

Johannes Kalliokoski

# YLEISKATSAUS JÄRJESTELMÄPIIREIHIN

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Erja Sipilä  
Helmikuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Johannes Kalliokoski: Yleiskatsaus järjestelmäpiireihin  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma, tietotekniikka  
Helmikuu 2024

---

Tämän kandidaatintyön tarkoitus on tutustua järjestelmäpiirien rakenteeseen. Lisäksi työssä käydään läpi järjestelmäpiirien etuja ja haasteita muihin järjestelmämuotoihin nähden ja pohditaan niiden tulevaisuuden näkymiä. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena.

Järjestelmäpiirit (engl. System On a Chip, SoC) ovat joko kokonaisen tai osittaisen järjestelmän sisältäviä mikropiirejä. Niille integroitujen transistorien määrä voi olla miljardeja, eikä virheitä voi valmistuksen jälkeen enää korjata, joten suunnittelu on tarkkaa ja aikaa vievää työtä. Tämän vuoksi järjestelmäpiirejä kootaan yleensä valmiista, ennalta varmennetuista virtuaalisista komponenteista: IP-lohkoista (engl. Intellectual Property) ja alijärjestelmistä. Lohkot ovat itsenäisiä kokonaisuuksia, esimerkiksi muistilohkoja tai prosessoriytimiä. Alijärjestelmät ovat suurempia kokonaisuuksia, jotka koostuvat IP-lohkoista. Näiden lisäksi järjestelmäpiirit sisältävät erilaisia tiedonsiirtojärjestelmiä, kuten väyliä, ristikytkimiä (engl. crossbar) ja sirun sisäisiä tietoverkkoja. Laitteiston lisäksi järjestelmäpiirit sisältävät käyttöjärjestelmän.

Järjestelmäpiirit ovat pienempiä kuin vastaavat yhden kotelon monisirujärjestelmät (engl. System In a Package, SiP) ja piirilevyille kootut järjestelmät (engl. System On a Board, SoB). Pienen kokonsa vuoksi ne kuluttavat vähemmän sähköä, niiden valmistukseen kuluu vähemmän materiaalia ja se on yksinkertaisempaa ja halvempaa. Järjestelmäpiirien selkein huono puoli on se, ettei valmista sirua voi enää muokata, vaan esimerkiksi alijärjestelmän vaihtaminen toiseen vaatisi pitkän ja kalliin suunnittelutyön ja uuden sirun valmistuksen. Vastaavasti SiP- ja SoB-järjestelmissä se voi onnistua nopeammin, koska alijärjestelmä on voitu toteuttaa erilliselle sirulle.

Mikropiirien monimutkaistaminen on vaikeaa. Transistorien koko alkaa olla niin pieni kuin mahdollista, eikä sirun kasvattaminenkaan ole järkevää, koska valmistusvirheiden määrä kasvaa ja isompi osa piikiekosta menee hukkaan. Piireistä voidaan saada monimutkaisempia uusilla innovaatioilla, mutta monet valmistajat ovat siirtyneet suunnittelemaan SiP-järjestelmiä järjestelmäpiirien sijaan.

Avainsanat: järjestelmäpiiri, mikropiiri, SoC

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on kirjoitettu syksyllä 2023. Olin samaan aikaan osa-aika töissä ja rakkaan TietoTeekkarikillan tapahtumavastaava, mutta kuin ihmeen kaupalla aikaa kuitenkin riitti. Työn on ohjannut Erja Sipilä.

Kiitoksia Erjalle hyvistä neuvoista ja kiitoksia tuesta Ulpukka, Lotta, äiti ja kanssakyykkäjät. Erityiskiitos vielä Laitilan Wirvoitusjuomatehtaalte, sekä Lapin Kultra 0.0 %:n kehittäjille.

Tampereella, 6.2.2024

Johannes Kalliokoski

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. JÄRJESTELMÄPIIRIEN YLEINEN RAKENNE .....	3
2.1 Prosessorit .....	4
2.2 Muistit .....	5
2.3 Tiedonsiirto .....	7
2.4 Rajapinnat .....	12
3. KÄYTTÖJÄRJESTELMÄ .....	13
4. KÄYTTÖKOhteita .....	15
5. EDUT, HAASTEET JA TULEVAISUUS .....	18
6. YHTEENVETO .....	19
LÄHTEET .....	20

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ARM	engl. Advanced RISC Machine, eräs RISC-prosessoriarkkitehtuuri
ASIC	engl. Application Specific Integrated Circuit, asiakaskohtainen mikropiiri
ASIP	engl. Application-Specific Instruction-set Processor, prosessori, jonka käskykanta on suunniteltu erikseen käyttökohteen tarpeisiin.
CISC	engl. Complex Instruction Set Computer, prosessori, jossa on monimutkainen käskykanta
CPU	engl. Central Processing Unit, keskusprosessori
DDR3 SDRAM	engl. Double Data Rate 3 Synchronous Dynamic Random Access Memory
DMA	engl. Direct Memory Access, oikosiirto-ohjain
DRAM	engl. Dynamic Random Access Memory, dynaaminen hajasaantimuisti
DSP	engl. Digital Signal Processor, digitaalinen signaaliprosessori
EEPROM	engl. Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory, elektronisesti pyyhittävä ohjelmoitava lukumuisti
FPGA	engl. Field-Programmable Gate Array, Uudelleen ohjelmoitava porttimatriisi
GPU	engl. Graphic Processing Unit, grafiikkaprosessori
HDL	engl. Hardware Description Language, laitteistokuvauskieli
HIC	engl. Hybrid Integrated Circuit, hybridimikropiiri
IC	engl. Integrated Circuit, mikropiiri
IEEE	engl. Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö
I/O	engl. Input/Output, sisään- ja ulostulo
IP	engl. Intellectual Property, immateriaalioikeus
ITU	engl. International Telecommunication Union, kansainvälinen televiestintäliitto
MESI	engl. Modified, Exclusive, Shared, Invalid, Välimuistin yhtenäisyyden tarkistusprotokolla
MMU	engl. Memory Management Unit, muistinhallinta yksikkö
MPSoC	engl. Multiprocessor System on a Chip, järjestelmäpiiri, jossa on useita prosessoreita
MUTEX	engl. Mutual Exclusion, poissulkeminen, tapa estää rinnakkaisten tehtävien resurssiristiriita
NoC	engl. Network on a Chip, sirun sisäinen tietoverkko
PCIe	engl. Peripheral Component Interconnect Express, väylätyyppi
RAM	engl. Random Access Memory, hajasaantimuisti
RISC	engl. Reduced Instruction Set Computer, prosessori, jossa on yksinkertainen käskykanta
SerDes	engl. Serializer/Deserializer, rinnakkais-sarja-/sarja-rinnakkaismuunnin
SiP	engl. System in a Package, yhden kotelon järjestelmä, jossa kotelo sisältää useita siruja
SoB	engl. System on a Board, piirilevylle koottu järjestelmä
SoC	engl. System on a Chip, järjestelmäpiiri
SRAM	engl. Static Random Access Memory, staattinen hajasaantimuisti
USB	engl. Universal Serial Bus, sarjaväyläarkkitehtuuri

# 1. JOHDANTO

Mikropiirit (engl. Integrated Circuit, IC) ovat yhdelle piilevylle valmistettuja piirejä, joissa on aktiivisia ja passiivisia komponentteja. Aktiivisia ovat esimerkiksi transistorit ja passiivisia vastukset. [1] Mikropiiri integroidaan piirilevylle kotelolla. Kotelo helpottaa johtimien liitääntä ja suojaa mikropiiriä muun muassa korroosiolta ja mekaaniselta rasitukselta. [2] Hybridimikropiirillä (engl. Hybrid Integrated Circuit, HIC) tarkoitetaan erillisistä koteloimattomista komponenteista koottua piiriä, jota ei voi purkaa piiriä tuhoamatta. Tässä työssä mikropiirillä tarkoitetaan kuitenkin vain monoliittista, eli yhdelle piilevylle valmistettua piiriä. [3]

Mikropiirejä on yleiskäyttöisiä ja asiakaskohtaisia (engl. Application-Specific Integrated Circuit, ASIC). Yleiskäyttöisiä piirejä ovat esimerkiksi muistipiirit ja tavalliset prosessorit. ASIC-piirit taas ovat erityisesti yhtä tarkoitusta varten valmistettuja piirejä. Uudelleen ohjelmoitavat porttimatriisit (engl. Field-Programmable Gate Array, FPGA) ovat yleiskäyttöisiä piirejä, joiden toimintaa voidaan muuttaa ohjelmoimalla, kun muiden piirien muuttaminen vaatii kokonaan uuden sirun valmistamisen. [3] FPGA:lle toteutettu piiri olisi kuitenkin aina tehokkaampi ASIC:ina.

Mikropiiritekniikan kehittymistä voidaan mitata sirulle integroitavien transistorien määrällä. Tätä kehitystä kuvataan Mooren lailla, jonka mukaan mikropiirille integroitavien transistorien määrä kaksinkertaistuu noin 18 kuukauden välein [3]. Tekniikan kehittyessä transistoreista saadaan tehtyä pienempiä ja näin ollen pienelle sirulle voidaan valmistaa yhä monimutkaisempia piirejä. [1]

Järjestelmäpiiri (engl. System on a Chip, SoC) on mikropiiri, jolle on toteutettu järjestelmä. Määritelmä kuitenkin vaihtelee melko paljon ja järjestelmäpiiriksi kutsutaan usein myös osittaisia järjestelmiä. Tyypillisesti järjestelmäpiirin lisäksi tarvitaan esimerkiksi ulkoista muistia ja lisälaitteita, mutta itse järjestelmäpiiri sisältää toiminnan kannalta merkittävimmät komponentit. Järjestelmäpiiri sisältää ainakin yhden prosessoriytimen sekä muistia ja muita kyseisen järjestelmän tarvitsemia komponentteja. Järjestelmäpiiri voi olla joko yleiskäyttöinen mikropiiri tai ASIC, ja se voidaan myös toteuttaa FPGA:lle.

Mikrokontrollerit ovat hyvin samantapaisia mikropiirejä kuin järjestelmäpiirit: Nekin sisältävät ainakin yhden prosessoriytimen sekä muistia ja muita komponentteja.

Mikrokontrollerit ovat kuitenkin järjestelmäpiirejä yksinkertaisempia ja järjestelmäpiiri voi esimerkiksi sisältää mikrokontrollereita. Huomionarvoista on, että varhaiset järjestelmäpiirit olivat hyvin yksinkertaisia nykyisiin verrattuna ja uudempi mikrokontrolleri voi hyvin olla niitä suurempi transistorimääriltään. Ensimmäisenä järjestelmäpiirinä pidetään vuonna 1974 valmistettua Intel 5810 sirua. Sirua käytettiin Intelin omistaman Microman digitaalisessa rannekellossa. Siru sisälsi kaiken kellon tarvitseman toiminnallisuuden, eli kokonaisen järjestelmän. [4]

Tämä työ on kirjallisuuskatsaus järjestelmäpiireihin: tutkitaan mitä järjestelmäpiirit ovat ja mihin niitä käytetään. Lisäksi tutkitaan niiden etuja ja haasteita muihin järjestelmämuotoihin verrattuna ja pohditaan niiden tulevaisuuden näkymiä. Luvussa 2 käydään läpi järjestelmäpiirien rakennetta ja niiden yleisimpiä komponentteja. Luvussa 3 esitellään järjestelmäpiirien käyttöjärjestelmiä yleisesti. Luvussa 4 esitellään erään järjestelmäpiirin rakenne. Luvussa 5 tutustutaan järjestelmäpiirien hyviin ja huonoihin puoliin, sekä pohditaan niiden tulevaisuutta. Luvussa 6 on yhteenveto työstä.

## 2. JÄRJESTELMÄPIIRIEN YLEINEN RAKENNE

Tässä luvussa perehdytään järjestelmäpiirien yleiseen rakenteeseen. Alaluvussa 2.1 tutustutaan tarkemmin prosessoreihin, alaluvussa 2.2 muisteihin, alaluvussa 2.3 tiedonsiirtoon ja alaluvussa 2.4 rajapintoihin.

Järjestelmäpiirit voivat olla erittäin suuria kokonaisuuksia, jolloin niiden suunnittelu ja toiminnan verifioiminen vaatii paljon aikaa. 1990-luvulla keksittiinkin käyttää järjestelmäpiirin suunnittelussa ennalta suunniteltuja ja verifioituja, uudelleenkäytettäviä lohkoja. Sen sijaan, että koko järjestelmä suunniteltaisiin tyhjästä, se koottaisiinkin valmiista palasista. [6]

IP-lohkot (engl. Intellectual Property, IP) ovat itsenäisiä kokonaisuuksia, jotka toteuttavat jonkin toiminnon. Yleisiä IP-lohkoja ovat esimerkiksi prosessoriytimet, muistit ja erilaiset rajapinnat. IP-lohkot voivat olla järjestelmäpiirin suunnittelijoiden itse tekemiä tai ulkopuolisilta tahoilta hankittuja ja lisensoituja. [5][6]

IP-lohkot voidaan jaotella pehmeisiin (engl. soft), koviin (engl. hard) ja lujiin (engl. firm). Pehmeät lohkot ovat syntesoitavia, laitteistokuvauskielisiä (engl. Hardware Description Language, HDL) kuvauksia. [5][6] HDL-koodi voi olla avointa tai salattua, jolloin siihen ei voida tehdä muutoksia [5]. Pehmeiden lohkojen etuja ovat helppo uudelleenkäytettävyys, siirrettävyys ja joustavuus, huonoja puolia ovat erilaisten toteutusten aiheuttamat erot ajoituksessa ja teho-ominaisuuksissa. Pehmeitä lohkoja pystytään räätälöimään juuri tietyn järjestelmän vaatimuksiin, esimerkiksi prosessorilohkossa voidaan vaikuttaa rekisterien määrään, välimuistiin ja muun muassa käskykantaan. [5]

Kovat lohkot ovat tuotantoon valmiita, eli niiden komponenttien sijoittelu ja reititys on valmiiksi tehtynä. Tämän takia ne eivät ole joustavia eivätkä niin uudelleenkäytettäviä kuin pehmeät lohkot. Kovien lohkojen etuina ovat varma ajoitus ja teho-ominaisuudet. Kovia lohkoja on myös usein testattu piilevälle fyysisesti valmistettuna, joten ne ovat hyvin luotettavia. Ulkopuolisilta tahoilta hankitut kovat IP-lohkot voivat olla suunnitteluvaiheessa "mustia laatikoita", joista tiedetään vain käyttäytymismalli. Oikea toteutus lisätään tällöin vasta sitten, kun piilevyä aletaan valmistaa. [5][6]

Lujat lohkot ovat välimuoto pehmeän ja kovan väliltä [5][6]. Ne voivat olla rekisterisiirtotason määrittäjiä tai porttitasoisia netlistoja. Lujia lohkoja voidaan optimoida käyttökohteeseen sopivammaksi parametreja muuttamalla. Lujien lohkojen



ajoitus ja teho-ominaisuudet ovat helpommin ennakoitavissa kuin pehmeissä lohkoissa. [5]

Nykyään järjestelmäpiireissä voi olla erittäin suuria määriä IP-lohkoja, joten järjestelmäpiiri jaetaan usein erillisiin alijärjestelmiin. Nämä alijärjestelmät toteuttavat jonkin tietyn järjestelmän toiminnon, esimerkiksi audio- tai videoprosessoinnin. Alijärjestelmät koostuvat funktionsa mukaisista IP-lohkoista, yleensä ainakin omista prosessoriytimistä ja rajapinnoista. Rajapintojen avulla alijärjestelmä integroidaan osaksi muuta järjestelmäpiiriä. Alijärjestelmiä voidaan yksittäisten IP-lohkojen tapaan hankkia ulkopuolisilta tahoilta ja niitä voidaan käyttää uudelleen esimerkiksi pienin muutoksin. [7]

## 2.1 Prosessorit

Järjestelmäpiirit sisältävät käyttökohteen mukaan erilaisia prosessoreita. Piireissä on aina ainakin keskusprosessori (engl. Central Processing Unit, CPU), jonka lisäksi voidaan tarvita digitaalisia signaaliprosessoreita (engl. Digital Signal Processor, DSP) ja grafiikkaprosessoreita (engl. Graphic Processing Unit, GPU).

CPU:t voidaan jakaa käskykantojen mukaan yksinkertaisen (engl. Reduced Instruction Set Computer, RISC) ja monimutkaisen (engl. Complex Instruction Set Computer, CISC) käskykannan omaaviin prosessoreihin. [8][9]

RISC-prosessorien ajatus syntyi 1980-luvun puolivälillä tehdystä havainnosta, jonka mukaan CISC-prosessorien käskykannasta suurinta osaa ei juurikaan käytetty, koska ohjelman kääntäjät eivät niitä käyttäneet. CISC-prosessorit olivat siis usein turhan monimutkaisia ja monimutkaisten käskyjen takia myös yksinkertaisemmissä käskyissä saattoi suoritus kestää useita kellosyklejä. RISC-prosessoreissa käskykanta on pienempi ja käskyt yksinkertaisia. Käskyt ovat myös kaikki samanpituisia ja niiden suoritukseen kuluu aina yksi kellosykli. CISC-prosessorin monimutkaisen käskyn suoritus voi vaatia RISC-prosessorilta useamman yksinkertaisen käskyn suorituksen. [8]

RISC-prosessorit ovat erittäin yleisiä, esimerkiksi suurin osa mobiililaitteiden järjestelmäpiireistä sisältää RISC-arkkitehtuurin toteuttavia ARM-prosessoriytimiä (engl. Advanced RISC Machine, ARM). CISC-prosessoreista esimerkiksi Intelin pöytätietokoneprosessoreissa käyttämä x86-arkkitehtuuri on yleinen. [10]

Digitaaliset signaaliprosessorit ovat digitaalista signaalinkäsittelyä varten suunniteltuja prosessoreita. Digitaaliset signaaliprosessorit pystyvät käsittelemään dataa tarpeeksi nopeasti, etteivät analogiset signaalit laskostu digitaalimuunnoksessa. Analogisten

signaalien muuntaminen digitaaliseksi vaatii signaalin taajuuteen verrattuna vähintään kaksinkertaisen näytteenottotaudin. [9][3] Digitaaliset signaaliprosessorit suoriutuvat myös matemaattisista operaatioista nopeasti, jotta signaalia voidaan suodattaa ja muuntaa aika-alueelta taajuusalueelle tarpeeksi nopeasti [9].

Grafiikkaprosessoreita käytetään kuvan muodostamiseen näytölle. Grafiikkaprosessointi edellyttää rinnakkaisuutta, koska näytön kaikkien pikseleiden tulee olla oikean värisiä samaan aikaan, jotta muodostuisi oikeanlainen kuva. Tämän vuoksi grafiikkaprosessoriytimiä on yleensä useita GPU-alijärjestelmässä. Ytimet ovat usein hyvin yksinkertaisen käskykannan omaavia ja niitä on erilaisia eri tehtäviä varten. Yksi prosessoriydin voi esimerkiksi laskea valotukseen liittyviä asioita ja toinen geometrisiä muotoja. [3] Grafiikkaprosessorien erityiset käskykannat tekevät niistä tehokkaampia kuin yleisprosessorit ja ne myös vähentävät yleisprosessorien työmäärää.

Prosessoreissa voi olla myös käyttökohteen mukaan suunniteltu käskykanta (engl. Application-Specific Instruction-set Processor, ASIP). ASIPeissa on vain sellaisia käskyjä, joita käyttökohteessa tarvitaan, joten ne voivat olla pienempiä, energiatehokkaampia ja nopeampia kuin tavalliset prosessorit. [11] On myös prosessoreita, joiden pientä peruskäskykanta voidaan laajentaa käyttökohteen mukaisilla käskyillä, esimerkiksi RISC-V:n toteuttavat prosessorit [12].

Järjestelmäpiireissä voi olla yksi tai nykyään useimmiten useampia prosessoriytimiä (engl. Multiprocessor System on a Chip, MPSoC). Yksinkertainen MPSoC voisi olla esimerkiksi ARM-prosessoriytimen ja sen apuprosessorina toimivan DSP:n ympärille rakennettu järjestelmä. [13]

## 2.2 Muistit

Jopa 60–70 % järjestelmäpiirin piilevyn pinta-alasta voi olla muistia. Sisäisen muistin lisäksi ne voivat käyttää ulkoista muistia, mutta sisäinen muisti on luonnollisesti nopeammin saavutettavaa. [14]

Järjestelmäpiirit voivat sisältää hajasaantimuistia (engl. Random Access Memory, RAM) dynaamisena (DRAM) tai staattisena (SRAM). Lisäksi järjestelmäpiirillä voi olla haihtumatonta muistia: elektronisesti pyyhittävää ohjelmoitavaa lukumuistia (engl. Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory, EEPROM) ja Flash-muistia. [14] Flash-muisti on EEPROM-muistia nopeampaa ja vähemmän tilaa vievää, mutta se voidaan tyhjentää vain lohkoittain tai kokonaan, kun EEPROM-muisti voidaan tyhjentää tavu kerrallaan [3].

DRAM- ja SRAM-muistien erona on DRAM-muistin pakolliset virkistämiset, kun taas SRAM-muisti säilyttää datan niin kauan kun se on kiinni virtalähteessä. Tämän takia SRAM-muisti kuluttaa vähemmän sähköä. SRAM-muisti on lisäksi DRAM-muistia nopeampaa. DRAM-muisti on kuitenkin yksinkertaisempaa ja halvempaa, ja se vie vähemmän tilaa kuin SRAM-muisti. DRAM-muistisoluun tarvitaan yksi transistori ja kondensaattori databittiä kohden. SRAM-muistissa transistoreita on useita jokaista bittiä kohden. Esimerkiksi 6T1SRAM sisältää kuusi transistoria, joista kaksi tarvitaan muistin lukuun ja kirjoittamiseen, ja loput muodostavat itse muistin. [14][15]

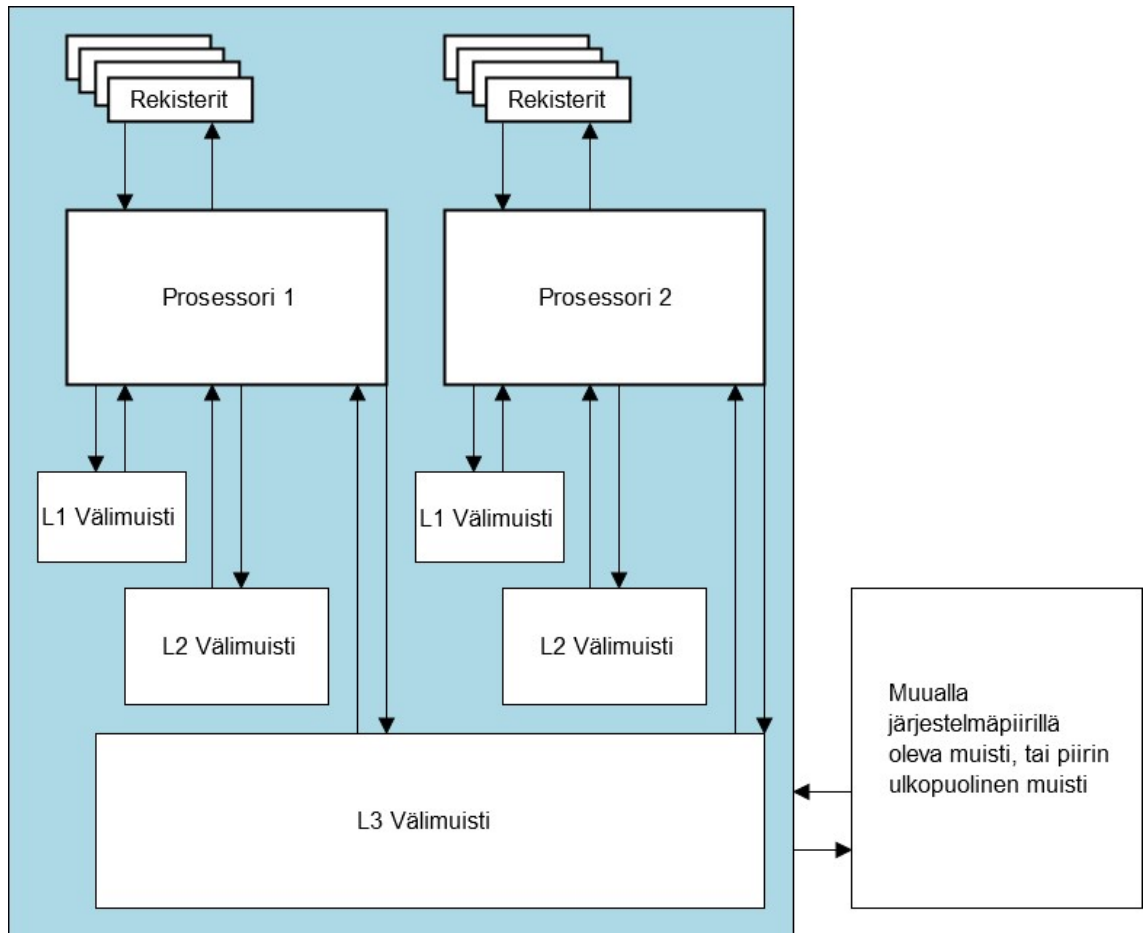
Järjestelmäpiirin muistit voidaan jaotella käyttötarkoituksen mukaan rekistereihin, välimuistiin ja puskurimuistiin [14]. Lisäksi niissä voi olla haihtumatonta muistia tallennustilana. Rekistereihin haetaan yksittäisiin käskyihin tarvittavat operandit, ja niissä voidaan säilyttää esimerkiksi operaatioiden välituloksia. Rekistereitä voidaan jakaa useisiin tyyppeihin sen mukaan, minkä tyyppistä dataa ne voivat pitää ja mihin niitä käytetään. [16] Esimerkiksi ohjelmalaskurit ovat rekistereitä, jotka osoittavat seuraavan muistista haettavan käskyn [3]. Puskurimuistiin tallennetaan dataa väliaikaisesti esimerkiksi datan siirtojen aikana [3].

Välimuisti toimii puskurimuistina prosessorin ja varsinaisen muistin välillä. Välimuistissa pidetään kopioita usein tarvittavasta datasta, jolloin se on prosessoriytimelle nopeammin saatavilla [3][14]. Välimuisti jaetaan usein hierarkkisiin tasoihin etäisyyden mukaan: L1-välimuisti on lähimpänä ydintä, L2 vähän kauempana ja niin edelleen. Tyypillisesti välimuisti on kolmetasoista, mutta tasoja voi olla enemmän tai vähemmän. [14]

Rekisterit sekä L1- ja L2-välimuistit ovat yleensä prosessoriydinkohtaisia ja toteutettu SRAM-muistilla. L3-välimuisti on usein jaettu useamman ytimen kanssa ja sitä on yleensä suhteellisen paljon, jolloin se voi olla järkevää toteuttaa DRAM-muistilla. Koska eri ytimillä on omia välimuisteja, voi samasta datasta olla yhtä aikaa olemassa useita kopioita. Kun muokattu data kirjoitetaan takaisin varsinaiseen muistiin, voisi toinen prosessoriydin siis käyttää vanhentunutta dataa omasta välimuististaan. [14]

Välimuistitasojen yhtenäisyyden hallintaan on useita protokollia, kuten MESI. Siinä kaikilla välimuistin datakentillä on joku neljästä tilasta: muokattu, eksklusiivinen, jaettu tai epäkelpo (engl. Modified, Exclusive, Shared, Invalid, MESI). Muokattu tarkoittaa, että datakentässä on datan uusin versio, jota ei ole muissa välimuisteissa ja joka pitää kirjoittaa varsinaiseen muistiin, kun tila vaihtuu. Eksklusiivinen tarkoittaa, että datakentän dataa ei ole muokattu eikä siitä ole kopioita muissa välimuisteissa. Jaettu tarkoittaa, että dataa ei ole muokattu ja siitä voi olla kopioita muissa välimuisteissa. Epäkelpo datakenttä

sisältää virheellistä dataa. [14] Kuvassa 1 on esitettyä kaksitytimisen prosessorialijärjestelmän käyttämiä muisteja.



**Kuva 1.** Prosessori-alijärjestelmä kolmitasoisella välimuistilla. Perustuu lähteeseen [14].

## 2.3 Tiedonsiirto

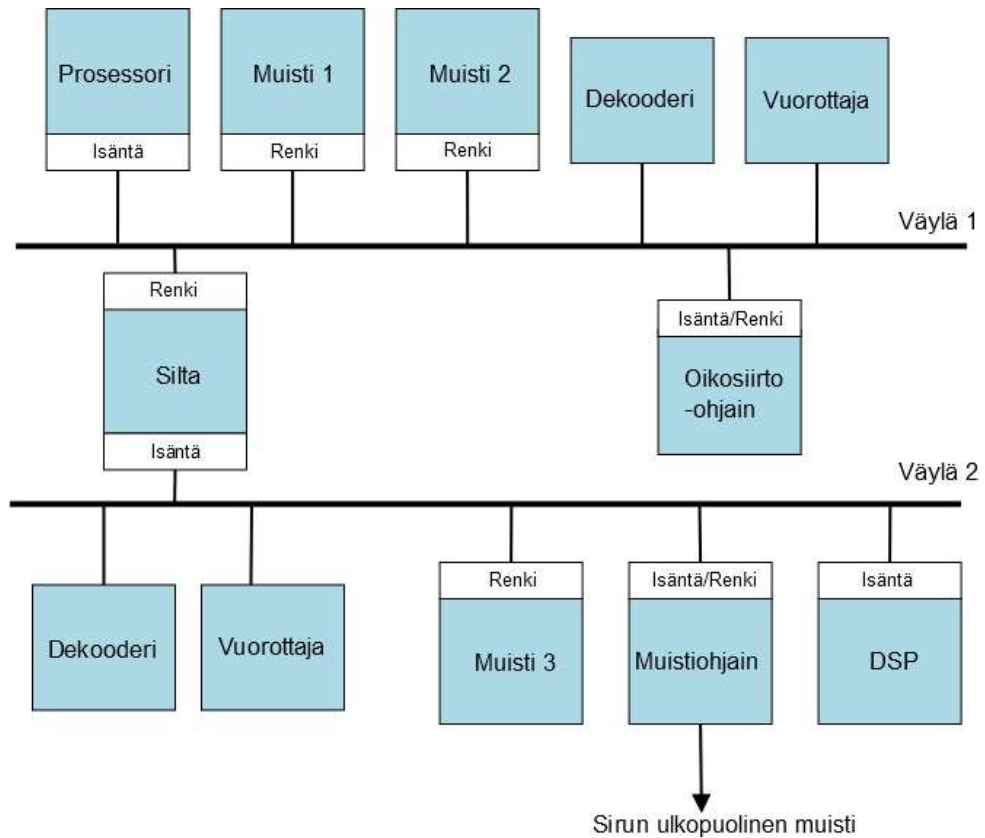
Järjestelmäpiireissä IP-lohkot tai alijärjestelmät voivat kommunikoida keskenään yhdellä tai useammalla väylällä (engl. bus), tai muilla tiedonsiirtojärjestelmillä. Erilliset alijärjestelmät sisältävät usein myös omia väyliä alijärjestelmän sisäiseen tiedonsiirtoon.

Väylä on järjestelmän eri lohkot yhdistävä kanava, jonka muodostaa yksi tai useampi johdin. Yhden johtimen väylät, eli sarjaväylät (engl. serial bus), siirtävät dataa yksi bitti kerrallaan, kun taas useamman johtimen rinnakkaisväylät (engl. parallel bus) siirtävät yhden bitin johdinta kohden. Dataa siirretään väylällä määränpähän, jonka jälkeen

määränpäästä lähetetään takaisin kuittaus onnistuneesta tai epäonnistuneesta datan vastaanotosta. Väyläprotokolla määrittää väylänkäytön säännöt. Näihin kuuluvat esimerkiksi lähetyksen ajallinen kesto ja koko bitteinä. Lisäksi protokolla määrittää, mitkä lohkot saavat käyttää väylää, mikäli pyyntöjä on yhtä aikaa useita. [17]

Eri lohkot voidaan jaotella väylän käytön suhteen isäntiin (engl. master) ja renkeihin (engl. slave). Isäntälohkot aloittavat ja ohjaavat tiedonsiirtoja ja renkilohkot vastaavat siirtoihin. Lohko voi myös olla yhtä aikaa isäntä ja renki, esimerkiksi kuvan 2 oikosiirto-ohjain (engl. Direct Memory Access, DMA). Prosessori aloittaa siirron konfiguroimalla oikosiirto-ohjaimen datamäärän ja muistiosoitteet, minkä jälkeen prosessoria ei enää tarvita, vaan oikosiirto-ohjain toimii isäntänä ja hoitaa itse tiedonsiirron. [17]

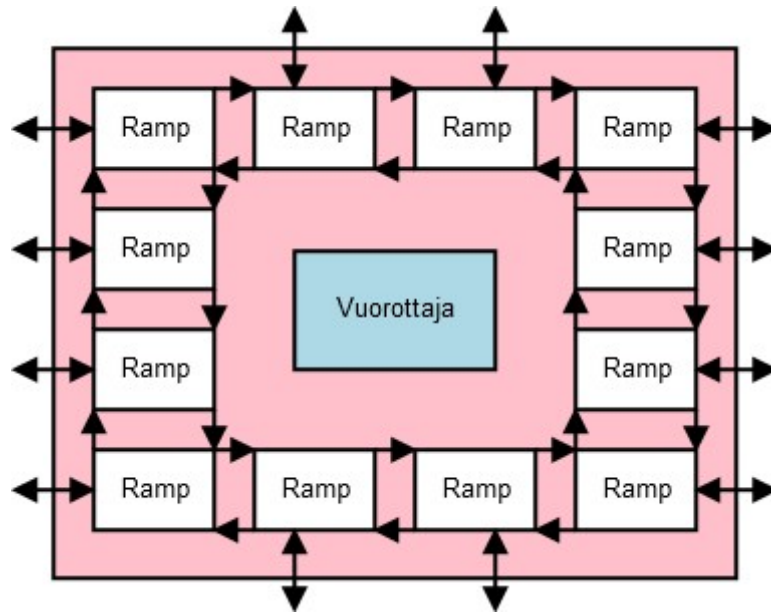
Väyläprotokollan toteuttavat dekooderit (engl. decoder), jotka ohjaavat tiedonsiirrot oikealle rengille, sekä vuorottajat (engl. arbiter), jotka jakavat käyttövuorot lohkoille, jos käyttöpyyntöjä on yhtä aikaa useita. Lisäksi mikäli väyliä on useita, voidaan tarvita siltoja niiden välille. Silta yhdistää kaksi väylää ja tarvittaessa muuntaa lähetyksen vastaamaan toisen sillan protokollaa. Kuvan 2 esimerkissä siltaa voivat käyttää väylän 1 isäntälohkot, ja silta toimii isäntänä väylällä 2. Silta on siis yksisuuntainen, eikä esimerkiksi väylän 2 isäntänä toimiva DSP voi kirjoittaa sen kautta muisteihin 1 ja 2. Tätä varten tarvittaisiin toinen silta. [17] Väylän ja lohkojen rajapinnassa voi olla myös puskurimuistia, jonne siirtoa odottava data siirretään lohkolta tai väylältä. Kuvassa 2 on yksinkertainen kahden jaetun väylän systeemi.



**Kuva 2.** Yksinkertainen järjestelmäpiiri kahdella jaetulla väylällä. Perustuu lähteeseen [17].

Väylien skaalaus IP-lohkojen määrän kasvaessa on vaikeaa. Yhtä väylää voi käyttää vain yksi isäntälohko kerrallaan, joten jos isäntiä on paljon, alkaa mahdollinen viivekin kasvaa. Lisäksi mikäli väylät ovat pitkiä, tarvitaan tiedonsiirtoon enemmän tehoa. [18] Tämän vuoksi moniväyläinen ratkaisu voi olla yksiväyläistä järkevämpi. [15][17]

Väyläjärjestelmiä on monenlaisia. Esimerkiksi Sonyn, Toshiba ja IBM:n suunnittelemassa Cell Broadband Enginessä on erikoinen ympyrän muodostava väyläjärjestelmä. Se koostuu 12:sta Ramp-lohkosta, joista jokainen on yhdistetty piirin yhteen lohkoon. Nämä Ramp-lohkot on yhdistetty toisiinsa kuvan 3 mukaisesti 128 bitin levyisillä väylillä. Väyliä on neljä rinnakkain, eli kaksi per suunta. Tietoa siirretään 128 bittisissä paketeissa ja niitä voi liikkua yhtä aikaa kolme per väylä, kunhan ne eivät mene päällekkäin. [19] Kuvassa 3 on Cell Broadband Enginen väyläjärjestelmän rakenne.



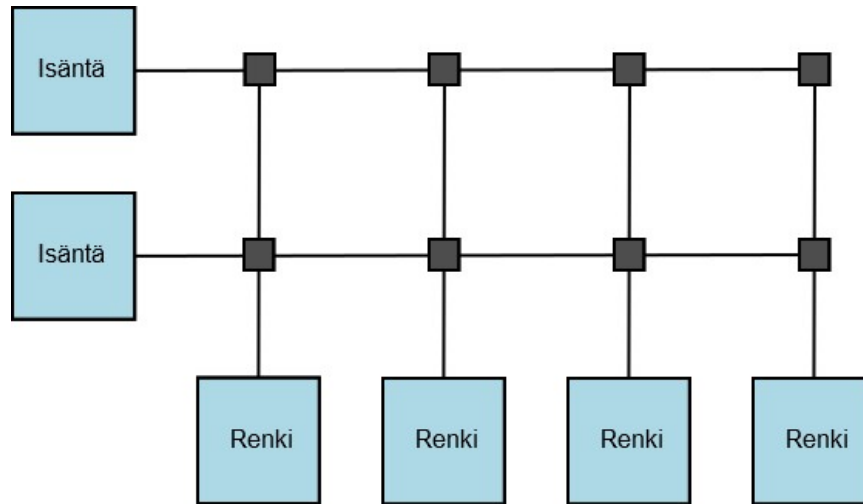
**Kuva 3.** Cell Broadband Enginen väyläjärjestelmä. Perustuu lähteeseen [19].

Tiedonsiirtoa ohjaa vuorottaja, joka ohjaa paketit perille pääsyn kannalta nopeampaan suuntaan. Paketeille annetaan uniikki tunniste, jonka avulla sen siirtoa valvotaan. Ramp-lohkot siirtävät paketin tunnisteen mukaan joko seuraavaan väylään tai omaan lohkoonsa. [19]

Mikäli useiden isäntien tulee voida käyttää renkilohkoja yhtä aikaa, voi ristikytkin (engl. crossbar), olla väyliä parempi vaihtoehto. Ristikytkin on johdinmatriisi, jossa dataa voidaan siirtää rinnakkain, kunhan lähettäjät ja määränpäättäjät eivät ole samoja. Ristikytkin on ikään kuin kaksipisteyhteys kaikista isännistä kaikkiin renkeihin. [17][18]

Esimerkiksi useita prosessoriytimiä sisältävissä järjestelmäpiireissä tiedonsiirto jaettuihin muistilohkoihin voi olla järkevää toteuttaa ristikytkimellä. Mikäli ytimet kilpailisivat väylien käytöstä keskenään, menetettäisiin usean ytimen mahdollistama rinnakkaisuutta. [20]

Kuvassa 4 on kahden isäntälohkon ja neljän renkilohkon ristikytkin. Johtimien risteyksiä ohjaamalla vuorottaja määrää, mikä isäntä saa käyttää mitäkin renkiä.

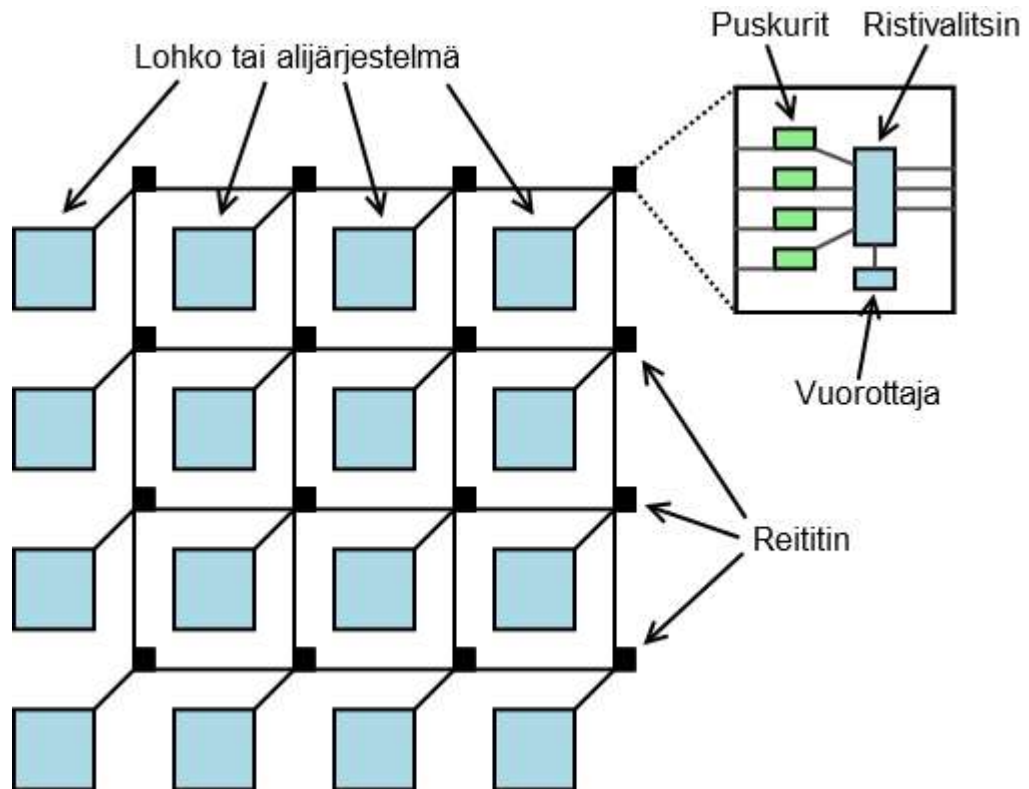


**Kuva 4.** Kahden sisääntulon ja neljän ulostulon ristikytkin. Perustuu lähteeseen [17].

Ristikytkimen koko skaalautuu sisääntulojen ja ulostulojen tuloon suhteeseen, joten ne voivat viedä paljon tilaa. Tämän takia esimerkiksi moniväyläinen systeemi voi olla hyvä kompromissi yksiväyläisen ja täyden ristikytkimen väliltä. [18] Kuvassa 3 esitellyn väyläjärjestelmän suunnittelijat olisivatkin ilmeisesti halunneet piiriin tehokkaamman ristikytkimen, mutta piirillä ei riittänyt sille tilaa. Järjestelmässä voidaan myös käyttää sekä ristikytkimiä että jaettuja väyliä [17].

Suuret järjestelmäpiirit sisältävät usein sirulle toteutetun tietoverkon (engl. Network on a Chip, NoC). Tietoverkot koostuvat useista johtimista ja reitittimistä. Tietoa siirretään paketteina, joita johtimien risteyskohdissa olevat reitittimet ohjaavat eteenpäin oikeaan suuntaan. Reitittimet koostuvat puskureista, ristikytkimestä ja vuorottajasta. Eri johtimilta tulevat paketit päätyvät puskurimuistiin, ja vuorottaja ohjaa ne ristikytkimellä oikeaan johtimeen. Tietoverkossa voi liikkua yhtä aikaa useita paketteja toisistaan riippumatta. [17] Kuvassa 5 on yksinkertainen kaksikulotteinen tietoverkko.





**Kuva 5.** Sirun sisäinen 2D-tietoverkko. Perustuu lähteeseen [17].

## 2.4 Rajapinnat

Rajapinnat yhdistävät eri lohkoja tai laitteita toisiinsa [3]. Järjestelmäpiireissä rajapintoja on sisäisiä ja ulkoiseen maailmaan yhteydessä olevia. Ulkoiset rajapinnat riippuvat luonnollisesti laitteen liitännöistä ja esimerkiksi mahdollisista muista siruista.

Rajapinnat noudattavat yleensä esimerkiksi IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) tai ITUn (International Telecommunication Union) määrittämiä standardeja eli protokollia. [14] Rajapintojen standardointi on hyödyllistä valmiiden alijärjestelmien helppoa integroimista varten [7], sekä valmiin laitteen käytettävyyden kannalta.

Rajapintalohkoja ovat esimerkiksi USB-lohkot (engl. Universal Serial Bus, USB), Ethernet-lohkot ja sarja-rinnakkais- tai rinnakkais-sarjamuuntimet (engl. Serializer/Deserializer, SerDes). Rajapintoja on myös analogisia, esimerkiksi mittantureiden rajapintoja. Myös esimerkiksi Bluetooth ja muut langattomat yhteydet tarvitsevat analogisen rajapinnan. [14]

### 3. KÄYTTÖJÄRJESTELMÄ

Käyttöjärjestelmä on tärkeä osa järjestelmäpiiriä, ja ainoa, jota voi piirin valmistamisen jälkeen muuttaa. Tässä luvussa esitellään käyttöjärjestelmien tehtäviä yleisesti.

Järjestelmäpiirin käyttöjärjestelmä hallitsee kaikkea. Käyttöjärjestelmä mahdollistaa laitteen helpon käytön ohjaamalla laitteistoa käyttäjän puolesta. Se on ikään kuin rajapinta käyttäjän ja laitteiston välillä: Kun käyttäjä haluaa laitteen tekevän jotain, tulkkaa käyttöjärjestelmä käskyn prosessorin ymmärtämään muotoon ja prosessorin tuottaman tuloksen käyttäjän ymmärtämään muotoon. Lisäksi käyttöjärjestelmä hallitsee laitteiston resursseja: kun esimerkiksi älypuhelimien käyttäjä tekee laitteella useita asioita yhtä aikaa, huolehtii käyttöjärjestelmä, että niille kaikille riittää tarpeeksi muistia ja laskentatehoa prosessoreilta. [21]

Käyttöjärjestelmän ydin (engl. kernel) huolehtii resurssien hallinnasta, joka on koko järjestelmän tärkein tehtävä. Ydin luo prosesseja, poistaa niitä ja ajoittaa niiden suoritusta. Ydin varaa prosesseille niiden tarvitseman määrän muistia, ja vapauttaa sen muiden käyttöön, kun sitä ei enää tarvita. Ydin myös hallitsee lisälaitteiden käyttöä, esimerkiksi reagoimalla järjestelmään yhdistettyyn USB-laitteeseen [21]

Luotujen prosessien, eli tehtävien (engl. task) ajoittaminen prosessoreille voi olla kahdenlaista: aloitetun tehtävän voidaan antaa suoriutua loppuun tai suoritusvuoro voidaan antaa kesken kaiken toiselle tehtävälle. Mikäli tehtävien annetaan aina suoriutua loppuun asti, voi niiden suoritusjärjestys olla yksinkertaisesti niiden luomisjärjestys. Jos taas suoritusvuorossa oleva tehtävä vaihtelee kesken kaiken, tarvitaan jokin tapa päättää, miten vuoron saava tehtävä valitaan. Valinta voi perustua esimerkiksi tehtäville ennakkoon määriteltyihin prioriteettitasoihin tai tehtävän pituuteen. Tällä tavalla tehtäviä ajoittaessa on kuitenkin huolehdittava, että kaikki tehtävät tulevat suoritetuiksi ajoissa. [21]

Eri tehtävät voivat myös olla riippuvaisia toisistaan. Tehtävillä on aina jokin syöte ja tuotos. Jos tehtävän tuotos tarvitaan toisen tehtävän syötteeksi, tarvitaan niiden välille putki (engl. pipe). Putki voi syöttää tuotoksen suoraan toiselle tehtävälle tai puskurimuistiin, jotta eri prosessien mahdolliset nopeuserot eivät aiheuttaisi ongelmaa. Tehtävät voivat kommunikoida keskenään signaaleilla, joita käytetään esimerkiksi ilmoittamaan bugeista, keskeytyksistä tai kun kytketty lisälaitte on valmis. Toinen tehtävien välisen kommunikoinnin keino on viestijono (engl. message queue). Se on asynkroninen, eli eri prosessit voivat kirjoittaa sinne ja lukea sieltä eri aikoihin.

Ydin myös ratkaisee rinnakkaisten tehtävien välisiä ristiriitoja. Ristiriitojen estämiseen on kaksi tapaa: poissulkeminen (engl. Mutual Exclusion, MUTEX) ja semafori (engl. Semaphore). Semafori on muuttuja, joka kuvaa saatavilla olevien resurssien määrää. Kun tehtävä haluaa käyttää resurssia, vähennetään semaforin arvosta yksi. Jos resursseja on vapaana vähintään yksi, eli semaforin arvo on vähintään yksi, vähennetään arvoa, ja tehtävä saa resurssin käyttöönsä. Kun tehtävä ei enää tarvitse resurssia, nostaa se semaforin arvoa yhdellä. MUTEX on lukko. Kun tehtävä haluaa käyttää resurssia, se lukitaan, jolloin muut eivät voi sitä käyttää. Käytön jälkeen lukko avataan. Mikäli resurssia ei ole saatavilla, jää tehtävä odottamaan. [21]

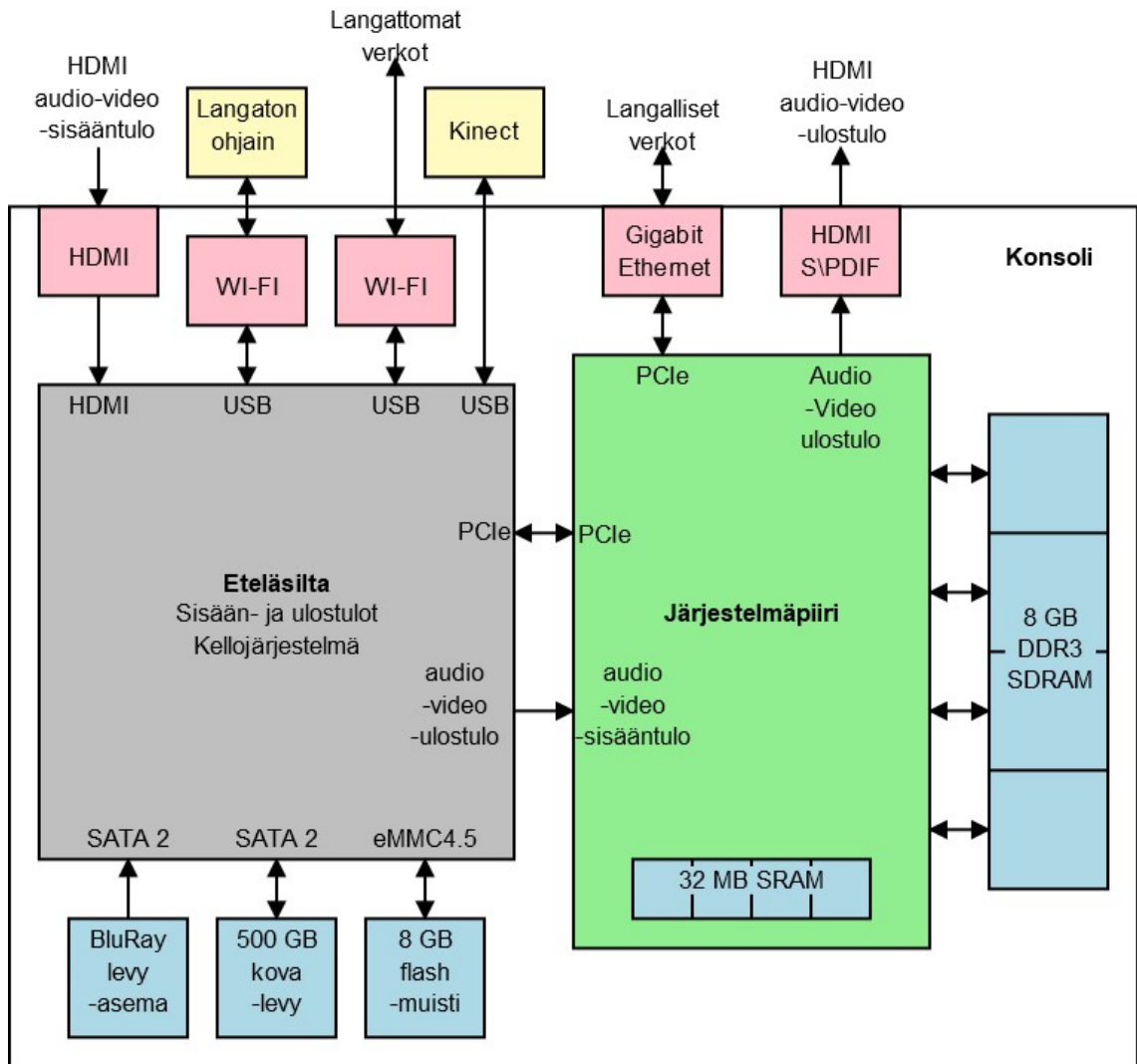
## 4. KÄYTTÖKOhteITA

Järjestelmäpiirejä käytetään monissa eri kohteissa. Järjestelmäpiirien pienen koon ja energiatehokkuuden takia niitä käytetään älypuhelimissa, älykelloissa, tablettitietokoneissa ja monissa muissa akullisissa älylaitteissa. Internet-of-Things (IoT) -laitteet hyödyntävät usein järjestelmäpiirejä. Modernit autotkin sisältävät usein järjestelmäpiirin. Monia pöytätietokoneiden prosessorisiruja voisi sanoa järjestelmäpiireiksi, sillä ne voivat sisältää yleisprosessoriytimien lisäksi esimerkiksi välimuistia, grafiikkaprosessorin ja rajapintalohkoja. Tässä luvussa esitellään erään järjestelmäpiirin rakenne.

Järjestelmäpiiri voi olla osana suurempaa piiriä, esimerkiksi SiP-järjestelmää (engl. System in a Package, SiP), tai SoB-järjestelmää (engl. System on a Board, SoB). SiP-järjestelmät koostuvat useista, samassa kotelossa olevista siruista. [5][23] SoB-järjestelmä tarkoittaa piirilevylle muodostettua järjestelmää [5].

Vuonna 2013 Microsoftin julkaisema Xbox One sisältää aikanaan suurimman kuluttajille suunnatun järjestelmäpiirin piirilevylle asennettuna. Microsoft suunnitteli 5 miljardia transistoria sisältävän järjestelmäpiirin yhdessä AMD:n kanssa. Kuvassa 6 on esiteltyinä koko järjestelmä. Järjestelmäpiirissä on ulkomaailmaan PCIe-rajapinta (engl. Peripheral Component Interconnect Express, PCIe) langallisia verkkoyhteyksiä varten ja audio-video-ulostulo monitoria ja kaiuttimia varten. Järjestelmäpiirillä on lisäksi rajapinnat piirilevylle asennettuun DDR3 SDRAM (Double Data Rate Synchronous Dynamic Random Access Memory) -muistiin ja erillisellä sirulla olevaan eteläsiltaan. [22]

Erillinen eteläsilta toimii järjestelmäpiirin rajapintana HDMI-sisääntulolle, langattomalle ohjaimelle, langattomille verkkoyhteyksille, Kinect -lisälaitteelle, BluRay-levyasemalle, kovalevylle ja Flash-muistille. Eteläsillan ja Järjestelmäpiirin välillä on PCIe- ja audio-video-rajapinnat. [22]

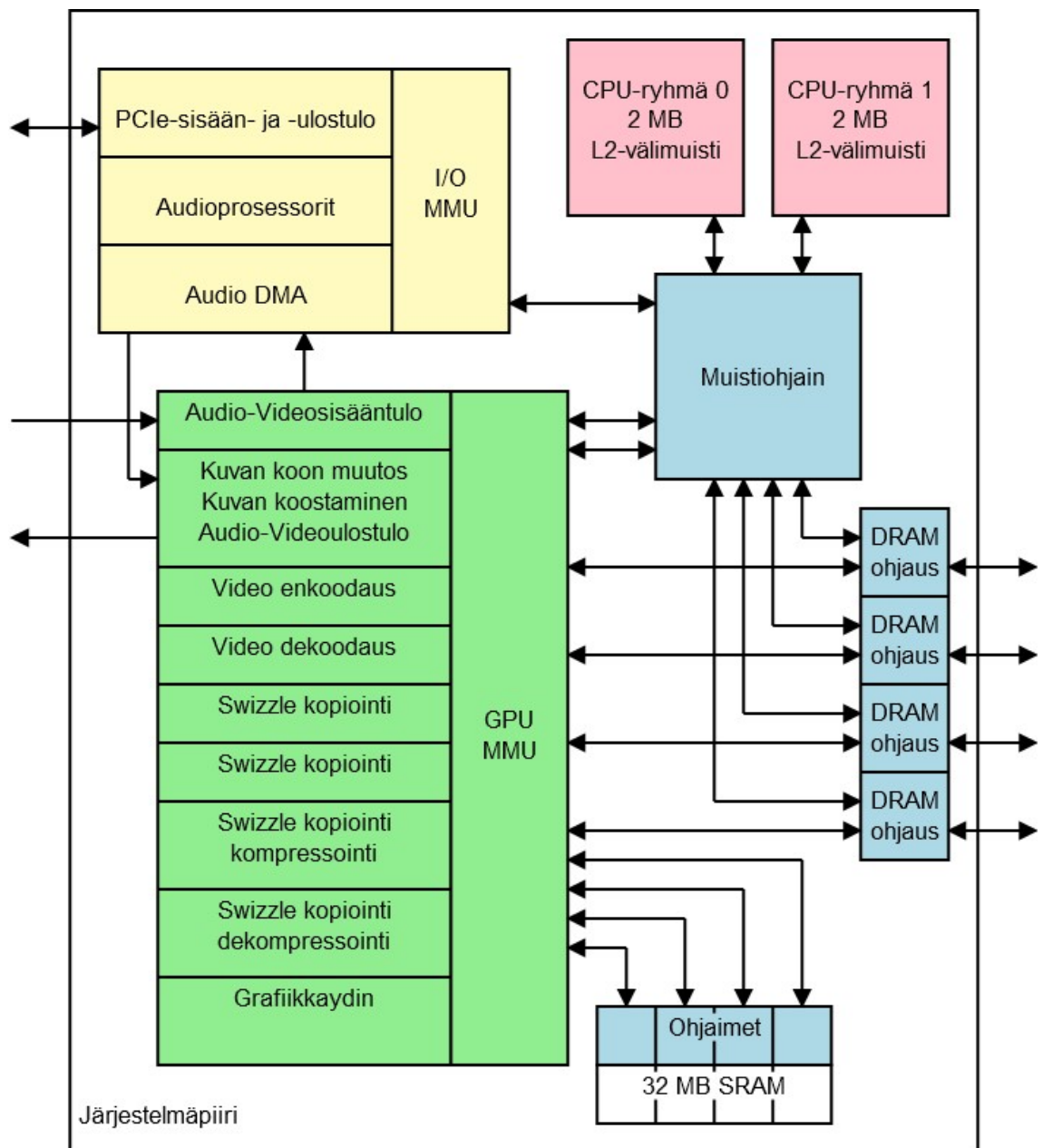


**Kuva 6.** Xbox Onen lohkokkaavio. Perustuu lähteeseen [22].

Järjestelmäpiiri sisältää kaksi neljän prosessoriytimen ryhmää. Prosessorien arkkitehtuuri on 64:n bitin x86. Jokaisella ytimellä on omaa L1-välimuistia ja lisäksi ryhmillä on 2 MB yhteistä L2-välimuistia. Prosessorien nopein mahdollinen kellotaajuus on 1,750 MHz. Muistiohjain toimii järjestelmässä piirin ulkoisen DRAM-muistin ja alijärjestelmien välimuistien ”yhtenäisyyspisteenä”. Esimerkiksi SRAM-muistien ja CPU-alijärjestelmien välimuistien välistä yhtenäisyyttä ei siis valvota. [22]

PCIe-sisään- ja -ulostulot, audioprosessorit ja Audio DMA jakavat sisään- ja ulostulojen (engl. Input/Output, I/O) muistin hallintayksikön (engl. Memory Management Unit, MMU). Audioprosessoriytimiä on kahdeksan: neljä DSP:tä ja neljä tiettyä funktiota varten olevaa ydintä. Yksi esimerkiksi muuntaa näytetaajuuksia ja toinen prosessoi suodatukseen ja äänen voimakkuuteen liittyviä asioita. Jokaisella DSP:llä on omaa välimuistia ja niillä on lisäksi yhteisenä 64 KB SRAM-muistia.

GPU-alijärjestelmällä on oma MMU. MMU voi käyttää piirin ulkopuolista DRAM-muistia Muistiohjaimen kautta, jolloin sen yhtenäisyys tarkistetaan, tai suoraan ilman tarkistusta. MMU:lla on myös käytössään SRAM-muistia. Sinne tallennettava data voidaan erikseen valita, jolloin se on nopeasti saatavilla. GPU sisältää kahdeksan itsenäistä funktionaalista lohkoa ja grafiikkalohkon. Funktionaaliset lohkot vähentävät grafiikkalohkon työtä suorittamalla esimerkiksi enkoodausta ja dekoodausta. Audio-video-ulostulo-lohko esimerkiksi muuntaa kuvien kokoa ja koostaa kuvan muistiin ja ulostuloon. Kuvassa 7 on järjestelmäpiirin lohkokaavio.



**Kuva 7.** Xbox Onen järjestelmäpiiri. Perustuu lähteeseen [22].

## 5. EDUT, HAASTEET JA TULEVAISUUS

Järjestelmän muoto määräytyy käyttökohteen prioriteettien ja vaatimuksien mukaan. Eri muotoisilla järjestelmillä on omat hyvät ja huonot puolensa, joten eri järjestelmämuodot eivät varsinaisesti kilpaile keskenään. Tässä luvussa esitellään järjestelmäpiirien etuja ja haasteita, sekä pohditaan niiden tulevaisuuden näkymiä.

Järjestelmäpiirin merkittäviä etuja ovat pieni koko, pieni tehon kulutus ja vähäisempi materiaalin tarve. Pienemmän materiaalitarpeen vuoksi ne ovat myös halpoja valmistaa, joskin niiden suunnittelu on pitkä ja kallis prosessi. [14][23]

Kaikkia lohkoja tai alijärjestelmiä ei ole kuitenkaan aina järkevää integroida samalle sirulle. Järjestelmäpiiri voisi esimerkiksi vaatia liian ison piisirun, jolloin kotelon kokoa jouduttaisiin kasvattamaan. Useamman pienemmän sirun muodostama SiP-järjestelmä voi siis mahdollistaa pinta-alaltaan pienemmän kotelon. Pienempien sirujen tuottamisessa voi myös syntyä vähemmän valmistusvikoja. Niitä saadaan tehtyä myös enemmän yhdestä piikiekosta (engl. wafer) [23].

Sekä uusien ominaisuuksien lisääminen että järjestelmän muuttaminen ovat SiP-järjestelmissä paljon helpompia kuin järjestelmäpiireissä. Koteloon voitaisiin esimerkiksi lisätä kokonaan uusi siru jo olemassa olevien lisäksi. Järjestelmäpiiriä ei voi muuttaa, vaan kaikki muutokset vaativat pitkän prosessin mukaan lukien kokonaan uuden sirun valmistuksen. [23] Transistorien koko alkaa lisäksi olla atomitasolla, joten niiden pienentäminen ei ole enää kauaa mahdollista.

Muun muassa näiden haasteiden takia monet mikropiirivalmistajat ovat siirtyneet järjestelmäpiireistä SiP-järjestelmiin. Moderneissa SiPeissä järjestelmä jaetaan usein IP-lohkon tai alijärjestelmän sisältämiin pikkusiruihin, 'chipletteihin', jotka yhdistetään interpooserilla (engl. Interposer). [24] Järjestelmäpiireistä voidaan kuitenkin uusilla innovaatioilla saada vielä nykyistä monimutkaisempia. Intel on onnistunut esimerkiksi pinoamaan transistoreja päällekkäin, jolloin levyille mahtuvien transistorien määrä voi käytännössä kaksinkertaistua [25].

## 6. YHTEENVETO

Järjestelmäpiiri on mikropiiri, eli piisiru, jolle on toteutettu kokonainen tai osittainen järjestelmä. Järjestelmäpiiri sisältää järjestelmän vaatimuksien mukaan ainakin prosessoreita, muistia, rajapintoja ja sisäisiä tiedonsiirtojärjestelmiä. Järjestelmäpiirin toimintaa ohjaa käyttöjärjestelmä.

Prosessoreita on monenlaisia. Järjestelmäpiirissä on yleensä vähintään yksi yleisprosessoriydin ja lisäksi erikoisempia, tiettyä tarkoitusta varten olevia prosessoreita. Näitä ovat esimerkiksi digitaaliset signaaliprosessorit ja grafiikkaprosessorit. Järjestelmäpiirit voivat sisältää paljon muistia: prosessorytimien rekistereitä, välimuistia, puskurimuistia ja mahdollisesti esimerkiksi ROM- tai Flash-muistia. Järjestelmäpiirit käyttävät usein myös sirun ulkoista muistia, esimerkiksi katoamatonta muistia. On sirun ulkoiseen maailmaan, esimerkiksi lisälaitteisiin tai toisiin siruihin, kiinnittyviä rajapintoja. Lisäksi sirun sisällä esimerkiksi tiedonsiirtojärjestelmiin ja eri alijärjestelmien yhdistämiseen tarvitaan rajapintoja. Rajapinnat noudattavat usein standardoituja protokollia. Tiedonsiirtojärjestelmistä yleisimpiä ovat väylät ja nykyään sisäiset tietoverkot. Lisäksi voidaan käyttää esimerkiksi ristikytkimiä.

Käyttöjärjestelmä on ikään kuin rajapinta käyttäjän ja laitteiston välillä. Kun käyttäjä haluaa laitteen tekevän jotain, tulkkaa käyttöjärjestelmä käskyn prosessorin ymmärtämään muotoon ja prosessorin tuottaman tuloksen käyttäjän ymmärtämään muotoon. Käyttöjärjestelmä hallitsee muun muassa muistia, eri prosesseja ja lisälaitteiden pyyntöjä.

Järjestelmäpiirit ovat aina pienempiä kuin vastaavat useamman sirun sisältävät järjestelmät. Pienen kokonsa vuoksi ne kuluttavat vähemmän sähköä ja ovat yleisiä etenkin akullisissa älylaitteissa, kuten älypuhelimissa. Järjestelmäpiiri voi olla myös osana suurempaa, esimerkiksi piirilevyllä koottua, järjestelmää. Esimerkiksi pelikonsoleissa voi olla piirilevyllä asennettu järjestelmäpiiri. Monia pöytätietokoneen prosessoreitakin voisi kutsua järjestelmäpiireiksi, mikäli määritelmä ei ole kovin tiukka.

Järjestelmäpiirien ja muiden mikropiirien kehittäminen monimutkaisemmiksi on vaikeaa. Transistorien kokoa ei voida juurikaan enää pienentää, eikä piilevyä ole järkevää kasvattaa. Transistoreita voidaan kuitenkin uusilla keksinnöillä ahtaa levyllä tiheämmin. Järjestelmäpiirien sijaan SiP-järjestelmien valmistaminen on kuitenkin monin tavoin taloudellisesti kannattavampaa, joten monet valmistajat ovat siirtyneet niihin.



# LÄHTEET

- [1] AN. Saxena, Invention of integrated circuits: untold important facts, 1st ed., New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2009, 564 p. Saatavissa: <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/6850>
- [2] A. Chen, RHY. Lo, Semiconductor Packaging: Materials Interaction and Reliability, 1st ed., Boca Raton, Fla: CRC Press, 2012, 208 p. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?pq-origsite=primo&docID=773636>
- [3] A. Butterfield, JE. Szymanski, A dictionary of electronics and electrical engineering, 5th ed., Oxford, England: Oxford University Press, 2018, 712 p. Saatavissa: <https://www-oxfordreference-com.libproxy.tuni.fi/display/10.1093/acref/9780198725725.001.0001/acref-9780198725725>
- [4] Computer History Museum, 1974: Digital Watch is First System-On-Chip Integrated Circuit. Saatavissa (viitattu 29.11.2023): <https://www.computerhistory.org/siliconengine/digital-watch-is-first-system-on-chip-integrated-circuit/>
- [5] R. Saleh et al., System-on-Chip: Reuse and Integration, in: Proceedings of the IEEE, vol. 94, no. 6, 2006, pp. 1050–1069. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/1652898>
- [6] R. Sinha et al., Correct-by-Construction Approaches for SoC Design, New York, NY: Springer New York, 2014. Saatavissa: <https://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-7864-5>
- [7] P. Van Der Wolf, R. Derwig, Modular SoC Integration with Subsystems: The Audio Subsystem Case, in: Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), EDA Consortium, 2013, pp. 157–162. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/6513491>
- [8] Comparative Study of RISC AND CISC Architectures, International Journal of Computer Applications Technology and Research, 2023, pp. 500–503. Saatavissa: <https://ijcat.com/archives/volume5/issue7/ijcatr05071015.pdf>
- [9] J. Nurmi, Processor design: System-on-Chip computing for ASICs and FPGAs. Dordrecht: Springer, 2007, 525 p. Saatavissa: <https://link.springer-com.libproxy.tuni.fi/book/10.1007/978-1-4020-5530-0>
- [10] A. McLean, ARM. Canadian journal of nursing informatics, vol. 15, no. 3, 2020. Saatavissa: <https://www.proquest.com/docview/2561883356?accountid=14242&parentSessionId=KThkt1RUEalXRqf%2FbN9tyCyp7UXjw9gfWpZ%2FekkWRu4%3D&pq-origsite=primo&sourcetype=Scholarly%20Journals>
- [11] MF. Jacome, G. De Veciana, Design challenges for new application specific processors, IEEE design & test of computers, vol. 17, no. 2, 2000, pp. 40–50. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/844333>

- [12] A. Waterman, et. al., The RISC-V Instruction Set Manual. Volume 1: User-Level ISA, Version 2.0, 2014. Saatavissa: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA605735>
- [13] W. Wolf et al., Multiprocessor System-on-Chip (MPSoC) Technology, IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems, vol. 27, no. 10, 2008, pp. 1701–1713. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/4627532>
- [14] VS. Chakravarthi, SR. Koteswar, System on Chip (SOC) architecture: a practical approach, Cham, Switzerland: Springer, 2023. Saatavissa: <https://web-p-ebsohost-com.libproxy.tuni.fi/ehost/detail/detail?vid=0&sid=18e43557-17ed-44fb-bc3d-99e33980c97d%40redis&bdata=JkF1dGhUeXBIPWNvb2tpZSxpcCx1aWQmc2l0ZT1laG9zdC1saXZlJnNjb3BIPXNpdGU%3d#AN=3662948&db=nlebk>
- [15] S. Yuvaraj et al., Performance Analysis Of SRAM and Dram in Low Power Application, in: E3S Web of Conferences, France, Les Ulis: EDP Sciences, vol. 399, 2023. Saatavissa: <https://www.proquest.com/docview/2894388401?accountid=14242&parentSessionId=Vqe25MBS%2FjElkXK9svtA3P%2BcjZTDfrwY4tJ7JgTzQzk%3D&pq-origsite=primo&sourcetype=Conference%20Papers%20&%20Proceedings>
- [16] D. Liu, Embedded DSP processor design: application specific instruction set processors, Amsterdam: Morgan Kaufmann/Elsevier, 2008, pp. 104–105. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=404237>
- [17] S. Pasricha, N. Dutt, On-Chip Communication Architectures - System on Chip Interconnect, 1st ed., Amsterdam: Morgan Kaufmann/Elsevier, 2008, 522 p. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/book/9780123738929/on-chip-communication-architectures>
- [18] R. Balasubramonian, TM. Pinkston, Buses and Crossbars, Encyclopedia of Parallel Computing, Boston, MA: Springer US, 2011, pp. 200–205. Saatavissa: [https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/referenceworkentry/10.1007/978-0-387-09766-4\\_476](https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/referenceworkentry/10.1007/978-0-387-09766-4_476)
- [19] R. Copetti, PlayStation 3 Architecture. Saatavissa (viitattu 10.11.2023): <https://www.copetti.org/writings/consoles/playstation-3/>
- [20] LDM. Mourelle et al., Multiprocessor system on chip with shared memory using crossbar topology, International journal of electronics, vol. 102, no. 1, 2015, pp. 107–126. Saatavissa: <https://www-tandfonline-com.libproxy.tuni.fi/doi/full/10.1080/00207217.2014.938314>
- [21] DP. Kothari, Embedded systems, New Delhi: New Age International, 2012. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?pq-origsite=primo&docID=3017432>
- [22] J. Sell, P. O'Connor, The Xbox One System on a Chip and Kinect Sensor, IEEE MICRO, vol. 34, no. 2, 2014, pp. 44–53. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/6756701>

- [23] K. Lyne, Cellular handset integration - SIP vs. SOC and best design practices for SIP, in: Proceedings of the Custom Integrated Circuits Conference, IEEE, 2005, pp. 765–770. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/1568781>
- [24] K. Larsen, M. Mota, What is a Multi-Die Chip Design?, 2021. Saatavissa (viitattu 7.12.2023): <https://www.synopsys.com/blogs/chip-design/what-is-multi-die-chip-design.html>
- [25] Intel Demonstrates Breakthroughs in Next-Generation Transistor Scaling for Future Nodes, 2023. Saatavissa (viitattu 14.12.2023): <https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/news/research-advancements-extend-moore-law.html#gs.41bxd6>