

# **Sulautettujen järjestelmien varhainen kehitys**

Petri Kosunen

Tietojenkäsittelytieteen historia –seminaari

14.4.2003

HELSINGIN YLIOPISTO

Tietojenkäsittelytieteen laitos

1 JOHDANTO.....	3
2 VARHAISTEN SULAUTETTUIJEN JÄRJESTELMIEN KEHITYS.....	3
2.1 Putkista puolijohteisiin (- 1958) .....	3
2.2 Mikropiirien maailmanvalloitus (1958 - 1965) .....	5
2.3 Eletroniikka kehittyy, hinnat laskevat (1965 – 1970) .....	7
2.4 Mikro-ohjaimilla digitaaliseen maailmaan (1971 -) .....	9
3 SULAUTETUN OHJELMISTON KEHITYS.....	10
4 YHTEENVETO.....	12
5 LÄHTEET.....	14

## 1 JOHDANTO

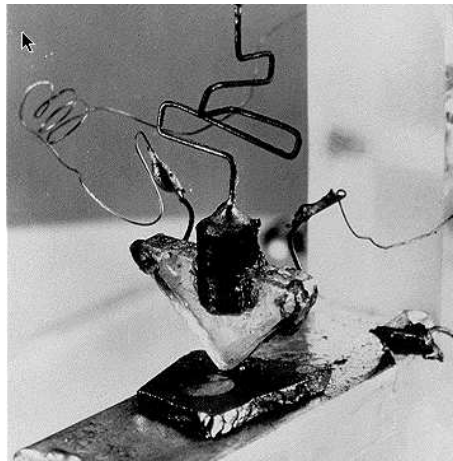
Sulautettujen järjestelmien kehityskaari määräytyy yksinomaan sen mukaan, kuinka sulautetun järjestelmän käsitteen määrittelee. Määritelmiä tuntuu löytyvän loputtomasti, mutta yleisin on *sulautettu järjestelmä on laite, jossa mikrotietokone on osana jotain elektroniikkajärjestelmää* [Kos99, s. 7]. Suorittimella on korvattu yksi tai useampia elektroniikan komponentteja ja sen tehtävänä on valvoa ja ohjata ympäristön tapahtumia ja muuta elektroniikkaa. Tällaisia järjestelmiä ovat mm. matkapuhelimet, autotietokoneet, funktiolaskimet, robotit, elektroniset vaa'at ja vaikkapa raketien ohjausjärjestelmät. Sulautetut järjestelmät ovat lähes poikkeuksetta myös tosiaikajärjestelmiä ympäristön asettamien tiukkojen aikarajojen vuoksi.

Tässä paperissa esitellään aluksi sulautettujen järjestelmien kannalta tärkeimmät elektroniikan keksinnöt lyhyesti. Tämän jälkeen käydään läpi syitä sulautettujen järjestelmien tarpeeseen ja niiden synnystä nykyhetken johtaneita tekijöitä. Lopuksi mainitaan sulautettujen järjestelmien peruspiirteitä ohjelmistokehityksen näkökulmasta ja kuinka prosessi on kehittynyt varhaisilta ajoilta. Tämä on pitkälti kuvaus nykytilanteesta.

## 2 VARHAISTEN SULAUTETTUJEN JÄRJESTELMIEN KEHITYS

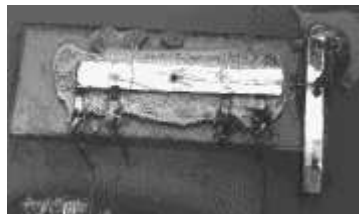
### 2.1 Putkista puolijohteisiin (- 1958)

Ennen 1950-luvun puoliväliä tietokoneet olivat valtavan kokoisia ja niitä käytettiin pääasiassa matemaattisten laskutoimitusten suorittamiseen. Koneet olivat kalliita ja niitä käyttivät usein vain isot organisaatiot ja varsinaisen työn tekivät tietokoneiden toimintaan perehtyneet operaattorit. Jo 1940-luvulta lähtien erityisesti lentoyhtiöt ja sotilaskäyttäjät käyttivät aktiivisesti tietokoneetta fysiikan ongelmien ratkaisuun ja tuloksia sovellettiin tuotekehityksessä. Tietokoneet eivät kuitenkaan kelvanneet omaisuuksiltaan sulatetuiksi järjestelmiksi.



Kuva 1: Ensimmäinen transistori [Lin96]

Merkittävä käännekohta elektroniikan kehityksessä tapahtui 1947, kun keksittiin transistori (kuva 1). Kyseessä on komponentti, jonka avulla pystytään vahvistamaan piensignaaleja samaan tapaan kuin aiemmin putkilla. Transistori on kuitenkin fyysisesti pienikokoisempi, luotettavampi ja kuluttaa vähemmän tehoa. Ensimmäiset transistoritietokoneet olivat silti vielä isokokoisia, koska vaikka transistorit olivat pieniä, komponenttien kytkennät veivät paljon tilaa.



Kuva 2: Ensimmäinen mikropiiri [Sci99]

Tilaongelman ratkaisuksi insinöörit alkoivat 1950-luvulla kehittää menetelmää, jolla kaikki komponentit ja kytkennät saataisiin yhdelle piirilevylle. Kun vahingossa Jack Kilby Texas Instrumentsilta ja Robert Noyce Fairchild Semiconductor Corporationosta keksivät toisistaan tietämättä vuosina 1958-59 kasata koko piirilevyn kaikkine komponentteineen yhdelle piirilevylle puolijohdemateriaaleilla. Tuloksena syntyivät elektroniikan mullistavat keksinnöt, maailman ensimmäiset mikropiirit (IC, Integrated Circuit; kuva 2)[Sci99, BelMa]. Mikropiirit tulivat kaupalliseen käyttöön vasta 1961. Sitä ennen sen ensimmäisiä aktiivikäyttäjää olivat sotilaskäyttäjät.

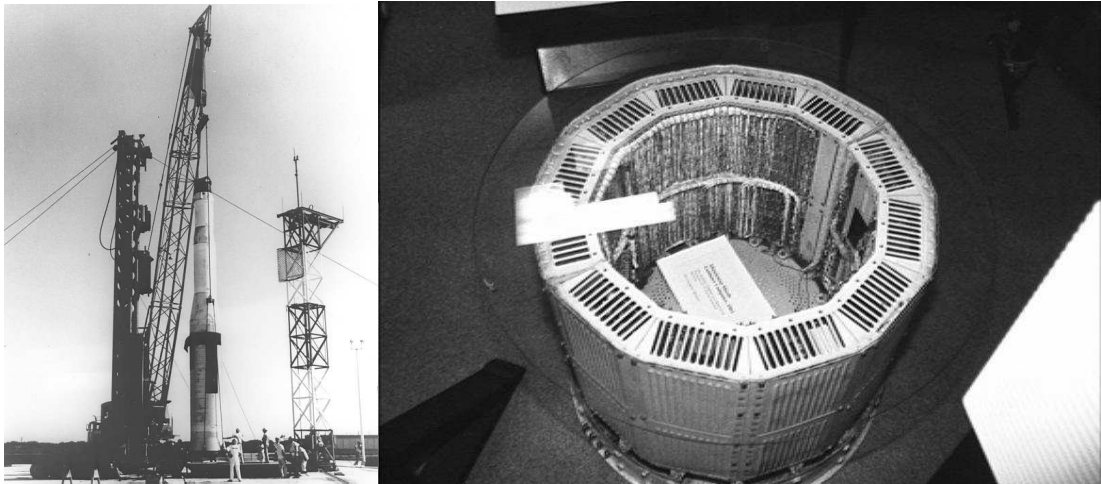
## 2.2 Mikropiirien maailmanvalloitus (1958 - 1965)

Neuvostoliitto laukaisi 1957 avaruuteen Sputnik I –satelliitin ja kilpailu avaruuden herruudesta Yhdysvaltojen ja Neuvostoliiton välillä alkoi. Tämä aloitti panostuksen teknologian kehittämiseen molemmissa suurvalloissa. Yhdysvallat perusti National Aeronautics and Space Administrationin (NASA) 1.10.1958 vastaamaan asetettuun haasteeseen. NASAn tutkimuspanos sulautettujen järjestelmien kannalta on merkittävä, kuten myöhemmin havaitaan.

Transistoritietokoneet mahdollistivat putkikoneita suuremman laskentanopeuden ja niillä rakennettiin ensimmäiset tosiaikajärjestelmät. Näistä esimerkkinä Atlas Guidance Computer - Atlas-ohjuksen laukaisutietokone 1957 ja lennonjohtojärjestelmä Whirlwind-projektin tuloksena 1958. Nämä tietokoneet olivat itsenäisiä laitteita, eivätkä siksi vielä ole sulautettuja järjestelmiä.

1950-luvun loppupuolella Yhdysvallat kehitti uudentyyppistä aseteknologian mullistavaa ohjusta. Aiemmin ohjuksia ohjattiin maasta käsin, mikä on hankalaa niiden valtavan lentonopeuden (yli 20 000 km/h), vaikeiden olosuhteiden ja huonon ohjattavuuden takia. Suunnitelmien mukaan uusi teknologia veisi älykkyyden ohjukseen itseensä siten, että se osaisi suunnistaa kohteeseen itsenäisesti ja huolehtisi itsestään myös lennon aikana. Tällaisen monimutkaisen logiikan hallintaan ja kehitykseen tietokone soveltuu mainiosti. Lisäksi koska ohjelmisto ei paina mitään, eikä myöskään vie tilaa ja tehoa enempää kuin mitä itse tietokone vie, ohjelmiston mahdollisuuksia korvata elektroniikan logiikkapiirejä tutkittiin suurin odotuksin.

Puolijohdekomponentit ovat pienikokoisia ja kestäviä. Niiden avulla saatiin toteutettua ensimmäinen järjestelmään itseensä integroitu tietokone Yhdysvalloissa: mannertenvälisen Minuteman I -ohjuksen ohjaustietokone vuonna 1960 (kuva 3) [NAS00]. Koneessa on 75 piirilevyä kiekossa ja se sijaitsi fyysisti ohjuksen kärkisuppilossa.



Kuva 3: Minuteman I lähtövalmiina 11.8.1960 [PatMi] ja sen Autonetics D17B –ohjaustietokone [Ins98]

Minuteman-ohjusteknologia täytti sille asetetut vaatimukset ja 1968 valmistui sen III-versio. Yhdysvalloissa on vielä tänäkin päivänä yli viisisataa toimintakuntoista Minuteman III –ohjusta ydinkärkineen ja uudemmat mallit ovat oikeastaan vain alkuperäisen teknologian kehittyneempiä versioita.

Ehkä uuden ohjusteknologian innoittamana, Yhdysvaltojen presidentti John F. Kennedy julisti kongressille 25.5.1961 suunnitelmansa miehitetyn aluksen laskeutumisesta maan ulkopuoliselle kappaleelle. Tämä aiheutti kohua, koska tehtävää pidettiin teknisesti ylivoimaisen vaikeana. Avaruuden valloitukseen myönnettiin kuitenkin paljon rahaa ja vähemmän kunnianhimoinen Apollo-projekti muutettiin uutta vaatimusta vastaavaksi.

NASA antoi Massachusetts Institute of Technologylle (MIT) tehtäväksi kehittää Apolloon ohjaus-, navigointi- ja hallintatietokoneen, joka olisi koko raketin ydin. MIT toteutti projektin vaatimat 57 sulautettavaksi järjestelmäksi soveltuvaa tietokonetta mikropiireillä uuden teknologian aiheuttamasta vastustuksesta huolimatta. Erinäköiset Apollo-prototyypit veivät noin 60% Yhdysvaltojen mikropiirituotannosta vuonna 1963. [WilMa]

Uudet käyttötarkoitukset ja hankala käyttöympäristö loivat uusia vaatimuksia tietokoneille. Pieni koko ja tehonkulutus eivät pelkästään riittäneet, vaan lisäksi piti huomioida voimakas säteily, vaihtelevat lämpötilat ja turvakriittiset toiminnot.

Neuvostoliitossa ohjelmiston merkitystä aliarvioitiin alkuvaiheilla ja painopiste oli vain elektroniikassa. Ohjelmointityöhön palkattiin osaamatonta henkilökuntaa, toiminta ei ollut lainkaan keskitettyä eikä standardoitua ja tuottavuus oli surkeata. Ohjusten ja kantorakettien ohjaukseen kehitettiin lukuisia erilaisia ratkaisuja. 1970-luvun loppuun mennessä oli syntynyt jo yli kolmesataa erilaista sulautettuihin järjestelmiin soveltuvaa arkkitehtuuria. [LipVI]

Ohjelmointia ei tuohon aikaan pidetty oikeana insinööritieteenä, kuten elektroniikkasuunnittelua, joten ohjelmiston käyttöä suosi myös halpa työvoima.

### 2.3 Eletroniikka kehittyi, hinnat laskevat (1965 – 1970)

1960-luvun lopulla mikropiirit olivat arkipäiväistyneet ja hinnat laskeneet sen verran, että markkinoille alkoi ilmaantua myös tavallisille kuluttajille suunnattuja sulautettuja järjestelmiä. Kiinnostus digitaalitekniikkaa kohti kasvoi uusien elektroniikan ja tietojenkäsittelytieteen tutkimustuloksien myötä. Digitaalinen signaalinkäsittely tuli mukaan uutena tekijänä, tarjoten menetelmiä mm. äänen ja kuvan käsittelyyn.

1960-luvulla kuluttajille suunnatut sulautetut laitteet olivat vielä lapsenkengissään. Eräs esimerkkituote on Hewlett-Packard HP 9100 A ja B –laskimet vuodelta 1968. Kyseessä on ohjelmoitava laskin, joka toimii kuten tietokone. Sitä voidaan kuitenkin pitää eräänlaisena esiaskeleena perinteisestä elektroniikasta sulautettuihin järjestelmiin, koska käyttäjille ei myyty tietokonetta vaan laskinta.



Kuva 4: HP 9100B [HPMus]

HP 9100 –sarjan laskimet suorittivat laskutoimitukset analogisesti, koska siten pystytään tekemään liukulukuoperaatioita helpommin kuin diskreeteillä digitaalipiireillä. 32 Kb:n ohjelmamuisti (ROM) piti sisällään kaikki laskutoimitusten vakiot, funktiot, merkkikoodaustaulukot ja CRT-näytön ohjauksen.

9100A-mallissa oli 16 käyttäjälle näkyvää rekisteriä ja ohjelman maksimipituus oli 196 käskyä. Ohjelma ladataan joko magneetikortilta tai kirjoitetaan suoraan näppäimistöltä. Kun ohjelmointi on tehty, laite asetetaan suoritustilaan ja se suorittaa ohjelman annetuilla parametreilla. Lukujen kokonaisosat saadaan näppäimistöltä ja desimaalit laitteessa olevaa rullaa pyörittämällä. Muistissa olevaa ohjelmaa voidaan suorittaa kuinka monta kertaa tahansa eri parametreilla ilman uudelleenohjelmointia. Kaksi liukulukua saatiin summattua tai vähennettyä 2ms:ssa, kertolasku vei 22ms ja jakolasku 27ms. Luonnollinen logaritmi saatiin laskettua 70ms:ssa ja trigonometriset funktiot alle 330ms:ssa. Hintaa laskimella oli noin 2000\$. [HPMus]

NASA julkaisi maaliskuussa 1971 dokumentin *Spaceborne Digital Computer Systems*. Siihen oli koottu kattavasti vuosien tutkimustulokset tietokoneiden käytöstä avaruusajoneuvojen (space vehicle) toteutuksessa. Tietokoneet soveltuivat NASAn mukaan ohjaukseen ja navigointiin, stabilointiin ja hallintaan, käyttöliittymäksi elektroniikalle, datan prosessointiin ja järjestelmän itestetaukseen ja diagnostiikkaan. Dokumentti käsittää parikymmentä eri tietokonevalmistajaa,



suunnitteluohjeita ja luettelee kokemuksen perusteella suositeltavia toimintamalleja. [NAS71]

Vaikka avaruusteknologia on kaukana tavallisen kuluttajan arkielämästä, on siihen panostettu tutkimustyö edesauttanut sulautettujen järjestelmien kehitystä. Ilman panostusta tietokoneiden säteilyarvoihin, tehonkulutukseen, kokoon, suorituskykyyn ja moneen muuhun avaruus- ja aseteknologian välttämättömään tarpeeseen, sulautetut järjestelmät eivät olisi mahdollisia siinä muodossa kuin ne nykyisellään tunnetaan.

#### 2.4 Mikro-ohjaimilla digitaaliseen maailmaan (1971 -)

Vielä 1970-luvulla mikrotietokoneet ja sulautetut järjestelmät rakennettiin erilliskomponenteista. Tilanne alkoi muuttua tammikuussa 1971, kun Intel julkaisi maailman ensimmäisen mikroprosessorin, Intel 4004:n. Heti seuraavana vuonna John Murtha Westinghousesta patentoi digitaalisen signaaliprosessorin toimintaperiaatteen ja sille keskeisen aritmetiikan teorian [ICK01]. Vuonna 1976 Intel julkaisi MCS-48:n ja Zilog Z80:n. Ne olivat maailman ensimmäiset mikro-ohjaimet. [WooSa]

Mikro-ohjaimia kutsutaan myös sulautettujen järjestelmien ohjaimiksi (embedded controller). Niiden avulla mikroprosessorin ja oheiskomponenttien tilan- ja tehontarvetta saatiin laskettua reilusti. Mikro-ohjaimessa on integroitu samalle piirille suorittimen lisäksi yleensä RAM- ja ROM-muistit ja erilaisia liitäntä- ja logiikkayksiköitä. Näistä esimerkkinä A/D- ja D/A-muuntimet, tuki pulssinleveysmodulaatiolle ja erilaisille väylille. Väyliksi lasketaan liitännät mikro-ohjaimesta muihin samalla piirilevyllä oleviin komponentteihin ja pidemmät liitännät kokonaan toisiin järjestelmiin (mm. kenttäväylät).

Kuten nimikin antaa ymmärtää, mikro-ohjain on nimenomaan suunniteltu elektroniikan ohjaukseen. Mikro-ohjaimen pahin kilpailija on ohjelmoitava logiikka, joka oli suosituampi vielä 1990-luvun alussa. Nykyään ohjelmoitavaa logiikkaa käytetään suurta suorituskykyä vaativissa järjestelmissä, jotka tekevät

paljon samantyyppistä raskasta laskentaa (mm. tietoliikennetuotteet). Ohjelmoitavassa logiikka on abstraktiotasolla prosessoria alemmalla tasolla. Siinä käyttäjä itse itse ohjelmoi loogiset portit mikropiirille. Ohjelmoitavalla logiikalla voi siis rakentaa myös prosessorin.

Kun mikro-ohjaimet saatiin lanseerattua markkinoille alkuvaiheiden ongelmien ratkettua ja hinnat painuivat alas useamman valmistajan julkaistua oma mikro-ohjainmallistonsa, yhä useammassa järjestelmässä alettiin käyttää niitä. Nykyään näkee harvemmin muita ratkaisuja tai elektroniikan tuotteita, joissa ei mikro-ohjainta olisi hyödynnetty. Halvan hinnan takia niitä löytyy niin näppäimistöistä, videoista, kuin kelloistakin.

Digitaalinen vallankumous tapahtui 1980-luvulla, jolloin kuluttajille suunnatut (viihde-)elektroniikkatuotteet olivat pääosin digitaalisia, esimerkiksi CD-soitin, fax ja matkapuhelin [NebFre]. Vasta tällöin sulautettu järjestelmä yleistyi todelliseksi vaihtoehdoksi perinteisen elektroniikkateollisuuden keskelle, koska se mahdollisti kustannustehokkaan ratkaisun digitaalisiin tuotteisiin.

Mikro-ohjaimia on suunniteltu erilaisia tehtäviä varten. Signaaliprosessorit mahdollistavat tehokkaan signaalinkäsittelyn, kun taas pienet 8-bittiset ohjaimet soveltuvat valvomaan antureita ja suorittamaan ohjaustehtäviä. Isot 32-bittiset mikro-ohjaimet mahdollistavat jopa aivan yleiskäyttöisen käyttöjärjestelmän käyttämisen kehitysalustana.

### 3 SULAUTETUN OHJELMISTON KEHITYS

Sulautetut järjestelmät ovat kehitetty vain tiettyä tarkoitusta varten. Siksi niiden ohjelma talletetaan haihtumattomaan muistiin. Prosessori alkaa suorittamaan ohjelmaa heti, kun laitteeseen saadaan tarvittava käyttöjännite. Ajonaikaisen tiedon käsittelyä varten on myös oltava käyttömuistia.

Sulautettujen järjestelmien kehitys tarkoittaa käytännössä mikro-ohjaimen lisäämistä elektroniikkatuotteeseen. Perinteisempi digitaalilogiikka (myös

ohjelmoitava) on ohjelmistoa alemmalla abstraktiotasolla ja on edelleenkin insinööritiede, kuten elektroniikan suunnittelukin. Niitä ei lasketa sulautetuiksi järjestelmiksi.

Toimintaperiaate sulautettujen järjestelmien ohjelmistokehityksessä on ollut samanlainen 1960-luvulta alkaen: ohjelmiston kehitys tapahtuu yleiskäyttöisellä tietokoneella, josta ohjelma siirretään haihtumattomaan ROM-lukumuistiin. Pieniä (alle 8-bittisiä) mikro-ohjaimia ohjelmoidaan edelleen pääasiassa Assembler-kielellä. Länsimaissa yleistyi kuitenkin C-kielen käyttö 1980-luvulla, joka on vakiinnuttanut asemassa käytetyimpänä sulautettuna ohjelmointikielenä. Venäjällä korkean tason kielet ovat yleistyneet vasta viime vuosina.

Siirtotapa ROM-muistiin riippuu käytetyn muistipiirin tyypistä. ROM-muistin tyyppi vaikuttaa ohjelmiston kehityskaareen, koska mitä hankalampaa testaus oikeassa ympäristössä on, sitä tarkemmin ohjelma on testattava ennen kokeilua:

- *Maskiohjelmoitava lukumuisti (ROM)*: ohjelmoidaan valmistusmaskin avulla valmistusvaiheessa; tieto säilyy muuttumattomana koko piirin eliniän.
- *Kertaohjelmoitava lukumuisti (PROM)*: muuten kuin ROM, mutta käyttäjä voi itse suorittaa ohjelmoinnin polttamalla muistikennojen sulakkeet poikki ohjelmointilaitteella.
- *UV-valolla purettava lukumuisti (EPROM, 1971)*: ohjelmoidaan ohjelmointilaitteella ja se voidaan tyhjentää säteilyttämällä sitä ultraviolettilalla.
- *Kertaohjelmoitava lukumuisti (OTP-EPROM)*: samaa tekniikkaa kuin EPROM, mutta piiriä ei voida tyhjentää; tyhjennys vaatii ikkunan, josta säteily pääsee sisälle, jättämällä se pois saadaan halvempi muistipiiri.
- *Sähköisesti purettava lukumuisti (EEPROM, 1981)*: kuten EPROM, mutta piiri voidaan tyhjentää ja ohjelmoida sähköisesti irrottamatta sitä piirilevytä.

- *Flash-muisti (1990-luku)*: nykyään käytetyin teknologia, jossa piiri on jaettu sektoreihin, jotka voidaan tyhjentää ja ohjelmoida sähköisesti toisistaan riippumatta.
- *Haihtumaton RAM-muisti (NVRAM)*: RAM-muistia, jossa tieto säilyy myös sähkökatkon yli esim. paristovarmennuksen tai tallennustavan vuoksi. [KosJa, s. 38 - 40]

Testaus on ollut sulautettujen järjestelmien vaikein osa-alue, koska ohjelmaan ja suorittimeen ei pääse suoraan käsiksi debuggerilla. Varhainen ohjelmistokehitys tapahtui oskilloskoopin ja sarjaportin avulla, joilla pääsee näkemään mikro-ohjaimen tuottamia signaaleja ja tekemään debug-tulostuksia. Paljon käytettyjen 8- ja 16-bittisten mikro-ohjaimien kohdalla tilanne ei ole muuttunut lainkaan varhaisista ajoista. Ainoa avut ovat simulaattorit ja emulaattorit suurien valmistajien tuotteille, joilla voi joko simuloida piirin toimintaa loogisesti ja emulaattorilla myös fyysisesti.

Nykyään 32-bittisissä ohjaimissa voi olla käytössä On-Chip-Debugging-menetelmiä, joilla voi tarkastella piirien sisäistä toimintaa ajonaikana. Mikään näistä menetelmistä ei kuitenkaan kerro koko totuutta, koska mikro-ohjain toimii yleensä aikakriittisessä ympäristössä ja kaikki normaalista poikkeava hidastaa toimintaa.

Yritys-erehdys-menetelmä on sulautettujen järjestelmien ohjelmistokehityksessä hidas ja työläs menetelmä, koska ohjelmiston saaminen lukumuistille vie usein aikaa. Varsinkin ennen sähköisesti tyhjennettävien ROM-muistien aikakautta, käytännössä ennen 1990-lukua, ohjelma oli syytä muodostaa kunnolla ja ohjelmoida ROMille vasta näennäisesti toimivaa koodia.

#### 4 YHTEENVETO

Sulautettujen järjestelmien kehityskaari on ollut sekava jo pelkästään termin määrittelyn puuttumisen takia. Idea elektroniikkakomponenttien korvaamisesta tietokoneella oli houkutteleva idea helpomman tuotekehityksen, hyvien fyysisten

ominaisuuksien ja uusien järjestelmien monimutkaistuvan logiikan takia. Transistori ja mikropiiri mahdollistavat laitteisiin integroidut tietokoneet. Ensimmäiset sulautetut järjestelmät syntyivät sotilas- ja avaruusteknologian tarpeisiin. Mikropiirien yleistyminen halvensi elektroniikkakomponenttien hintoja ja toi sulautetut järjestelmät myös tavallisen kuluttajan ulottuville. Mikro-ohjaimet mahdollistivat monipuolisempien ja halvempien digitaalisten laitteiden tulon markkinoille.

## 5 LÄHTEET

[Bec98] Beck C.H., *Recommended Checkout and Trouble-Shooting Procedures for the D17B Computer*. [WWW-dokumentti].

<[http://www.insinga.com/aron/antique/d17b2/d17b2\\_checkout.html](http://www.insinga.com/aron/antique/d17b2/d17b2_checkout.html)>. 27.3.2003.

[BelMa] Bellis Mary, *Inventors of the Modern Computer*. [WWW-dokumentti].

<<http://inventors.about.com/library/weekly/aa080498.htm>>. 27.3.2003.

[HPMus] Hewlett-Packard, *HP 9100A/B*. [WWW-dokumentti].

<<http://www.hpmuseum.org/hp9100.htm>>. 27.3.2003.

[ICK01] IC Knowledge, *History of Integrated Circuit*. [WWW-dokumentti].

<<http://www.icknowledge.com/history/1970s.html>>. 27.3.2003.

[Ins98] Insigna Aron, *Computer History*. [WWW-dokumentti].

<<http://www.insinga.com/aron/>>. 27.3.2003.

[Kos99] Koskinen Jari: *Mikrotietokonetekniikka*. Keuruu: Otava. 1999.

[Lin96] Lindsay Don, *The First Transistor*. [WWW-dokumentti].

<<http://www.cs.colorado.edu/~lindsay/talk/transistor.html>>. 27.3.2003.

[LipVI] Lipayev Vladimir, *History of Computer Engineering for Military Real-Time Control Systems in the USSR*. [WWW-dokumentti]. <<http://www.computer-museum.ru/english/milhist.htm>>. 27.3.2003.

[NAS71] NASA, *Spaceborne Digital Systems*. 1971.

[NAS00] National Air and Space Museum, *Gallery 213*. [WWW-dokumentti].

<<http://www.nasm.si.edu/galleries/gal213/gal213.html>>. 27.3.2003.

[Neb02] Nebeker Frederik, *Digital Signal Processing and the Rise of Consumer Electronics*. IEE History of Technology. USA. 5.7.2002.

[PatMi] 45 Space Wing Office of History, *The 6555th: Missile and Space Launches Through 1970*. [WWW-dokumentti].

<<https://www.patrick.af.mil/heritage/6555th/6555ch3/6555c3-8.htm>>. 14.4.2003.

[Sci99] ScienCentral, Inc, and The American Institute of Physics, *Integrated Circuits*. [WWW-dokumentti].

<<http://www.pbs.org/transistor/background1/events/icinv.html>>. 27.3.2003.

[Wil02] Williamson Mark, *The Apollo Command and Service Module – First and Only Moonship*. 2002.

[WooSa] Woolley Sandra, *A Brief History of Microprocessors*. [WWW-dokumentti]. <<http://www.eee.bham.ac.uk/woolleysi/teaching/microhistory.htm>>. 27.3.2003.