kortille integroitu ohjainpiiri toteuttaa monia kortin käyttöä helpottavia ja käyttöä pidentäviä toimintoja automaattisesti. SanDiskin SD-kortin teollisuusversion käyttöoppaassa [47, luku 1.5] on esitelty kortin ohjainpiirin tarjoamia toimintoja. Virheiden hallinta- ja korjaustoimintoihin kuuluu muistiin kirjoitetun sektorin virheettömyyden varmistaminen lukemalla sekä luettaessa käytettävät tehokkaat vir-

heenkorjausalgoritmit. Jos jotain bittiä tai sektoria ei voida luotettavasti lukea, kortilla on jonkin verran ylimääräistä muistia, jolla viallinen kohta voidaan korvata. Muistisektoreiden kulumista tasataan automaattisesti pitkän käyttöiän varmistamiseksi. Myös kannettavissa laitteissa tärkeitä virransäästöominaisuuksia tuetaan.

Kuvassa 3.12 on esitetty SD-kortin looginen rakenne ja kontaktipintojen sijoittelu. Kontaktit 1–7 vastaavat MMC-kortin kontakteja ja kontaktit 8 ja 9 on lisätty nelibittistä tiedonsiirtoa varten [20]. Kuva 3.13 esittää erityyppisiä SD-kortteja. Kuvassa 3.14 SD-kortin kotelo on avattu ja sen piirilevy on irrotettu kotelostaan. Levylä näkyvä suurempi piiri on Samsungin valmistama NAND-tyyppinen flash-piiri K9F4G08U0M [48]. Sen takana näkyy kortin ohjainpiiri, joka on tyyppiä SM263CF.

Tammikuussa vuonna 2000 perustettu SD Card Association kehittää ja markkinoi SD-määrittystä. Yhteisön perustivat Matsuhita Electric, SanDisk ja Toshiba. Standardin tarkat määrittelykset ovat saatavilla vain yhteisön jäsenille, joita on yli 800. [49]

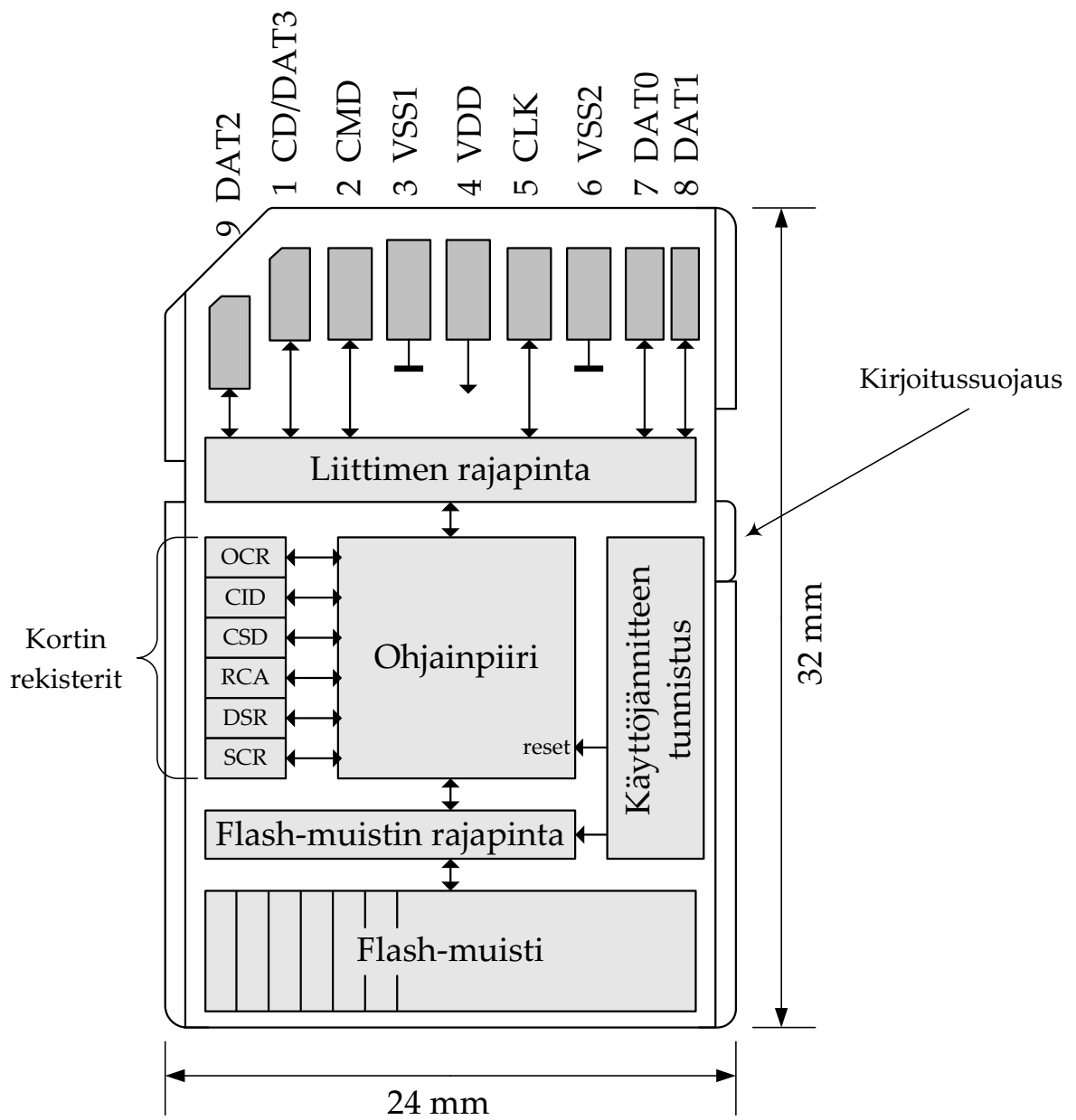
Myös SD-korteista on kehitetty versioita pienimpiä mobiililaitteita varten. Tilavuudeltaan noin 63 % tavallista SD-korttia pienempi *miniSD* on loogisella ja sähköisellä tasolla täysin tavallista SD-korttia vastaava. Mahdollista tulevaa käyttöä varten *miniSD*-korteissa on kaksi ylimääräistä kontaktipintaa. [50]

Pienin SD-kortti on kesällä 2005 esitelty *microSD*. Kortin kehitti alun perin SanDisk nimellä *TransFlash*, mutta nykyisin määrittystä hallinnoi SD Card Association. Tilavuudeltaan lähes 90 % tavallista SD-korttia pienempi *microSD* on tarkoitettu matkapuhelimiin. [49]

SD-kortin pienempiä versioita voidaan käyttää täysikokoisissa SD-korttipaikoissa sovittimien avulla. Tällainen sovitin toimitetaan usein kortin mukana. [51][52]

CompactFlash-korttien tapaan myös SD-kortteja on saatavilla teollisuusstandardit täyttävänä versioina sulautettuja laitteita varten [41][53]. Hsieh ym. [9] ovat toteuttaneet luvussa 3.6.3 mainitun kaltaisen EKG-mittauslaitteen SD-kortteja käyttäen. SanDisk ehdottaa lähteessä [54] *microSD*-kortteja käytettäväksi sulautetuissa laitteissa puolikiinteästi asennettuina kiinteiden flash-muistipiirien sijasta.

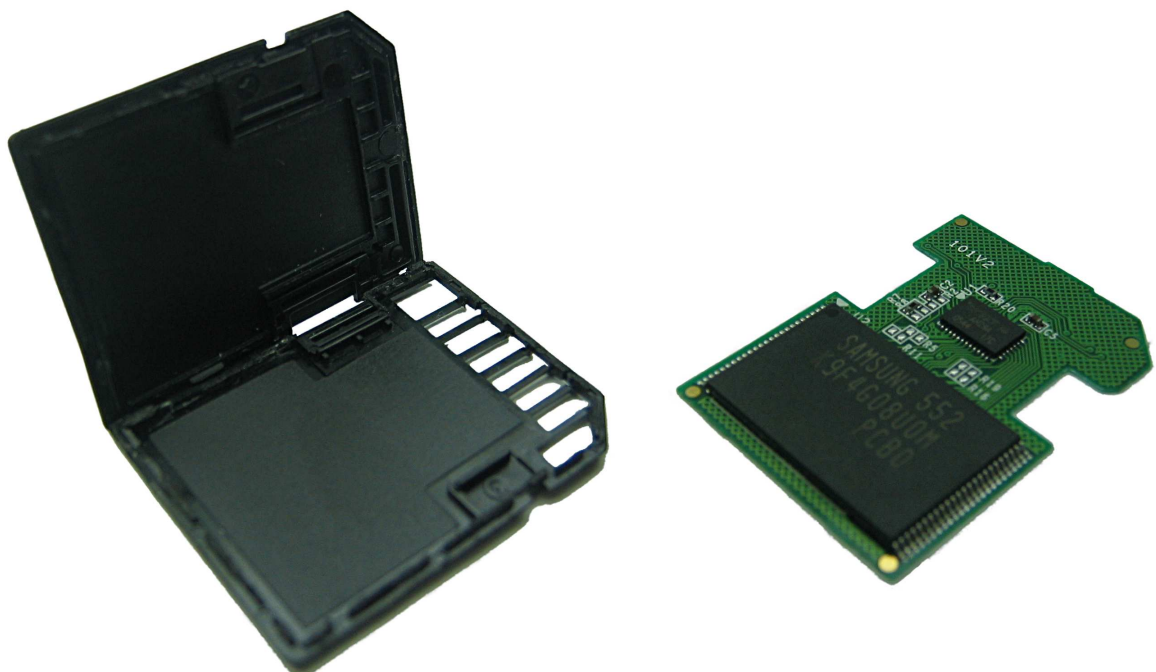
Vuoden 2006 loppupuolella markkinoille on tulossa uusia, standardin version 2.0 mukaisia SD-kortteja, joita kutsutaan nimellä SDHC (*SecureDigital High Capacity*). Tavalliset SD-kortit on tyyppillisesti alustettu käyttämään FAT16-tiedostojärjestelmää, joka tukee maksimissaan kahden gigatavun suuruisia osioita. SDHC-kortit käyttä-



Kuva 3.12: SD-kortin rakenne ja kontaktipinnat [46, s. 16].



Kuva 3.13: Erilaisia SecureDigital-kortteja samassa mittakaavassa: SD, teollisuustandardit täyttävä SD, miniSD ja microSD. Kuva julkaistu ATP Electronicsin luvalla.



Kuva 3.14: SD-kortin piirilevy kotelostaan irrotettuna.

vät oletuksena FAT32-tiedostojärjestelmää, ja standardi määrittelee uudeksi maksimikooksi 32 gigatavua. Uusille korteille on myös määritelty standardin mukaiset 2, 4 ja 6 MB/s nopeusluokat. Luokkien avulla on helpompaa valita sopivantasoisia kortteja korkeita siirtonopeuksia vaativiin laitteisiin, kuten tarkkoihin digitaalika-meroihin sekä videokameroihin. [55][56][57]

SD Card Associationin ja korttivalmistajien lehdistötiedotteiden mukaan uudet kortit toimivat vain erityisesti niitä varten suunnitelluissa laitteissa. Tarkempia teknisiä tietoja ei kuitenkaan ole vielä yleisesti saatavilla, eikä siten ole myöskään varmaa, miten suuria eroja uusien ja vanhojen korttien välillä on varsinkaan laitteistotasolla. On myös epävarmaa, toimivatko vanhat MMC- ja SPI-tyyppiset toimintamuodot SDHC-korteilla. [55][56][57]

3.6.5 USB-muistit

Nykyisin markkinoilla on erittäin paljon USB-liitäntäisiä flash-muisteja. Toiminnaltaan ne muistuttavat huomattavan paljon muistikortteja. Lähes kaikissa vuoden 1998 jälkeen valmistetuissa PC-tietokoneissa on USB-liitäntä [58]. Muistikortit tarvitsevat yleensä erillisen lukulaitteen. USB-massamuistilaitteille on myös määritelty standardi [59], jota useimmat käyttöjärjestelmät nykyään tukevat. Standardia ylläpitää *USB Implementers Forum*.

Verkkojen käyttäminen satunnaiseen tiedonsiirtoon vaatii usein hankalia asennuksia, jos koneita ei ole valmiiksi yhdistetty. Kirjoitettavat CD- ja DVD-levyt puolestaan soveltuvat paremmin datan arkistointiin. Näiden tekniikoiden välissä markkinoilla on tilaa USB-muisteille, jotka ovat saavuttaneet suuren suosion ja korvanneet perinteiset tietokonelevykkeet. Monien muistikorttien tapaan myös USB-muistit sisältävät ohjainpiirin, joka luo yhtenäisen rajapinnan varsinaisiin flash-muisteihin, sekä huolehtii kulumisen tasauksesta ja virheenkorojauksesta. [60]

Muistikortit liitetään tietokoneisiin yleensä erillistä, esimerkiksi PC Card - tai USB-liitäntäistä kortinlukijaa käyttäen. Jotkut muistikorttivalmistajat ovat kuitenkin yhdistäneet kortteihinsa korttityypin oman väylän lisäksi myös USB-liitännän, jolloin niitä voidaan lukea PC:llä USB-muistien tavoin. Koska USB-liitäntä on yleistynyt myös mikro-ohjaimissa, voidaan myös sellaisiin perustuvissa sulautetuissa laitteissa käyttää USB-muisteja. [20]

4 Kunnonvalvontaympäristö

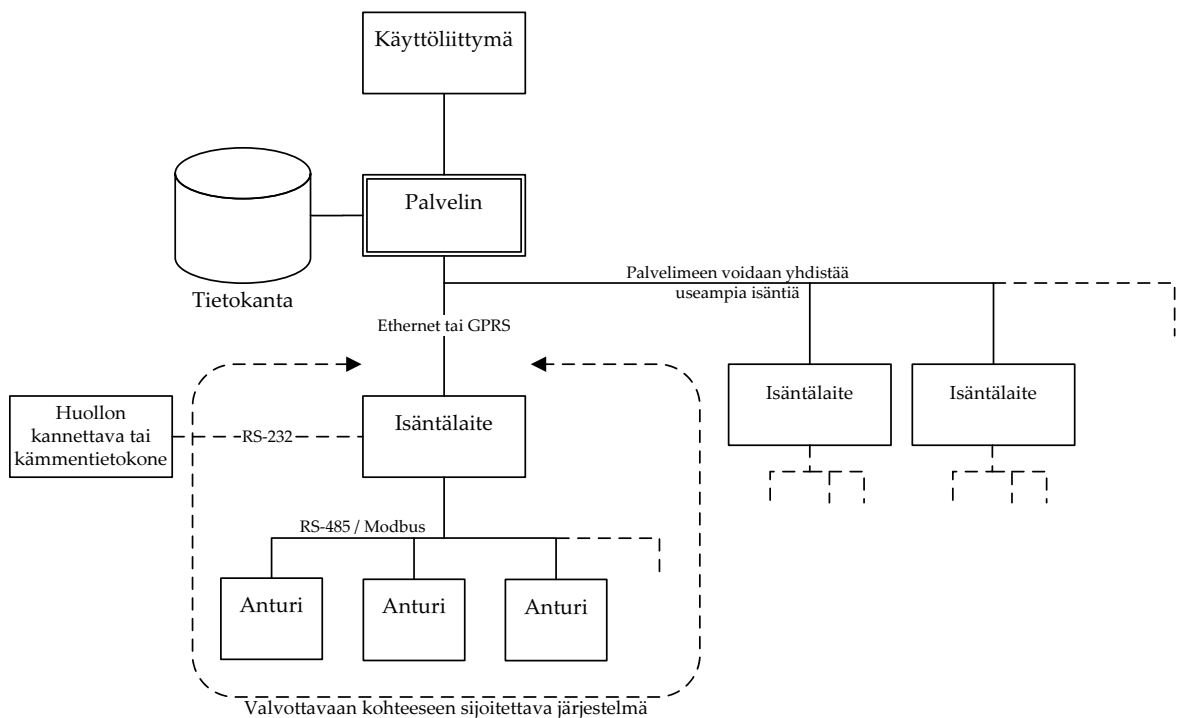
Tämän tutkielman taustalla on Oivallin Oy:n kehittämä sulautettu kunnonvalvontajärjestelmä, jonka isäntälaitteeseen on haettu sopivinta haihtumatonta tallennusmenetelmää. Pekka Vänskä on Pro Gradu -tutkielmassaan [6] esitellyt järjestelmän prototyypin. Sitten laitteistoa on kehitetty eteenpäin lisäämällä antureiden älykkyyttä ja toiminnallisuutta. Järjestelmän yleinen rakenne on esitetty kuvassa 4.1. Tässä luvussa tutustutaan isäntälaitteen rakenteeseen ja toimintaan sekä muistin tarpeeseen ja muistiratkaisuun kohdistuviin vaatimuksiin.

4.1 Isäntälaitteen rakenne ja tehtävä

Isäntä on rakennettu Texas Instrumentsin valmistaman MSP430F1611-tyyppisen mikro-ohjaimen ympärille. Suorittimen ohjaamana isäntä kerää mittaustuloksia RS-485-pohjaiseen Modbus-verkkoon kytketyiltä antureilta. Tulokset välitetään edelleen keskuspalvelimelle Ethernet- tai GPRS-yhteyden avulla.

Kuvassa 4.2 on esitetty MSP430F1611-ohjaimen lohkokaavio. Sen ytimenä on 16-bittinen RISC-suoritin, joka toimii maksimissaan 8 MHz kellotaajuudella. Suorittimen lisäksi samalle piirille on integroitu useita oheislaitteita, kuten 48 kilotavua flash-muistia ohjelmakoodia varten, 10 kilotavua RAM-muistia, DMA-ohjain, ajastimet, A/D- ja D/A-muuntimet, kuusi kahdeksan bitin I/O-porttia sekä kaksi sarjaliikenneohjainta. Molemmat sarjaliikenneohjaimet toimivat valinnan mukaan UART- tai SPI-tilassa, toinen myös I²C-tilassa. MSP430-sarjan ohjaimet on suunniteltu toimimaan erittäin pienellä tehonkulutuksella esimerkiksi paristokäyttöisissä laitteissa. Siksi käytössä on eritasoisia virransäästötiloja. Eri yksiköiden toiminta on kuvattu tarkemmin ohjaimen datalehdellä [61] sekä käyttäjän oppaassa [62].

Isäntälaitteen ensisijainen tehtävä on kysellä antureilta mittaustuloksia, tallentaa niitä muistiin sekä välittää niitä edelleen palvelimelle. Isäntään on myös mahdollista liittää älykkäitä toimintoja eri antureilta saatujen mittaustuloksien yhdistämiseen



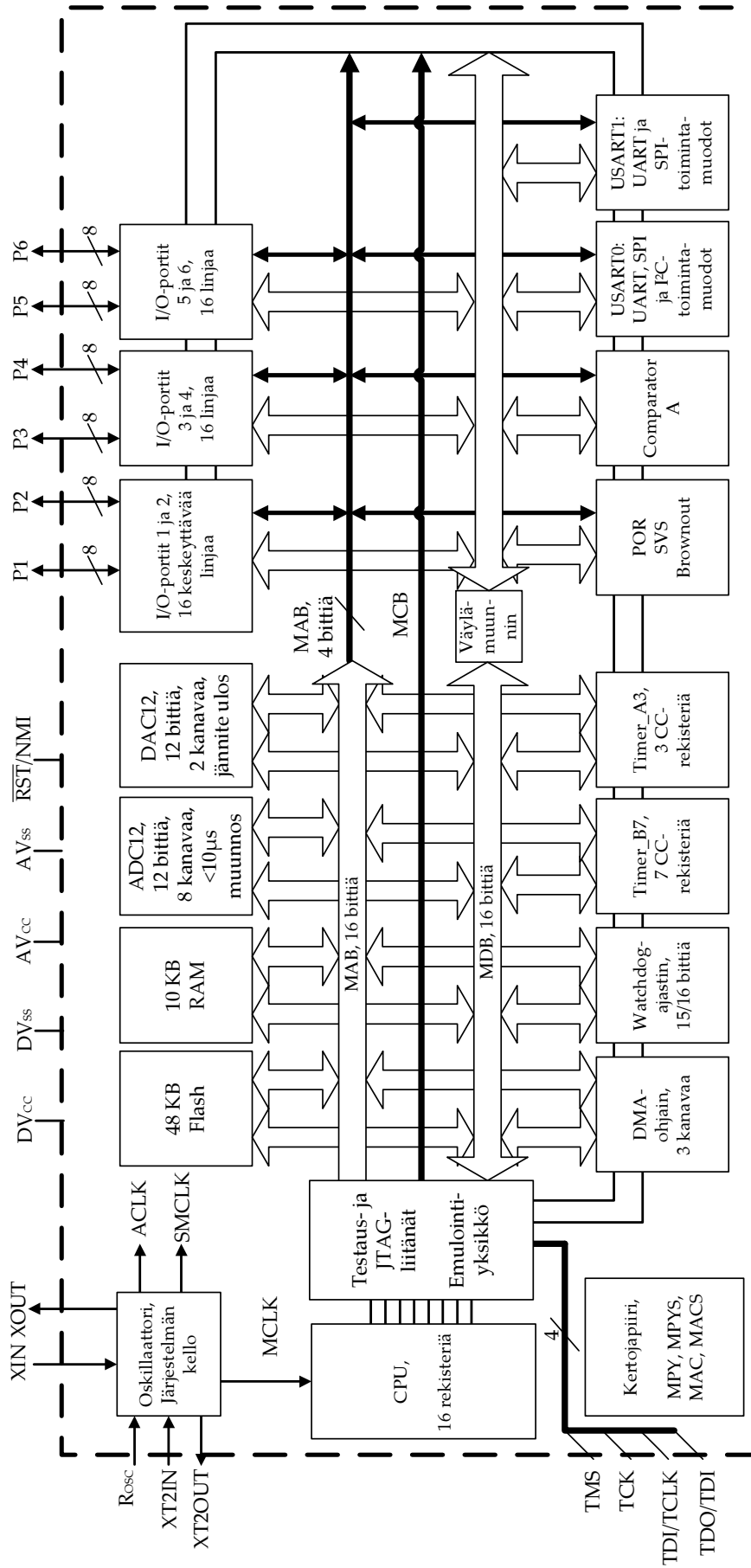
Kuva 4.1: Tutkimuksen kohteena olevan kunnonvalvontajärjestelmän rakenne.

ja analysointiin, jolloin isäntä toimii aluvussa 2.2 kuvatun arkkitehtuurin mukaisella datankäsittelytasolla tai viantunnistus- ja määrittystasolla. Isännän ohjelmistoa kehitetään C-kielillä.

4.2 Muistin käyttötarkoitus

Yksi isäntälaitteen tehtävistä on mittaustiedon tallentaminen määritellyltä ajanjaksolta. Vaatimuksena voi olla esimerkiksi mittaustulosten säilyttäminen isännän muistissa viimeksi kuluneen vuoden ajalta. Tallennuksen tavoitteena on varmistaa datan saatavuus ja säilyminen myös silloin, kun palvelinyhteys on syystä tai toisesta poikki. Joskus palvelinyhteyttä ei ole kustannussyistä käytössä ollenkaan. On myös mahdollista, että kaikki mittaustulokset tallennetaan, mutta vain osa niistä lähetetään palvelimelle. Näin vian sattuessa voidaan tallennetun datan perusteella tarvittaessa analysoida vian syitä tarkemmin.

Datan lukeminen isännän muistista tehdään joko palvelinyhteyden kautta tai kannettavan tai kämmentietokoneen avulla suoraan valvottavassa kohteessa.



Kuva 4.2: Texas Instruments MSP430F1611-mikro-ohjaimen lohko-kaavio [61, s. 6].

4.3 Muistiin kohdistuvat vaatimukset

Muistin käyttötarkoitus, käyttökohteen olosuhteet ja järjestelmän muut osat asettavat käytettävälle muistille erilaisia vaatimuksia. Seuraavassa on eritelty näitä vaatimuksia ja niiden toteuttamismahdollisuuksia.

4.3.1 Tallennustilan määrä

Tarvittavan tallennustilan määrä riippuu luonnollisesti mitattavien suureiden määrästä, mittausaikaväleistä sekä ajanjaksosta, jolta dataa halutaan säilyttää. Tyypillisesti yksittäinen mittaustulos koostuu yhdestä tai useammasta 8–32 -bittisestä kokonaisluvusta. Lisäksi on tallennettava tieto anturista, jolta mittaustulos on saatu, sekä mittausajankohta. Näin tallennetun datan perusteella voidaan myöhemmin muodostaa mittaushistoria.

Päivämäärä ja kellonaika voidaan tallentaa neljällä tavulla ja anturin tunnukselle varataan yksi tavu. Jos oletetaan, että varsinaista dataa varten tarvitaan noin viisi tavua, voidaan arvioida, että yksittäisen mittauksen tallentamiseen tarvitaan noin kymmenen tavua muistia. Jos tällaisia mittaustuloksia saadaan eri antureilta esimerkiksi viisikymmentä kappaletta minuutissa, voidaan laskea vuoden aikana tarvittava tallennustila seuraavasti:¹

$$10 \text{ tavua} \cdot 50 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 = 262,8 \text{ MB} \approx 260 \text{ MB.}$$

Joistakin suureista mitataan kuitenkin tyypillisesti kerralla suurempia datamääriä edellä kuvatun tyyppisten yksittäisten arvojen sijaan. Esimerkiksi kiihtyvyydestä tai sähkövirrasta voidaan mitata jakso yhtenäistä signaalia spektrianalyysia varten [13, s. 9–10][14, s. 37–42]. Tällöin yksittäinen mittaus voi tuottaa useita kilotavuja dataa. Jos oletetaan, että kilotavun kokoinen jakso mitataan kerran minuutissa, voidaan vuoden aikana kertyvän datan määrä laskea seuraavasti:

$$1000 \text{ tavua} \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 = 525,6 \text{ MB} \approx 530 \text{ MB.}$$

¹Yksinkertaisuuden vuoksi tässä on käytetty SI-järjestelmän mukaisia, kymmenkantaisia kerrannaisyksiköitä. Niitä käyttävät yleisesti myös kiintolevyjen ja muistikorttien valmistajat, ja kyse on joka tapauksessa arviosta.

Tallennettavan datan määrä vaihtelee siis hyvinkin paljon — riippuen valvottavasta kohteesta ja siitä mitatuista suureista. Edellä esitettyjen karkeiden laskelmien perusteella voidaan kuitenkin arvioida, että tallennustilan tarve on kokoluokkaa 250 MB – 4 GB.

4.3.2 Kirjoitus- ja lukunopeus

Muistin kirjoitusnopeus ei tässä sovelluksessa ole kovin kriittinen. Kirjoitettavaa dataa kertyy vähitellen, ja nopeutta rajoittaa joka tapauksessa käytetyn kenttäväylän sekä myös itse suorittimen nopeus.

On kuitenkin syytä kiinnittää huomiota muistin lukunopeuteen. Laitteen keräämät mittaustiedot halutaan lukea PC-tietokoneelle niiden tarkastelua ja analysointia varten. Luettaessa muistia paikallisesti isäntälaitteen kautta käytössä on RS-232 -liitäntä, jonka nopeus on maksimissaan 1 Mb/s. Kun otetaan huomioon, että vain 8/10 siirretyistä biteistä on varsinaista hyötydataa [62, s. 13-4] voidaan siirtonopeus laskea:

$$1 \text{ Mb/s} \cdot \frac{8}{10} = 800 \text{ kb/s} = 100 \text{ kB/s}$$

Jos käytetyn muistin koko on esimerkiksi 1 GB, voidaan laskea siirtoon kuluva aika:

$$1 \text{ GB} \cdot 100 \text{ kB/s} = 10000 \text{ s} \approx 2 \text{ h } 45 \text{ min}$$

Näin pitkä lukuaika on ongelmallinen, sillä isäntälaitte voi sijaita hyvinkin hankalassa paikassa, jossa lukemisesta vastaava työntekijä joutuisi odottelemaan. Muistin lukeminen palvelinyhteyden kautta ei olisi merkittävästi tätä nopeampaa, ja yhteys olisi näin pitkän aikaa varattuna. Lisäksi joissain tapauksissa palvelinyhteyttä ei ole käytettävissä lainkaan.

4.3.3 Toimintaolosuhteet

Valittavan tallennusratkaisun täytyy soveltua käytettäväksi niissä olosuhteissa joissa koko järjestelmää aiotaan käyttää. Teollisuuskäyttöön tarkoitetuilla laitteilla on

tyypillisesti tiukemmat toimintaolosuhdevaatimukset kuin kuluttajalaitteilla. Valmistajat esimerkiksi takaavat usein kuluttajakäyttöön tarkoitettujen puolijohdekomponenttien toiminnan 0 °C – 70 °C lämpötiloissa ja teollisuuskäyttöön tarkoitettujen –40 °C – 85 °C lämpötiloissa [63]. Myös tämän järjestelmän vaatimuksena on teollisuusstandardit täyttävä lämpötilankesto.

Lämpötilan ohella on huomioitava myös värinän, ilmankosteuden ja pölyn sieto. Esimerkiksi teollisuuskäyttöön tarkoitettujen muistikortit sietävät yleensä 15 G – 30 G:n värinää, 1000 G – 2000 G:n iskuja sekä 95 % suhteellista kosteutta [41][53]. Kiintolevyille vastaavat rajoitukset ovat selvästi tiukempia. Esimerkiksi Hitachin Microdrive-levyt sietävät käytön aikana vain 0,67 G:n värinää ja 400 G:n iskuja [64]. Parempi värinänkesto mahdollistaa järjestelmän asentamiseen vaikeampiin kohteisiin.

4.3.4 Liitettävyyden järjestelmään

On suotavaa, että valittavan tallennuslaitteen liittäminen isäntälaitteen suorittimeen on mahdollisimman yksinkertaista, eikä vaadi paljoa ylimääräisiä komponentteja. MSP430F1611-mikro-ohjaimissa ei ole ulkoista muistiväylää, joten liitäntä on toteutettava joko rinnakkaisten I/O-porttien tai sarjaliikenneyksiköiden kautta [61, s. 6].

Laitteen edellisessä versiossa käytössä oli suorittimen I/O-portteihin kytketty paljas NAND-tyyppinen flash-piiri. Tulokset muistin käytössä eivät kuitenkaan olleet tyydyttäviä. Muistipiiri varasi kokonaan kaksi suorittimen digitaalisista I/O-porteista, ja vain osittainkin toteutettu muistin käsittely lisäsi selvästi laitteen ohjelmiston monimutkaisuutta. Myös datan lukeminen laitteelta oli hidasta ja vaivalloista.

Yksinkertaisinta on käyttää SPI- tai I²C-väylää, jotka on käytetyssä mikro-ohjaimessa laitteistotasolla valmiiksi toteutettu. Muut väylät on toteutettava ohjelmallisesti rinnakkaisten I/O-porttien avulla tai käyttämällä erillistä väyläohjainpiiriä. Esimerkiksi lähteessä [65] on esitelty USB-liitännän toteuttaminen MSP430:lle käyttäen USB-UART -sovitinpiiriä. Sovitin vaatii lisäksi erillisen EEPROM-muistin ja kideoskillaattorin.

5 Muistitoteutus SD-kortin avulla

Edellisessä luvussa kuvattuun järjestelmään valittiin tallennusvälineeksi SD-kortti. Tällä ratkaisulla saadaan korjattua paljaan flash-piirin käyttöön liittyneitä ongelmia, sekä saavutetaan myös muuta etua ja joustavuutta.

Tässä luvussa esitellään perusteita SD-kortin käytölle sekä toteutuksen periaatteita eri tasoilla. Lopuksi arvioidaan ratkaisun toimivuutta ja verrataan sitä muihin järjestelmiin.

5.1 SD-kortin valintaperusteet

Seuraavassa esitellään eri näkökulmista perusteita, jotka vaikuttivat SD-kortin valintaan muistiratkaisuksi. Perusteita voidaan löytää laitteiston, ohjelmiston ja loppukäyttäjän tasoilla.

5.1.1 Laitteistotaso

Laitteistotasolla SD-kortti sopii hyvin käytettäväksi MSP430F1611-mikro-ohjaimen kanssa. SD-kortti tukee SPI-väylää, kuten myös mikro-ohjaimen molemmat sarjaliikenneyksiköt. Texas Instrumentsin sovellusraportissa [66] esitetään valmis kytkentä MMC- tai SD-kortin liittämiseksi ohjaimeen SPI-väylän avulla. Kyseisessä dokumentissa on kuitenkin useita virheitä, erityisesti kytkentää esittävässä kuvassa. Korjattu ja toimivaksi havaittu kytkentä on esitetty kuvassa 5.1. Käytännön toteutukseen tutustutaan tarkemmin alaluvussa 5.2, mutta jo tässä vaiheessa voidaan huomata kytkennän yksinkertaisuus. Korttiliittimen lisäksi kortin ja mikro-ohjaimen väliin tarvitaan vain muutama passiivinen komponentti eli kaksi vastusta ja kondensaattori.

Käyttämällä sarjaväylän sijasta rinnakkaismuotoista väylää saavutettaisiin suurempi siirtonopeus. SD-kortit tukevat 4-bittistä rinnakkaisväylää, ja vielä leveämpi väy-

lä saataisiin käyttämällä CompactFlash-kortteja. Ohjaimessa ei kuitenkaan ole laitteistotason tukea näille väylille, joten ne olisi toteutettava täysin ohjelmistotasolla. Lisäksi rinnakkaisliitäntä varaisi huomattavan määrän I/O-linjoja paljaan flashpiirin tapaan. SPI-väylän nopeus todettiin riittäväksi tähän sovellukseen.

SD-korttiliitäntä tarjoaa myös uusia mahdollisuuksia isäntälaitteen jatkokehitystä silmälläpitäen. Hyvin pienin muutoksin liitäntä voidaan laajentaa tukemaan myös SDIO-liitäntää, johon on saatavilla erilaisia oheislaitteita. Näin isäntälaitteeseen voidaan tarvittaessa lisätä esimerkiksi Bluetooth- tai WLAN-moduuli ilman merkittäviä muutoksia isäntälaitteen elektroniikkaan. [67]

5.1.2 Ohjelmistotaso

Myös isäntälaitteen ohjelmiston kannalta SD-kortin käyttö on yksinkertaista. Edellä mainittuun sovellusraporttiin [66] liittyy myös pienikokoinen funktiokirjasto, jonka funktioilla voi lähettää komentoja muistikortille SPI-väylän kautta. Näiden funktioiden avulla on myös toteutettu perustoiminnot kortin käyttöä varten, kuten kortin rekistereiden lukeminen sekä yksittäisen sektorin¹ kirjoittaminen ja lukeminen. Kirjaston tarjoamat funktiot on esitelty taulukossa 5.1. Ohjelmistotason rajapinnan yksinkertaisuuden takaavat alaluvussa 3.6.4 kuvatut kortin ohjainpiirin automaattiset toiminnot.

5.1.3 Käyttäjätaso

Järjestelmän käyttäjien kannalta SD-kortin käyttö tarjoaa monenlaista etua ja joustavuutta. Laitteiston kokoonpano ja tulevaisuuden kehitystyö vaikuttavat voimakkaasti tallennustilan tarpeeseen. Kun käytössä on helposti irrotettava muistikortti, voidaan asennusvaiheessa valita kuhunkin kohteeseen sopivankokoinen kortti. Koko voidaan myös tarvittaessa vaihtaa myöhemmin. Teollisuustason SD-kortteja on saatavilla 2 GB kapasiteettiin asti [53][68].

¹Flash-muistin yhteydessä pitäisi oikeastaan puhua *sivusta*, mutta *sektori* on tiedostojärjestelmien yhteydessä vakiintunut nimitys.

Funktio	Toiminnan kuvaus
initMMC(...)	Asettaa portin SPI-toimintatilaan sekä ottaa kortin käyttöön.
mmc_ping(...)	Tarkistaa, että laitteeseen on asetettu muistikortti.
mmcSendCmd(...)	Lähetää komennon muistikortille.
mmc_GoIdle(...)	Asettaa muistikortin lepotilaan tehon säästämiseksi.
mmcSetBlockLength(...)	Valitsee siirrettävän datalohkon koon. Yleensä käytetään vain 512 tavun lohkoja.
mmcReadBlock(...)	Lukee annetun kokoisen lohkon annetusta osoitteesta.
mmcWriteBlock(...)	Kirjoittaa annetun kokoisen lohkon annettuun osoitteeseen.
mmcReadRegister(...)	Lukee annetusta rekisteristä annetun määrän dataa.
MMC_ReadCardSize(...)	Lukee kortin koon CSD-rekisteristä.

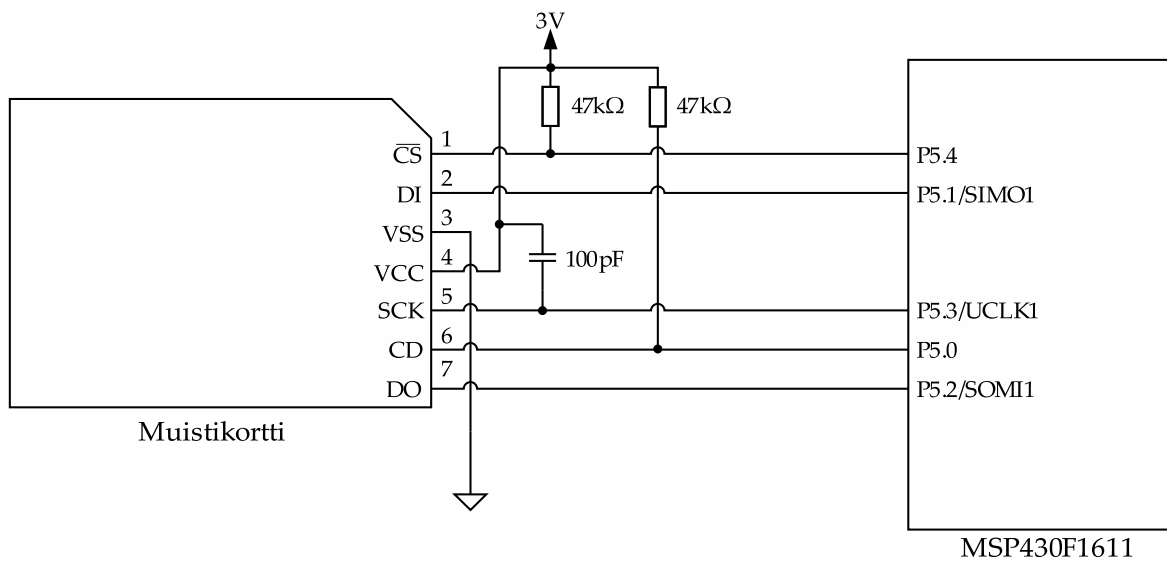
Taulukko 5.1: Texas Instrumentsin SD/MMC-kirjaston tarjoamat funktiot. [66]

Tarvittaessa voidaan SD-kortin sijasta käyttää myös MMC-korttia, koska liitäntä on SPI-tilaa käytettäessä yhteensopiva. Tällöin on kuitenkin varmistettava, että sijoituskohteen olosuhteet eivät ylitä MMC-kortille annettuja suosituksia.

Kiinteää muistia käytettäessä vakava ongelma oli muistin hidas lukeminen. Täynnä dataa oleva muistikortti voidaan helposti irrottaa isäntälaitteesta ja vaihtaa tilalle tyhjä kortti. Näin datan tallennus voi jatkua käytännössä ilman katkoksia. Täysi kortti voidaan sen jälkeen lukea erillisessä PC- tai kämmentietokoneessa olevalla muistikortinlukijalla. Tällöin käytössä on suurin SD-kortin tukema siirtonopeus, eikä lukemisen valmistumista tarvitse odottaa isäntälaitteen luona.

5.2 Toteutus

Tässä alaluvussa kerrotaan, miten SD-kortin liittäminen isäntälaitteeseen on käytännössä toteutettu. Seuraavassa tutustutaan sekä fyysiseen kytkentään että kortin käsittelystä ja tiedostojärjestelmästä vastaavan ohjelmiston osan toimintaan.

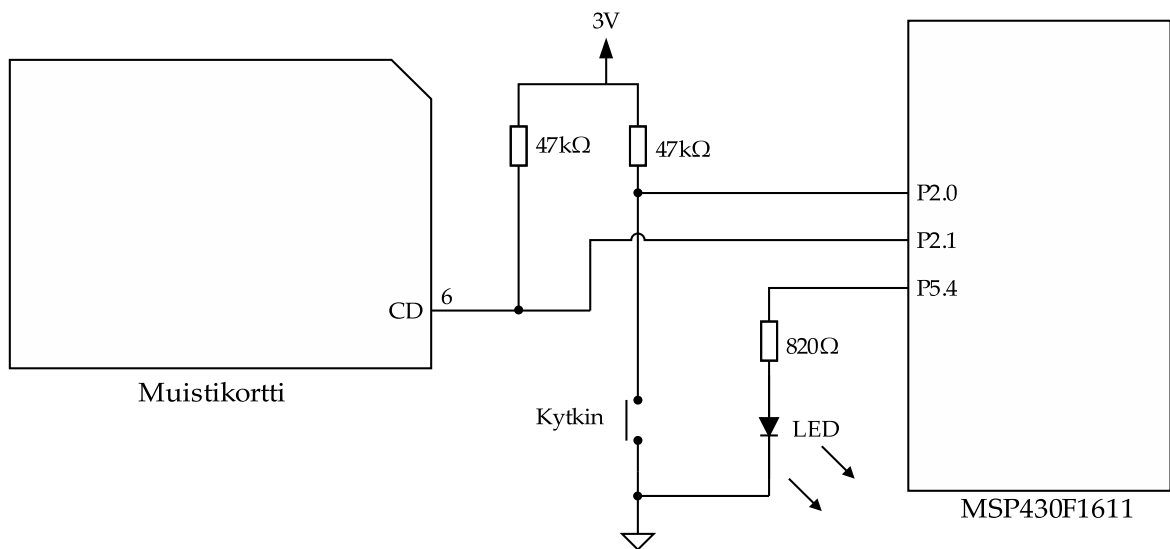


Kuva 5.1: SD- tai MMC-kortin liittäminen MSP430F1611-mikro-ohjaimen [66]. Kortin kytkentäpintojen nimet ovat MMC:n SPI-toimintamuodon mukaiset, koska kytkentä noudattaa kyseistä toimintamuotoa. Tätä voi verrata SD-standardin mukaisiin nimiin, jotka ovat kuvassa 3.12.

5.2.1 Kytkentä

Kuten alaluvussa 5.1.1 todettiin, sovellusraportissa [66] on valmis esimerkki SD- tai MMC-kortin liittämiseen MSP430F1611-mikro-ohjaimen. Raportissa esitetty kytkentä ei kuitenkaan sellaisenaan toimi. Kuvassa 5.1 on esitetty korjattu ja toimivaksi havaittu kytkentä.

SPI-väylä käyttää neljää digitaalista linjaa. Koska samaan SPI-väylään voidaan liittää useita laitteita, kortin kytkentäpinnassa 1 on CS- eli Chip Select -linja, jota ohjaamalla valitaan tämä muistikortti käyttöön. Mahdolliset muut samaan väylään kytketyt laitteet tarvitsevat kukin oman CS-linjansa. Kortin kytkentä 5 eli SCK on kello-tulo. Kytkennät 2 (DI, Data In) ja 7 (DO, Data Out) ovat varsinaiset datalinjat. Linja 2 on SPI-väylän yhteydessä käytettyjen termien mukaan SIMO, *Slave In, Master Out* eli ohjaimelta kortille päin kulkeva data ja linja 7 on SOMI, *Slave Out, Master In* eli kortilta ohjaimelta kulkeva data. Sovellusraportin [66] alkuperäisessä kuvassa nämä linjat on esitetty kytkettäväksi ristiin, eli sisäänmenot ja ulostulot keskenään yhteen. Tällöin datansiirto ei selvästikään onnistu.



Kuva 5.2: SD-kortin kytkentään sujuvamman käytön varmistamiseksi tehdyt muutokset.

Kortin kytkentä 4 eli VCC on positiivinen käyttöjännite ja kytkentä 3 eli VSS negatiivinen on käyttöjännite, joka on tässä kytketty maahan. Kortilla on myös toinen VSS kytkennässä 6 [46, s. 16]. Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää yhdistämällä tämä linja ohjaimen sisääntuloon, jolloin se toimii CD eli *Card Detect* -linjana. Kun kortti asetetaan paikoilleen, kytkentä 3 maadoittuu ja sitä kautta myös samassa potentiaalissa oleva kytkentä 6 siirtyy alatilaa. Sovellusraportin [66] kytkentä on kuitenkin näiltäkin osin puutteellinen, sillä tunnistuslinjan tila on epämääräinen, kun korttipaikassa ei ole korttia. Ohjaimen kannalta linja on sisääntulo, eikä mikään muu laite ohjaa sitä, joten se jää kellumaan. Kytkentä saadaan toimimaan lisäämällä tunnistuslinjan ja käyttöjännitteen välille ns. ylösvetovastus. Kun korttia ei ole liitetty, CD-linja pysyy vastuksen kautta ylätilassa. Kun kortti on paikallaan, vastus rajoittaa käyttöjännitelinjasta kortin kautta maahan kulkevaa virtaa.

Kortin sujuvan käytön varmistamiseksi isäntälaitteeseen on lisätty keskeyttävään linjaan kytketty painike, jota painamalla käyttäjä voi ilmoittaa laitteelle aikovansa irrottaa kortin. Isäntälaitte voi tällöin ilmoittaa merkkivalon avulla, kun kortin irrottaminen on turvallista. Vastaavasti myös CD-linjan kytkeminen linjan P5.4 sijasta keskeyttävään linjaan on perusteltua, koska tällöin myös kortin syöttäminen voidaan havaita automaattisesti ja tiedetään, että kortille voidaan jälleen kirjoittaa. Nämä lisäykset kytkentään on esitetty kuvassa 5.2

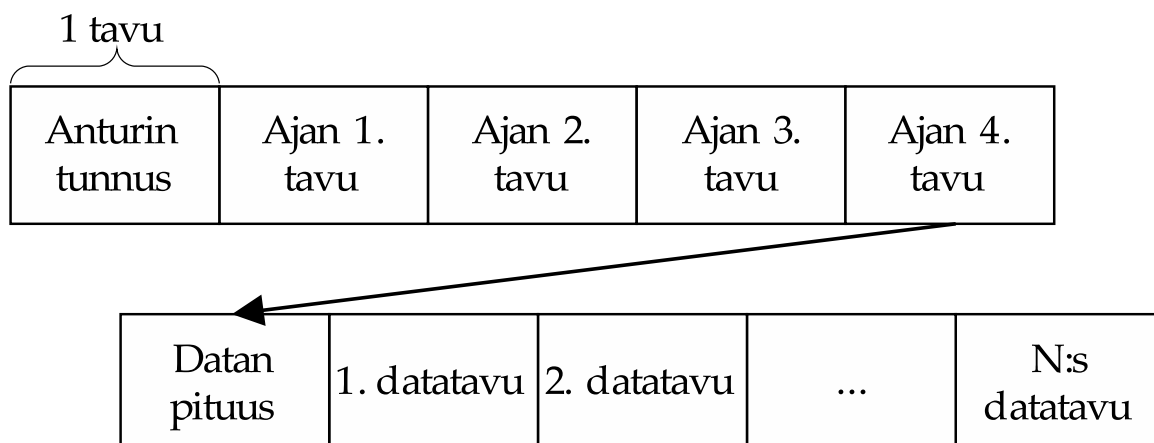
5.2.2 Tiedostojärjestelmä ja tallennusformaatti

Alaluvussa 3.3.3 esiteltiin vaihtoehtoja flash-muistissa käytettäviksi tiedostojärjestelmiksi. Isäntälaitteen tallentaman datan helppo luettavuus kannettavaan tai kämmentietokoneeseen on tärkeää, mikä puhuu yleiskäyttöisen tiedostojärjestelmän puolesta. Isännän ei ole tarkoitus suorittaa muistiin hakuja, vaan pelkästään tallentaa dataa. Myöskään kulutuksen tasauksen tyyppisiä toimintoja ei tarvita tällä tasolla, koska SD-kortin ohjainpiiri huolehtii näistä toiminnoista automaattisesti. Toisaalta esimerkiksi FAT-tiedostojärjestelmän täydellinen hallinta isännässä tekisi ohjelmistosta monimutkaisen ja virheille alttiin.

Tiedostojärjestelmän valinnassa tehtiin eräänlainen kompromissi yleiskäyttöisen ja oman järjestelmän välillä. SD-kortti päätettiin alustaa PC:llä FAT-tiedostojärjestelmään sekä luoda kortille valmiiksi kaiken tilan täyttävä tiedosto. Näin isäntälaitteen tehtäväksi jää ainoastaan kortilla sijaitsevan osion paikallistaminen kortin pääkäynnistyslohkon tietojen perusteella sekä tiedoston paikallistaminen osion alussa sijaitsevan Volume ID -sektorin ja osion päähakemiston avulla. Selvitettyään tiedoston alkamis- ja päättymiskohdat sektoreina isäntä voi vapaasti kirjoittaa dataa tiedoston sisälle ilman, että FAT-tauluja tarvitsee muokata. FAT-tiedostojärjestelmän toiminta on kuvattu tarkemmin lähteessä [69].

Tiedostoa käytetään rengaspuskuriperiaatteella. Tämä tarkoittaa sitä, että kun tiedosto on kirjoitettu alusta loppuun täyteen, isäntä alkaa kirjoittaa uudestaan alusta vanhimpien mittaustulosten päälle. Tämä sopii hyvin sellaisiin tapauksiin, joissa tietoa välitetään palvelimelle ensisijaisesti verkon kautta ja muistikortti on ainoastaan varamenetelmä. Jos palvelinyhteyttä ei ole käytössä, on järjestelmän kokoonpanovaiheessa määritettävä datan kertymisnopeus. Sen perusteella voidaan arvioida, kuinka usein kortti täytyy vaihtaa ilman, että tietoa menetetään.

Tiedon tallentamisessa käytetään yksinkertaista tietuerakennetta, joka on esitetty kuvassa 5.3. Jokaisesta mittauksesta on tallennettava jonkinlainen tunnus, jonka perusteella tiedetään, minkä anturin datasta on kyse. Ajan tallennukseen käytetään niin sanottua Unix-aikaa, joka ilmoittaa vuoden 1970 alusta kuluneen ajan sekunteina UTC-ajassa [70, alaluvut 3.149 ja 4.14]. 32-bittisenä, etumerkillisenä kokonaislukuina tämä formaatti toimii vuoteen 2038 asti. Seuraavaksi ilmoitetaan datan määrä ja lopuksi varsinaiset mittaustulokset.



Kuva 5.3: SD-kortille tallennettava, yhden mittauksen tiedot sisältävä tietue.

Anturin tunnuksen ja datan määrän ilmoittamiseen käytetään yksi tavu kumpaankin. Tämä rajoittaa antureiden määrän ja lyhyiden suureiden pituuden 255:een, kun anturin tunnusta 0 ei käytetä. Järjestelmässä on kuitenkin myös muita rajoituksia, joiden takia antureita ei käytännössä ole tämän enempää. Suureiden osalta on taas selkeä jako lyhyisiin ja pitkiin. Lyhyiden suureiden pituudet ovat tavallisesti joitakin tavuja, joten niille maksimipituus 255 riittää hyvin. Pitkien suureiden pituudet ovat useita kilotavuja, joten ne vaativat joka tapauksessa erilaisen tallennusmekanismiin.

Muistikortille kirjoitetaan dataa 512 tavun sektori kerrallaan. Kuhunkin sektoriin kirjoitetaan kokonaisia tietueita. Kun uudelle tietueelle ei ole enää tilaa nykyisessä sektorissa, otetaan käyttöön seuraava sektori. Tämä aiheuttaa jonkin verran tilanhukkaa, mutta tallennettu data pysyy varmemmin eheänä siinäkin tapauksessa, että uutta dataa on alettu kirjoittaa vanhimpien päälle.

Joidenkin mittauksien tulokset ovat sen verran suurikokoisia, että yksi tulos ei mahdu yhteen 512 tavun sektoriin. Datamäärät ovat kuitenkin tyypillisesti 512 tavun kerrannaisia. Tällöin tietuemuodossa tallennetaan vain mittaukseen liittyvät metatiedot. Pituuskenttä ei pitkien suureiden tapauksessa ilmoita tavujen, vaan kokonaisten sektoreiden määrää. Varsinaisen datan tallennus aloitetaan seuraavan sektorin alusta.

5.2.3 Korttia ohjaava ohjelmisto

SD-korttia käyttävä osa isäntälaitteen ohjelmistosta on jaettu kahteen kerrokseen. Alempana kerroksena on Texas Instrumentsin SD/MMC-kirjasto [66], jonka avulla otetaan yhteys korttiin sekä luetaan ja kirjoitetaan yksittäisiä sektoreita. Ylempi kerros huolehtii edellisessä alaluvussa kuvatun tiedostojärjestelmän ja tallennusformaatin käsittelystä. Ohjelmisto on kirjoitettu C-kielillä.

Kun anturilta on vastaanotettu mittaustulos, sen käsittelystä huolehtiva ohjelmiston osa pyytää SD-korttia ohjaavaa osaa tallentamaan mittauksen kortille. Koska muistikortille kirjoitetaan dataa 512 tavun sektori kerrallaan, yksittäistä mittaustulosta ei tallenneta heti, vaan se kirjoitetaan isäntälaitteen RAM-muistissa olevaan yhden sektorin kokoiseen puskuriin. Kun puskuri täyttyy, se kirjoitetaan kokonaisuudessaan muistikortille. Puskuri katsotaan täytyneeksi, kun seuraavaksi kirjoitettava mittaustulos ei mahdu enää kokonaisuudessaan puskuriin. Yksittäistä lyhyttä mittaustulosta ei siis jaeta kahdelle sektorille.

512 tavua pidempiä suureita ei puskuroida, vaan ne kirjoitetaan suoraan kortille. Kun tällainen pitkä tulos on saatu anturilta, puskuriin kirjoitetaan normaalina tietueena pitkään suureeseen liittyvät metatiedot, eli anturin tunnus ja kellonaika. Sen jälkeen puskuri kirjoitetaan välittömästi kortille, vaikka siinä olisi vielä tilaa jäljellä. Lopuksi tallennetaan varsinainen data kokonaisina sektoreina.

Kun kortti halutaan vaihtaa ja isäntälaitteessa olevaa poistopainiketta painetaan, isäntälaitte saa keskeytyksen ja kirjoittaa senhetkisen tallennuspuskurin välittömästi kortille. Sen jälkeen syttyy merkkivalo ilmoittamaan, että kortin voi poistaa. Isäntä jatkaa tällä välin tiedon tallennusta RAM-muistissa olevaan puskuriin. Kortin vaihtajalla on siten hyvin aikaa asettaa laitteeseen uusi kortti.

5.2.4 Esimerkkejä datan tallennuksesta

Tässä alaluvussa annetaan joitakin esimerkkejä isännän toiminnasta dataa tallennettaessa. Käytännössä antureilta kysellään dataa ennalta anturikohtaisesti määrätyn aikavälein. Nopeasti muuttuvia suureita mitataan useita kertoja minuutissa. Hitaammin muuttuvia arvoja saatetaan mitata esimerkiksi vain kerran kuukaudessa.

Kun anturilta on vastaanotettu lyhyt mittaustulos, muodostetaan kortille tallennettava tietue isännän muistissa anturin tunnuksesta, reaaliaikakellosta saadusta kellonajasta, datan pituudesta sekä varsinaisesta mitatusta arvosta. Tämä tietue annetaan kortin käyttöä ohjaavalle ohjelmiston osalle, jossa tietueen koko ensin tarkistetaan. Lyhyiden tietueiden datatavujen maksimimäärä on 255. Jos kirjoituspuskurissa on tilaa, tietue kirjoitetaan puskuriin. Jos taas tietue ei mahdu kokonaisuudessaan puskuriin, kutsutaan SD/MMC-kirjaston funktiota, joka kirjoittaa puskurin sektoriksi muistikortille. Tämän jälkeen otetaan käyttöön uusi puskuri ja annettu tietue tallennetaan sinne. Vanhan tietueen loppuun jäänyt käyttämätön tila täytetään nolilla.

Pitkä suure pyydetään anturilta kenttäväylään liittyvien rajoitusten takia osissa ja kootaan yhtenäiseksi isännän muistissa. Mittaustulosta varten kootaan tietue, jossa on vastaavat tiedot kuin lyhyistäkin suureista itse mittaustulosta lukuun ottamatta. Kortille tallennusta ohjaavalle ohjelmiston osalle annetaan sekä tämä lyhyt tietue, että varsinaisen mittaustulosta. Tietue kirjoitetaan käytössä olevaan puskuriin, joka tallennetaan tämän jälkeen välittömästi muistikortille SD/MMC-kirjaston avulla. Lopuksi tallennetaan varsinaisen mittaustulosta sektoreittain.

Huoltohenkilöstön tullessa noutamaan muistikorttia, he painavat isäntälaitteessa olevaa painiketta, jolloin aiheutuu keskeytys. Tällöin korttia ohjaavaa ohjelmiston osaa pyydetään tallentamaan senhetkinen tallennuspuskuri välittömästi kortille. Tämän tapahduttua isäntä sytyttää merkkivalon, jonka perusteella kortin vaihtaja tietää, että kortti on turvallista irrottaa. Sillä aikaa, kun korttipaikassa ei ole korttia, lyhyitä suureita voidaan puskuroida isännän muistiin, jolloin tietoa ei häviä. Pitkiä suureita ei kuitenkaan ole niiden suuren koon ja käytetyn suorittimen vähäisen RAM-muistin takia mahdollista puskuroida. Laitteeseen voidaan kuitenkin asettaa välittömästi uusi, tyhjä kortti entisen tilalle. Kortin syöttö tunnistetaan CD-linjan avulla, ja myös se aiheuttaa isännän ohjelmistossa keskeytyksen.

Kun laitteeseen on syötetty uusi kortti, isäntä tarkistaa siitä eräitä asioita. Koska isännän ohjelmistoa ei ole suunniteltu alustamaan korttia tai muutenkaan muokkaamaan FAT-tiedostojärjestelmää, kortilla täytyy olla valmiiksi luotuna kaiken tilan käyttävä tiedosto. Kortin ensimmäisen sektorin osiotaulun perusteella löydetään varsinaisen osion alkamiskohta. Osion ensimmäinen sektori puolestaan on sen käynnistyssektori (*boot sector*), joka sisältää osioon liittyvät perustiedot. Sen perusteella isäntä määrittää varsinaisen data-alueen sijainnin kortilla. Data-alueen alussa on päähakemisto. Hakemistossa ensimmäisenä tiedostona tulee olla määrätyn nimi-

nen tiedosto, johon mittaustulokset tallennetaan. Päähakemiston tietojen perusteella isäntä voi määrittää tiedoston rajat tarkasti. Näin tiedostojärjestelmä pysyy eheänä, ja kortti voidaan myöhemmin lukea tietokoneella. Kun tiedosto on paikannettu, voi datan tallentaminen kortille alkaa.

Kortin täyttyessä isäntä jatkaa tallennusta automaattisesti tiedoston alusta vanhimman datan päälle. Jos tallennettavana on useita sektoreita täyttävä pitkä suure, eikä tiedoston lopussa ole sitä varten tarpeeksi sektoreita, siirrytään jo siinä vaiheessa tiedoston alkuun. Lyhyitä mittaustuloksia sisältävän sektorin alussa alkaa aina myös uusi tietue, koska tietueita ei jaeta kahteen peräkkäiseen sektoriin. Näin mittaustuloksia purkava ohjelmisto löytää tiedoston alusta aina joko lyhyen mittaustuloksen sisältävän tietueen tai pitkän suureen metatiedot sisältävän tietueen. Tiedostoa voidaan näin käsitellä alusta lähtien sektori kerrallaan. Kun vastaan tulee pitkän suureen metatiedot sisältävä tietue, lukuohjelmisto tietää lukea seuraavat sektorit kokonaisuutena ja jatkaa sen jälkeen normaalien tietuesektoreiden lukemista.

5.3 Toteutuksen arviointia

Isäntälaitteen uuden version prototyypissä on mukana SD-korttipaikka ja ohjelmistoon on lisätty sitä käyttävät osat, kuten edellä on kuvattu. Laitetta on päästy testaamaan laboratorio-olosuhteissa ja se on niiltä osin todettu toimivaksi. Pisimmillään ajetut testit ovat kestäneet useita viikkoja. Isäntälaitte kysyy mittaustietoja antureilta niille määriteltyjen aikavälien mukaan sekä tallentaa tulokset SD-kortille.

Kiinteällä flash-piirillä toteutettuun versioon verrattuna kerätty data voidaan lukea huomattavasti nopeammin. Datan lukeminen isännän piiriltä RS-232 -portin kautta saattoi kestää useita tunteja. SD-kortin vaihtaminen kestää joitakin sekunteja ja datan lukeminen kortilta PC:lle enimmillään joitakin minuutteja — käytetyn kortin koosta riippuen.

Myös ohjelmistotasolla on tapahtunut parannusta. Kiinteää piiriä käyttävä ohjelmiston osa oli monimutkainen ja vaikeasti hallittava. Erillisiä funktioita tarvittiin 20 ja niiden pituudet olivat useita kymmeniä koodirivejä. SD-korttia käytettäessä sen ohjainpiiri ja mikro-ohjaimen sarjaliikenneyksikkö huolehtivat osasta niitä matalan tason toimintoja, jotka aiemmassa versiossa jäivät varsinaisen suorittimen teh-

täväksi. Muistia käsittelevän koodin kokonaismäärä, kun valmis aliohjelmakirjasto lasketaan mukaan, on vähentynyt noin 1300:sta 900:aan. Omien funktioiden määrä on pudonnut neljäsosaan ja ne ovat myös huomattavasti lyhyempiä ja selkeämpiä. Ainoa jonkin verran monimutkainen osa on kortilla olevan tiedoston paikan etsivä funktio, jonka täytyy tutkia useita FAT-tiedostojärjestelmään kuuluvia datakenttiä.

Laitteistotasolla SD-korttiliitäntä koostuu korttipaikasta ja muutamasta passiivisesta komponentista. Paljas flash-piiri puolestaan voitiin liittää suoraan mikro-ohjaimen I/O-linjoihin. Toisaalta SPI-väylään liitettynä SD-kortti tarvitsee vain seitsemän I/O-linjaa, kun kiinteä piiri tarvitsi kaksi kokonaista 7 bitin I/O-porttia. Lisäksi samaan SPI-väylään voidaan Chip Select -linjojen ansiosta kytkeä useita laitteita vuorotellen käytettäväksi. Näin mikro-ohjaimen portteja säästyy muuhun käyttöön.

Muissa tutkimuksissa muistikorteilla on tyypillisesti korvattu vanhoja analogisia tallennusmenetelmiä [8] tai kiintolevyjä [10]. Näihin verrattuna muistikortit kuluttavat selvästi vähemmän virtaa, ovat kestävämpiä vaihtelevissa olosuhteissa eivätkä aiheuta mittalaitteissa häiriöitä kiintolevyjen tapaan.

Muistikortit tarjoavat nykyaikaisen ja joustavan tallennusmenetelmän sellaisiin sulautettuihin anturijärjestelmiin, joissa ei taloudellisista tai teknisistä syistä voida tai haluta käyttää verkkoja tiedonsiirtoon. Muistikorttia voidaan käyttää myös varamenetelmänä niissä tilanteissa, kun verkkoyhteys on tilapäisesti poissa käytöstä. MMC- ja SD-korttien SPI-toimintamuoto on sulautetun laitteiston suunnittelijalle ja ohjelmoijalle huomattava etu. SPI-tuki on mikro-ohjaimissa tavallinen, joten sekä kytkennästä että ohjelmistosta saadaan yksinkertainen ja edullinen. Kortin irrotettavuus helpottaa laitteiden räätälöintiä, kun jokaiseen yksittäiseen laitteeseen voidaan asennusvaiheessa valita sopivan kokoinen muistikortti.

6 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa haettiin haihtumatonta tallennusmenetelmää sulautettuun anturijärjestelmään, jonka käyttökohteena on pyörivän koneen kunnonvalvonta. Aluksi tutustuttiin kunnonvalvontaan ja sen toteuttamiseen sulautetun anturijärjestelmän avulla. Sen jälkeen esiteltiin haihtumattomien tallennusmenetelmien toimintaa, kehitystä ja käyttöä sekä luotiin lyhyt katsaus myös tulevaisuuden tekniikoihin.

Seuraavaksi käytiin läpi tutkimuksen kohteena olevaa järjestelmää ja sen muistille asettamia vaatimuksia. Vaikka järjestelmään kuuluu langaton tai langallinen tietoverkkoyhteys keskuspalvelimelle, yhteydessä voi olla ajoittain katkoksia tai se saatetaan jättää säästösyistä kokonaan pois. Siksi järjestelmän isäntälaitteessa tarvitaan haihtumatonta muistia, johon antureilta saatuja mittaustuloksia voidaan paikallisesti tallentaa.

Isännän edellisessä versiossa käytetty kiinteä flash-muistipiiri ei täyttänyt sille asetettuja vaatimuksia. Ongelmia aiheuttivat erityisesti tarvittavan kytkennän ja ohjelmiston monimutkaisuus sekä muistin lukemisen hitaus. Tutkielmassa esiteltiin SD- eli SecureDigital -tyyppisten flash-muistikorttien käyttöön perustuva tallennusratkaisu, jonka toteutusta ja toimintaa esiteltiin sekä laitteiston että ohjelmiston kannalta. Mikro-ohjaimen ja muistikortin välinen liitäntä on toteutettu SPI-väylän avulla, jonka käyttö on yksinkertaista sekä laitteisto- että ohjelmistotasolla. Muistia ohjaavasta ohjelmiston osasta voitiin tehdä huomattavasti edellistä versiota pienikokoisempi ja yksinkertaisempi. Lukemista varten kortti voidaan helposti irrottaa isännästä ja liittää kämmentietokoneeseen tai PC:hen.

Tiedon tallennus on toteutettu muun järjestelmän asettamien vaatimusten mukaisesti ja se toimii. Muun järjestelmän jatkokehitys saattaa toki luoda myös tallennuksesta huolehtivalle osalle kehittämistarpeita. Muistikorttien helpon vaihdettavuuden ja ohjelmiston kerrosrakenteen ansiosta näihin tarpeisiin voidaan suhteellisen helposti myös vastata.

Koska isännän uusi versio on edelleen prototyyppiasteella, sitä on testattu vasta laboratorio-olosuhteissa. Jatkossa isäntää — samoin kuin muutakin järjestelmää — tulisi edelleen testata todellisissa kohdeolosuhteissa erilaisten häiriötilanteiden tunnistamiseksi. SDHC-korttien tultua laajemmin markkinoille olisi tärkeää selvittää, missä määrin ne ovat yhteensopivia nykyisen kytkennän ja ohjelmiston kanssa. Näiden uudentyypisten SD-korttien käyttö mahdollistaisi tallennuskapasiteetin kasvattamisen vielä huomattavasti nykyistä suuremmaksi. Sujuvan käytön varmistamiseksi tulisi kehittää myös kortin lukemiseen käytettävästä PC-sovelluksesta yksinkertainen siten, että sillä voidaan helposti lukea täyteen kirjoitettu kortti sekä alustaa se uudelleen isännän ymmärtämään muotoon.

Digitaalisten kameroiden ja mediasoittimien sekä multimediaominaisuuksia sisältävien matkapuhelimien yleistyminen on tehnyt flash-muistiin perustuvista muistikorteista todellisia massatuotteita kuluttajamarkkinoilla. Tässä tutkielmassa on kuitenkin havaittu, että uudet korttityypit tarjoavat mahdollisuuksia myös korttien alkuperäiseen käyttökohteeseen eli teollisuuden sulautettuihin järjestelmiin. Vaikka langattomat ja langalliset tietoverkot kehittyvät ja yleistyvät voimakkaasti, myös haihtumattomille ja irrotettaville tallennusvälineille on monia käyttökohteita siellä, minne verkot eivät yllä sekä varamenetelmänä verkon katkosten sattuessa. SD-korttien SPI-yhteensopivuus tekee niistä erittäin hyvän valinnan mikro-ohjaimen perustuviin sulautettuihin laitteisiin.

Viitteet

- [1] Ville Särkimäki, *Lyhyen kantaman radiolähettimien soveltuvuus sähkökäyttöjen kunnonvalvonnan ja etädiagnostiikan tiedonsiirtotarpeisiin*, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto, Lappeenranta, 2004.
- [2] Risto Tiainen, *Mittaustiedon keräily-yksikkö*, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto, Lappeenranta, 2003.
- [3] A-L. Rautiainen, R. Tiainen, J. Ahola ja T. Lindh, *A Low-Cost Measurement and Data Collection System for Electric Motor Condition Monitoring*, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto, Lappeenranta, 2003.
- [4] Tino Pyssysalo, *Outlooks of Wireless Data Transfer in the Condition Monitoring*, Proceedings of the International Seminar on Maintenance, Condition Monitoring and Diagnostics, POHTO — The Institute for Management and Technological Training, Oulu, lokakuu 2000, s. 149–158.
- [5] Risto Parikka, Tiina Ahlroos, Jari Halme, Juha Miettinen, Pekka Salmenperä, Sulo Lahdelma, Markku Kananen ja Petteri Kantola, *Monitorointi ja Diagnostiikka*, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 2001.
- [6] Pekka Vänskä, *Tuuliturbiinivaihteen kunnonvalvontajärjestelmä*, Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos, Jyväskylä, 2003.
- [7] Ralph J. Nevins, Nelson G. Durdle ja V. James Raso, *A Posture Monitoring System Using Accelerometers*, Proceedings of the 2002 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering, Winnipeg, Kanada, toukokuu 2002, volume 2, s. 1087–1092.
- [8] Tacim Deniz ja Atila Yilmaz, *Design and implementation of a digital ambulatory ECG recorder based on flash MultiMediaCard memory*, Proceedings of the 46th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, Kairo, Egypti, joulukuu 2003, volume 1, s. 368–371.

- [9] Chin-Tang Hsieh, Guang-Lin Hsieh, Eugene Lai, Zong-Ting Hsieh ja Guo-Ming Hong, *A Holter of Low Complexity Design Using Mixed Signal Processor*, Proceedings of the Fifth IEEE Symposium on Bioinformatics and Bioengineering, Minneapolis, Yhdysvallat, lokakuu 2005, s. 316–319.
- [10] S. Shariat Panahi, S. Ventosa, J. Cadena, A. Manuel, T. Bermudez, V. Sallares, Jaume Piera ja J. Del Río, *A Low Power Datalogger based on CompactFlash memory for Ocean Bottom Seismometers (OBS)*, Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, Kanada, toukokuu 2005, volume 2, s. 1278–1281.
- [11] Jari Koskinen, *Mikrotietokonetekniikka: Sulautetut järjestelmät*, 1. uudistettu painos, Kustannusosakeyhtiö Otava, Helsinki, 2004.
- [12] PSK Standardisointi, *PSK 6201 — Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät*, 2. painos, PSK Standardisointiyhdistys ry, Helsinki, 2003.
- [13] Suomalaiset ABB-yhtiöt, *Teknisiä tietoja ja taulukoita*, 9. painos, Vaasa, 2000.
- [14] PSK Standardisointi, *PSK-käsikirja 5 — Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät*, 2. painos, PSK Standardisointiyhdistys ry, Helsinki, 2002.
- [15] Wen-Yao Chang, Tzu-Chi Wang ja Yuan-Pin Shin, *Real-time fault detection and condition monitoring system for chiller*, Proceedings of the Semiconductor Manufacturing Technology Workshop, Hsinchu, Taiwan, syyskuu 2004, s. 160–165.
- [16] A. G. Starr, *Merging Condition Monitoring Data and Knowledge: fusion and neural approaches*, 2nd International Seminar on Maintenance, Condition Monitoring and Diagnostics, POHTO — The Institute for Management and Technological Training, Oulu, syyskuu 2005, s. 211–220.
- [17] Spansion LLC, *Flash Memory: An Overview*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://www.spansion.com/application_notes/flash_memory_overview.pdf>, 10.11.2005.
- [18] Advanced Micro Devices, Inc., *Am27C512 — 512 Kilobit (64 K × 8-Bit) CMOS EPROM*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.spansion.com/datasheets/08140.pdf>>, 1.6.1999.

- [19] Microchip Technology Inc., *25AA040/25LC040/25C040 — 4K SPI Bus Serial EEPROM*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21204E.pdf>>, 29.8.2006.
- [20] Krister Wikström, *Kaikki muistikorteista*, *Proessori*, 12 (2005), s. 24–29.
- [21] Ville Pietikäinen, *Lisää tiheyttä flash-muisteihin*, *Proessori*, 10 (2004), s. 39–43.
- [22] Ilan Bloom, Eli Lusky, Assaf Shappir, Guy Cohen, Eduardo Maayan, Meir Janai ja Boaz Eitan, *NROM: Nitride-Based NVM Technology*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://www.saifun.com/objects/MRS_NROM_PDF.pdf>, huhtikuu 2006.
- [23] Spansion LLC, *Spansion Flash Memory with MirrorBit Technology*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://www.spansion.com/technology/mirrorbit/spansion_generic_mirrorbit.pdf>, 2004.
- [24] Roberto Bez ja Paolo Cappelletti, *Flash memory and beyond*, *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on VLSI Technology*, Hsinchu, Taiwan, huhtikuu 2005, s. 84–87.
- [25] Ashok K. Sharma, *Advanced Semiconductor Memories — Architectures, Designs and Applications*, IEEE Press, Piscataway, New Jersey ja Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, Yhdysvallat, 2003.
- [26] Samsung Electronics, *K9W8G08U1M/K9K4G08U0M — 512M × 8 Bit / 1G × 8 Bit NAND Flash Memory*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://www.samsung.com/Products/Semiconductor/NANDFlash/SLC_LargeBlock/4Gbit/K9K4G08U0M/ds_k9k4g08u0m_rev09.pdf>, 6.5.2005.
- [27] Eran Gal ja Sivan Toledo, *Algorithms and data structures for flash memories*, *ACM Computing Surveys*, 37 (2005), s. 138–163.
- [28] Li-Pin Chang ja Tei-Wei Kuo, *Efficient management for large-scale flash-memory storage systems with resource conservation*, *ACM Transactions on Storage*, 1 (2005), s. 381–418.
- [29] STMicroelectronics, *Bad Block Management in Single Level Cell NAND Flash Memories*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.st.com/stonline/products/literature/an/10119.pdf>>, 16.1.2006.

- [30] Demetrios Zeinalipour-Yazti, Song Lin, Vana Kalogeraki, Dimitrios Gunopulos ja Walid A. Najjar, *MicroHash: An Efficient Index Structure for Flash-Based Sensor Devices*, Proceedings of the Fourth USENIX Conference on File and Storage Technologies, San Francisco, Yhdysvallat, joulukuu 2005, s. 31–44.
- [31] Tohru Furuyama, *Trends and challenges of large scale embedded memories*, Proceedings of the 2004 IEEE Custom Integrated Circuits Conference, Orlando, Florida, Yhdysvallat, lokakuu 2004, s. 449–456.
- [32] Freescale Semiconductor, *Freescale Leads Industry in Commercializing MRAM Technology*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://media.freescale.com/phoenix.zhtml?c=196520&p=irol-newsArticle\&ID=880030>>, 10.7.2006.
- [33] Samsung Electronics, *SAMSUNG Introduces the Next Generation of Nonvolatile Memory — PRAM*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://samsung.com/PressCenter/PressRelease/PressRelease.asp?seq=20060911_0000286481>, 11.9.2006.
- [34] Kinam Kim ja Gwanhyeob Koh, *The Prospect on Semiconductor Memory in Nano Era*, Proceedings of the 7th International Conference on Solid-State and Integrated Circuits Technology, Peking, Kiina, lokakuu 2004, s. 662–667.
- [35] Krister Wikström, *Muistikorttien tekniikka, osa 1, CompactFlash*, Prosessori, 11 (1998), s. 71–76.
- [36] Krister Wikström, *Muistit kortilla*, Prosessori, 12 (2003), s. 48–51.
- [37] CompactFlash Association, *CF+ and CompactFlash Specification Revision 4.0*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.compactflash.org/specdl1.htm>>, 24.5.2006.
- [38] MultiMediaCard Association, *Technical FAQ*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://www.mmca.org/technology/tech_faq/>, viitattu 7.6.2006.
- [39] Daniel Sternglass, *The future is in the PC cards*, IEEE Spectrum, 29 (1992), s. 46–50.
- [40] CompactFlash Association, *CompactFlash Association, CF and CompactFlash Frequently Asked Questions*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.compactflash.org/faqs/faq.htm>>, 13.11.2005.

- [41] SanDisk Corporation, *Brochure: OEM Products*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.sandisk.com/Assets/File/OEM/WhitePapersAndBrochures/CompactFlash/oem-product-line-bro.pdf>>, 28.9.2004.
- [42] ATP Electronics Inc., *Industrial Grade CF*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://flash.atpinc.com/products/view.php?product_id=1229>, viitattu 19.7.2006.
- [43] Krister Wikström, *Muistikorttien tekniikka, osa 2, Pieneen MMC-korttiin mahtuu kuvaa*, Prosessori, 12 (1998), s. 30–33.
- [44] MultiMediaCard Association, *MMCA FAQ*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.mmca.org/about/faq/>>, viitattu 5.6.2006.
- [45] Henrik Snellman, *Kannettavien laitteiden uudet väylät*, Prosessori, 12 (2001), s. 30–36.
- [46] SD Group, *SD Memory Card Specifications, Simplified Version of Physical Layer Specification, Version 1.01*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://www.sandisk.com/Assets/File/OEM/Manuals/SD_Physical_specs_v101.pdf>, 15.4.2001.
- [47] SanDisk Corporation, *SanDisk Industrial Grade — Product Manual*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://www.altec-computersysteme.com/web/media/produkte/flash_speicher/sd-card/SanDisk_SD_Card_I-G_PM_1.0.pdf>, viitattu 7.8.2006.
- [48] Samsung Electronics, *K9K8G08U1M/K9F4G08U0M — 512M × 8 Bit / 1G × 8 Bit NAND Flash Memory*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://www.samsung.com/Products/Semiconductor/NANDFlash/SLC_LargeBlock/4Gbit/K9F4G08U0M/ds_k9f4g08u0m_rev10.pdf>, 3.11.2005.
- [49] SecureDigital Association, *SD Card Association Announces microSD*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.sdcard.org/events/SD%20Card%20Association%20Announces%20microSD,%20draft%204c.doc>>, 13.7.2005.
- [50] SecureDigital Association, *Common Questions About SD Memory Card Technology*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.sdcard.com/europe/TextPage.asp?Page=8>>, viitattu 10.7.2006.
- [51] SanDisk Corporation, *SanDisk microSD™/TransFlash™ Cards*, saatavilla WWW-muodossa <URL: [http://www.sandisk.com/Products/Catalog\(1099\)-SanDisk_microSDTransFlash_Cards.aspx](http://www.sandisk.com/Products/Catalog(1099)-SanDisk_microSDTransFlash_Cards.aspx)>, viitattu 10.7.2006.

- [52] SanDisk Corporation, *SanDisk miniSD™ Cards*, saatavilla WWW-muodossa <URL: [http://www.sandisk.com/Products/Catalog\(1030\)-SanDisk_miniSD_Cards.aspx](http://www.sandisk.com/Products/Catalog(1030)-SanDisk_miniSD_Cards.aspx)>, viitattu 10.7.2006.
- [53] ATP Electronics Inc., *Industrial Grade SD*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://flash.atpinc.com/products/view.php?product_id=1027>, viitattu 19.7.2006.
- [54] SanDisk Corporation, *TransFlash Embedded Brochure*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.sandisk.com/Assets/File/OEM/WhitePapersAndBrochures/TransFlash/transflash-embedded-bro.pdf>>, marraskuu 2004.
- [55] SanDisk Corporation, *SDHC*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.sandisk.com/Assets/File/pdf/retail/SDHC1.pdf>>, viitattu 5.9.2006.
- [56] SecureDigital Association, *CES 2006 Press Release*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://www.sdcard.org/events/SDHC_Release06.pdf>, 4.1.2006.
- [57] Panasonic Europe Ltd., *Panasonic Launches 4GB SDHC Memory Card Based on New SD Memory Card Specification*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://www.panasonic-europe.com/upload/portal/2188_SDR_4GB_for_Europe.pdf>, 8.6.2006.
- [58] USB Implementers Forum, Inc., *Frequently Asked Questions*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.usb.org/about/faq/>>, viitattu 10.7.2006.
- [59] USB Implementers Forum, Inc., *Universal Serial Bus Mass Storage Class Specification Overview*, saatavilla WWW-muodossa <URL: http://www.usb.org/developers/devclass_docs/usb_msc_overview_1.2.pdf>, 23.6.2003.
- [60] Rick Moen, *Floppies for the new millennium*, Linux Journal, 116 (2003), s. 1.
- [61] Texas Instruments, Inc., *MSP430x15x, MSP430x16x, MSP430x161x Mixed Signal Microcontroller datasheet*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f1611.pdf>>, 31.3.2005.
- [62] Texas Instruments, Inc., *MSP430x1xx Family User's Guide*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://focus.ti.com/lit/ug/slau049f/slau049f.pdf>>, 28.2.2006.
- [63] Patrick McCluskey, Kofi Mensah, Casey O'Connor ja Fabian Lillie, *Reliability of commercial plastic encapsulated microelectronics at temperatures from 125 °C to*

300 °C, Proceedings of the Third European Conference on High Temperature Electronics, Berliini, Saksa, heinäkuu 1999, s. 17–24.

- [64] Hitachi Global Storage Technologies, *Hitachi Microdrive 3K8 digital media hard disk drives specifications*, saatavilla WWW-muodossa
<URL: <http://www.hitachigst.com/hdd/support/3k8/3k8.htm>>, viitattu 2.8.2006.
- [65] Andreas Dannenberg, Texas Instruments, Inc., *MSP430 USB Connectivity using TUSB3410*, saatavilla WWW-muodossa
<URL: <http://focus.ti.com/lit/an/slaa276a/slaa276a.pdf>>, lokakuu 2006.
- [66] Stefan Schauer ja Christian Speck, Texas Instruments, Inc., *Interfacing the MSP430 with MMC / SD Flash Memory Cards*, saatavilla WWW-muodossa
<URL: <http://focus.ti.com/lit/an/slaa281a/slaa281a.pdf>>, lokakuu 2003.
- [67] SecureDigital Association, *SDIO Simplified Specification*, saatavilla WWW-muodossa
<URL: <http://www.sdcard.org/sdio/Simplified%20SDIO%20Card%20Specification.pdf>>, 3.4.2006.
- [68] SimpleTech Inc., *Industrial OEM Products and Solutions*, saatavilla WWW-muodossa <URL: <http://www.simpletech.com/webspeed/industrial/?category1=Flash&category2=Flash+Card&category3=Secure+Digital>>, viitattu 7.8.2006.
- [69] Microsoft Corporation., *Microsoft Extensible Firmware Initiative — FAT32 File System Specification*, saatavilla WWW-muodossa
<URL: <http://www.microsoft.com/whdc/system/platform/firmware/fatgen.msp>>, 6.12.2000.
- [70] Portable Applications Standards Committee of the IEEE Computer Society ja The Open Group, *Standard for information technology — portable operating system interface (POSIX®), Base definitions*, IEEE, New York, Yhdysvallat, 2004.

WWW-osoitteiden toimivuus tarkistettu 25.10.2006.