

Jouni Löytynoja

Nintendo Entertainment System

Laitteen toiminta

Opinnäytetyö

CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Toukokuu 2014

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö Centrian ammattikorkeakoulu Ylivieska	Aika Toukokuu 2014	Tekijä/tekijät Jouni Löytynoja
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma		
Työn nimi Nintendo Entertainment System, Laitteen toiminta		
Työn ohjaaja Hannu Puomio		Sivumäärä [31]
Työelämäohjaaja		
Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Nintendo Entertainment System laitetta ja tutustutaan tarkemmin sen sisäiseen toimintaan. Tavoitteena oli tarkastella ja tutkia erilaisten komponenttien välistä kommunikointia ja signaalien kulkua laitteen sisällä. Työssä pääkohtaisesti kuvataan komponenttien teknistä puolta ja kerrotaan sähköisten käskyjen toimituksesta. Samalla tarkastellaan, millainen on ohjainlaitteisto, ja tutustutaan lähemmin pelikasettien tekniikkaan.		
Asiasanat [6502, APU, CPU, MMC, NES, PPU, RAM, ROM]		

ABSTRACT

CENTRIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	Date May 2014	Author Jouni Löytynoja
Degree programme Electrical Engineering		
Name of thesis Nintendo Entertainment System, How the device works		
Instructor Hannu Puomio		Pages [31]
Supervisor		
The purpose of this thesis was to study Nintendo Entertainment System and examine how the device works inside. The main objective of this thesis was to study the communication between components and how information was transferred between them. The main focus of the work was on describing the hardware and the transmission of electrical commands. At the same time the study examined the controller hardware and explored game cartridge technology in more detail.		

Key words
[6502, APU, CPU, MMC, NES, PPU, RAM, ROM]

Käsitteiden Määrittely

CPU	Suoritin, joka vastaa käskyjen laskennasta
PPU	Näytönohjain, joka käsittelee kaiken graafisen tiedon
MMC	Muistinkäsittelykontrolleri
RAM	Käyttömuisti, joka on ohjelmien työmuisti
VRAM	Muisti, johon grafiikka tallennetaan
SPR-RAM	Sprite muisti, joka sisältää sprite attribuutit
ROM	Lukumuisti
BCD	Binäärikoodattudesimaalimuuttuja
DMA	Oikosiirto, jossa tiedostot kopioidaan koneen sisällä niiden käymättä suorittimella
I/O	Siirräntä, joka tarkoittaa tiedon siirtämistä
APU	Äänipiiri, joka tuottaa äänen

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO	1
2 NINTENDO ENTERTAINMENT SYSTEM	2
3 PÄÄPROSESSORI CPU 2A07	4
3.1 Tavujärjestys	6
3.2 Rekisterit	7
Ohjelmanalaskuri	7
Pinorekisteri	7
Akku	7
Indeksointirekisteri X	7
Indeksointirekisteri Y	8
Nolla sivu	8
3.3 Pääsuorittimen statusrekisteri	8
Carry binäärimuuttuja	8
Zero binäärimuuttuja	8
Interrupt disable	9
Decimal mode	9
Break command	9
Overflow flag	9
Negative flag	9
3.4 Keskeytykset	10
IRQ	10
NMI	10
Reset –painike	11
4 AUDIOYKSIKKÖ APU	12
5 GRAFIKKAYKSIKKÖ PPU 2C07	13
5.1 Grafiikkayksikön rekisterit	13
V –Blank	15
Direct Memory Access	15
Väripaletti	15
5.2 VRAM	15
5.3 BCD –luvut	16
5.4 Mallitaulu	16
5.5 Nimitaulu	17

5.6 Spritet	17
6 PELIKASETTI	19
UNROM	20
CNROM	20
MMC1	20
MMC3	20
ROM	20
7 PELIOHJAIN	21
8 YHTEENVETO	23
LÄHTEET	24

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä perehdyin Nintendo Entertainment System laitteeseen ja tutustun tarkemmin laitteiston sisäiseen toimintaan. Opinnäytetyön merkittävämpänä materiaalina on käytetty NESdoc dokumenttia ja nesdev.com sivustoa, jotka sisältävät paljon tietoa laitteiston toiminnasta.

Nintendo Entertainment System on Nintendon kehittämä konsoli, joka tuli markkinoille ensimmäisen kerran Euroopassa vuonna 1986. Konsolin mukana toimitettiin yksi peliohjain ja yksi peli.

Ohjelmien suorittamisesta vastaa laitteiston suoritin (Central Processing Unit, CPU) ja grafiikasta laskennasta ja esityksestä vastaa näytönohjain (Picture Processing Unit, PPU). Molemmissa piireissä on oma sisäinen muistinsa.

NES hyödyntää muistikartoitettua I/O rekisteriä, jonka avulla suoritin pystyy kommunikoimaan näytönohjaimen ja muiden sisääntulo laitteiden kanssa. Muistikartoitetun I/O tekniikka perustuu siihen, että dataa pystytään lähettämään tai sitä voidaan kirjoittaa tiettyyn muistipaikkaan laitteessa.

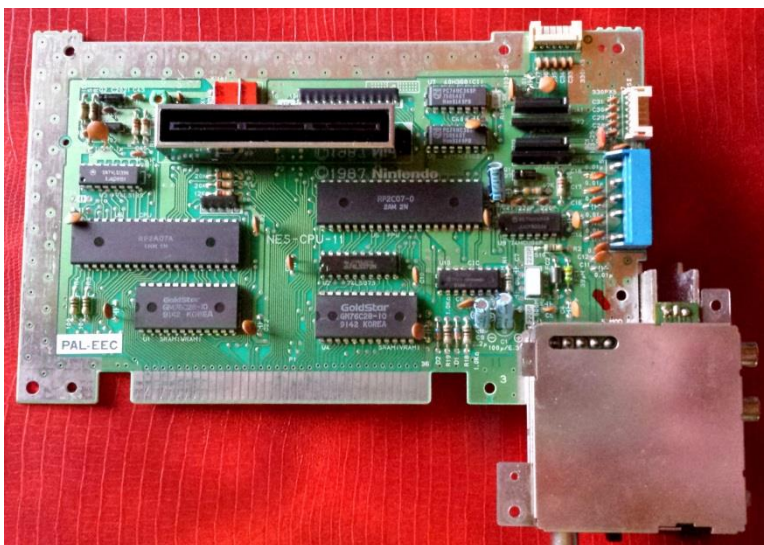
2 NINTENDO ENTERTAINMENT SYSTEM

Nintendo Entertainment System on Nintendon kehittämä pelikonsoli, joka tuli ensimmäistä kertaa markkinoille vuonna 1983 Japanissa. Eurooppaan se saapui vuonna 1987. Laitteen etupuolella ovat ohjainportit, pelikasettiluukku sekä power- ja reset- näppäimet. Takana sijaitsevat RF- liitin, kanavanvaihdos kytkin ja AC- virtalähteen liitin. Laitteen oikeassa sivussa ovat AV- portit.

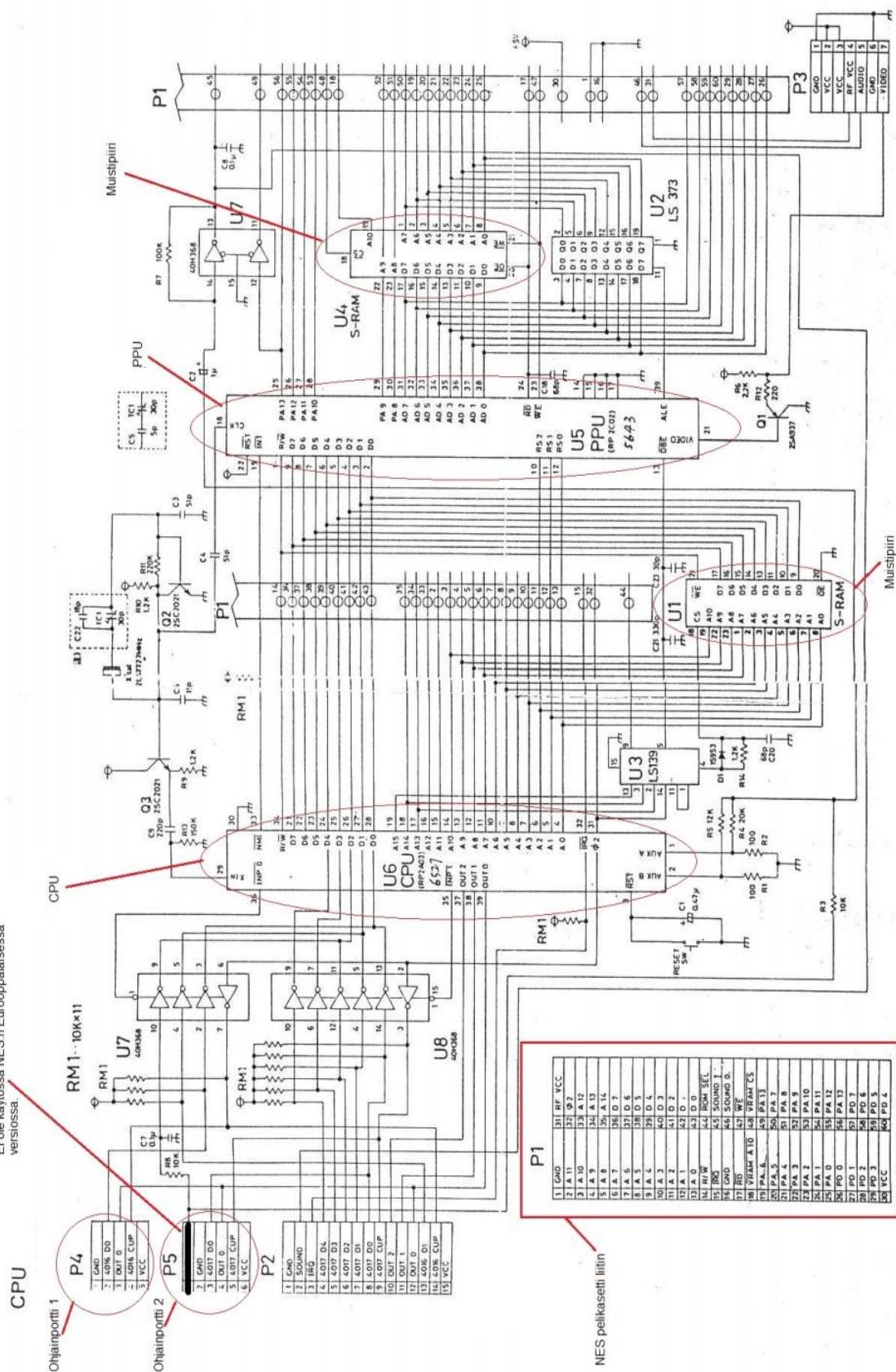


KUVIO 1. Nintendo Entertainment System

Laitteen emolevyllä sijaitsevat kaikki tärkeimmät komponentit. Seuraavasta kuvioista näkee, kuinka kaikki komponentit ja piirit on emolevyllä sijoiteltu. Kuvion oikeassa alalaidassa on RF- modulaattori.



KUVIO 2. Emolevy

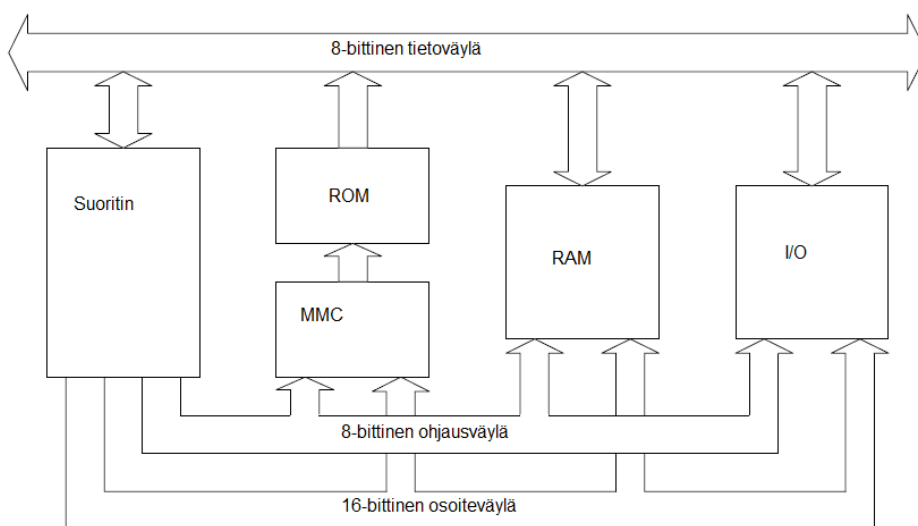


KUVIO 3. Emolevyn kytkentäkaavio (http://nesdev.com/Ntd_8bit.jpg)

3 PÄÄPROSESSORI CPU 2A07

Emolevyllä oleva pääprosessori käsittelee kaikki ohjelmat ja tämän lisäksi se pystyy käsittelemään myös ääntä. Suoritin on 8-bittinen ja se toimii 1,66Mhz taajuudella. Suoritin tallentaa osoitteet vähiten merkitsevä tavu ensin, mikä tekee suorittimesta little endian-suorittimen. Suoritin on nimeltään 6502 ja tarkempi nimi on 2A07. Samantyyppistä suoritinta on käytetty myös Commodore 64-kotitietokoneessa. (Hämäläinen 2005.)

Suoritin käyttää väyliä päästäkseen käsittelemään muistia. Konsolin muistiyksiköt on jaettu kolmeen eri paikkaan. Yksi sijaitsee pelikasetin ROM:a (Read Only Memory), yksi itse suorittimessa ja yksi I/O rekisterissä. Tietoväylää käytetään lukemaan tai kirjoittamaan haluttuun osoitteeseen. Ohjausväylää käytetään komponenttien informointiin siitä, että onko saapuva bitti luettava vai kirjoitettava. Osoiteväylää käytetään osoittamaan, minne tieto halutaan lähettää. (Diskin 2004.)

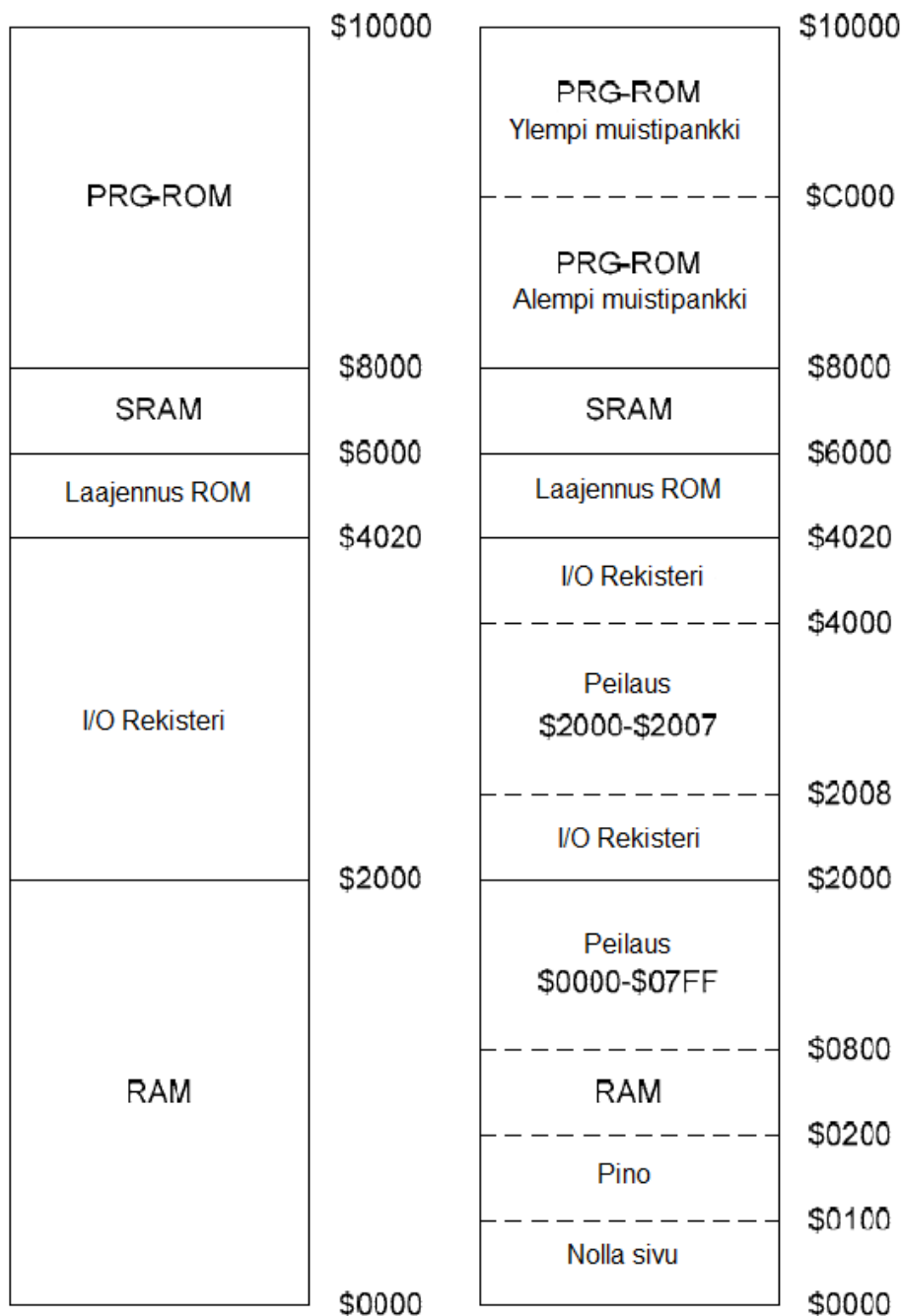


KUVIO 4. Suorittimen diagrammi (Diskin 2004.)

Suorittimella on 16-bittinen osoiteväylä, jonka ansiosta suoritin pystyy hyödyntämään 64kb muistia osoitteista \$0000-\$FFFF. Seuraavassa kuviossa näkyy suorittimen muistikartta. Kuviossa vasemmanpuoleinen palkki on yksinkertaistettu versio, jossa näkyy

kaikki pääosiot. Kuvion oikeanpuoleisessa palkissa osiot on jaettu vielä tarkemmin. (Diskin 2004.)

Muistipaikasta \$8000 eteenpäin on ohjelmointimuisti, mikä on varattuna pelikaseteille. Pelit, joilla on vain yksi 16kb muistipiiri, latautuvat molempiin \$8000 ja \$C000 ohjelmointimuisteihin. Tällä tavalla varmistetaan, että vektoritaso on sijoitettu oikeaan osoitteeseen. Pelit, joilla on kaksi 16kb ohjelmointimuistipiiriä, latautuvat erikseen muistipaikkoihin. Toinen muistipaikkaan \$8000 ja toinen muistipaikkaan \$C000. Pelit, joilla on enemmän kuin kaksi 16kb muistipiiriä, käyttävät muistikäsittelykontrolleria, joka määrittelee, mitkä piirit ladataan muistiin. Muistinkäsittelykontrolleri tarkkailee tiettyyn osoitteeseen kirjoitettavaa dataa. Kun tähän osoitteeseen halutaan kirjoittaa, tekee muistinkäsittely kontrolleri piirin vaihdoksen. Yksityiskohdat vaihtelevat eri muistinkäsittely kontrollerien välillä. (Diskin 2004.)



KUVIO 5. Suorittimen muistikartta (Diskin 2004.)

3.1 Tavujärjestys

Käsite tarkoittaa tietokoneen suorittimen tapaa käsitellä pidempiä kuin yhden tavun mittaisia kokonaisuuksia. Käytössä on kaksi tapaa, joilla kokonaisuudet voidaan esittää. Vähemmän merkityksellinen tavu ensin (little endian) ja merkitsevin tavu ensin (big endian). Tilannetta on havainnollistettu kuviossa kahdeksan. (Häsänen 2014.)

Vähiten merkitsevä ensin (little endian)																Merkitsevä tavu			
1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1				
Merkitsevin tavu ensin (big endian)																			
1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1				

KUVIO 6. Tavujärjestys

3.2 Rekisterit

6502 suorittimella on kaiken kaikkiaan 6 erilaista rekisteriä, joista kerrotaan seuraavissa kohdissa lyhyesti. (<http://nesdev.com/6502.txt>)

Ohjelmalaskuri

Ohjelmalaskuri on 16-bittinen rekisteri, joka pitää sisällään seuraavaksi suoritettavan käskyn osoitteen. Kun käskyt suoritetaan, päivitetään ohjelmalaskurin tiedot siirtymällä seuraavaan käskyyn. Haara- ja hyppykäskyt voivat vaikuttaa arvoon. (<http://nesdev.com/6502.txt>)

Pinorekisteri

Pinorekisteri sijaitsee muistipaikassa \$0100-\$01FF. Pino toimii ylhäältä alaspäin. Pino toimii niin, että tieto viedään pinoon päällimmäiseksi ja pinosta otetaan tieto päältä. Tätä menetelmää kutsutaan LIFO eli ”Last In First Out” – periaatteeksi, jossa tuoreimmat tiedot viipyvät keskimäärin vain lyhyen aikaa. (<http://nesdev.com/6502.txt>)

Akku

Suorittimen päärekisteriä kutsutaan akuksi. Sitä käytetään aritmeettisiin ja loogisiin operaatioihin. (Alander 2013.)

Indeksointirekisteri X

8-bittinen rekisteri, jota käytetään erilaisissa x-indeksointi osoitusmuodoissa. Rekisteriä voidaan käyttää pinorekisterin arvon hakemiseen tai sen asettamiseen. (<http://nesdev.com/6502.txt>)

Indeksointirekisteri Y

Y-indeksointia käytetään samankaltaisesti kuin x-rekisteriä. Poikkeuksena x-rekisteriin, y-rekisteri ei voi vaikuttaa pinorekisteriin. (<http://nesdev.com/6502.txt>)

Nolla sivu

Nolla sivu osoitteissa käytetään vain yhtä tavua operandeissa, mikä mahdollistaa paljon lyhyemmät käskyt kuin kahden operandin osoitusmuodoissa. Tämä mahdollistaa nopeamman käskyjen käsittelyn. Operandi toimii osoittimena nolla sivun osoitteille \$0000-\$00FF. (NES Hacker 2012.)

3.3 Pääsuorittimen Statusrekisteri

Suorittimen statusrekisteri sisältää yhden bitin binäärimuuttujia, jotka käskyn suorituksen jälkeen joko asetetaan tai tyhjennetään. (Diskin 2004.)

7	6	5	4	3	2	1	0
N	V		B	D	I	Z	C

KUVIO 7. Binäärimuuttujien statusrekisteri (Diskin 2004.)

Carry binäärimuuttuja (C)

Carry flag asetetaan, jos edellinen operaatio aiheutti ylivuodon bitin seitsemän jälkeen tai alivuodon bitin 0 jälkeen. Esimerkiksi asettamalla $255+1$ saataisiin, kantavabitti asetettuna, arvoksi nolla. Tämän ansiosta laite kykenee laskemaan kahdeksaa bittiä pidempiä numeroita. Tämä tapahtuu suorittamalla laskenta ensimmäiselle tavulle, tallennetaan carry ja sen jälkeen käytetään carry seuraavaa tavua suoritettaessa. (Diskin 2004.)

Zero binäärimuuttuja (Z)

Zero flag asetetaan, jos edellisen operaation tulos on nolla. (Diskin 2004.)

Interrupt disable (I)

Tällä binäärimuuttujalla voidaan estää järjestelmää vastaamasta IRQ:n (Interrupt ReQuest). (Diskin 2004.)

Decimal mode (D)

Eli BCD-koodin avulla 6502 suoritin siirretään BCD tilaan. Vaikka tämä binäärimuuttuja voidaan asettaa, jää se 6502 suorittimelta huomioimatta, koska se ei tue BCD tilaa. (Diskin 2004.)

Break Command (B)

Break-käskybitti asetetaan, kun BRK (Break) käsky on suoritettu, joka aiheuttaa IRQ:n. (Diskin 2004.)

Overflow flag (V)

Overflow binäärimuuttuja asetetaan, jos tulos tuottaa epäkelvon kahden komplementin tuloksen. Esimerkiksi jos lisätään positiivinen numero ja lopputuloksena on negatiivinen tulos: $64+64 = -128$. Kahden komplementti on tapa esittää negatiiviset luvut binäärimuodossa. Kaikkein merkitsevin bitti on etumerkki. Kahden komplementtia käytettäessä nolla on positiivinen ja yksi on negatiivinen. (Diskin 2004.)

Negative flag (N)

Tämä binäärimuuttuja asetetaan, jos tavun seitsemäs bitti on negatiivinen. Jokaisen tavun seitsemäs bitti edustaa tavun etumerkkiä, jossa nolla on positiivinen ja yksi on negatiivinen. (Diskin 2004.)

Seuraavassa kuviossa esitetään binäärimuuttujien statusrekisteri. Rekisterin viides bitti jää käyttämättä kokonaan.

3.4 Keskeytykset

Laitteiston toiminnan aikana tapahtuvia keskeytyksiä syntyy sekä laite- että ohjelmapuolella. Normaalisti pelien käynnistämisen estää pelikasettien pinnien epäpuhtaus. Myös ohjelmistokieleen syntyneet virheet voidaan laukaista pelien aikana. Keskeytykset estävät laitteen normaalin toiminnan. Keskeytykset voivat tapahtua kolmella eri tavalla, NMI, IRQ ja reset -nappi. Kun keskeytys tapahtuu, käytetään vektoritason ohjelmakoodia, joka on säilötty muistipaikkaan \$FFFA-\$FFFF. Ongelman sattua järjestelmä toimii seuraavanlaisesti: (Diskin 2004.)

1. Havaitsee tapahtuneen virheen
2. Tämän hetkisen ohjelman tyhjentäminen
3. Asettaa ohjelmalaskurin ja statusrekisterin pinoon
4. Interrupt disable binäärimuuttuja asetetaan päälle, jotta muilta ongelmilta vältyttäisiin
5. Ladataan ongelman aiheuttaneen rutiinin osoite ja ladataan se ohjelmalaskuriin
6. Ongelman aiheuttaneen rutiinin suorittaminen
7. Kun RTI (Return From Interrupt) komento on suoritettu, vedetään pinosta arvot ohjelmalaskurille ja statusrekisterille.
8. Jatketaan ohjelman tavallista suorittamista

IRQ

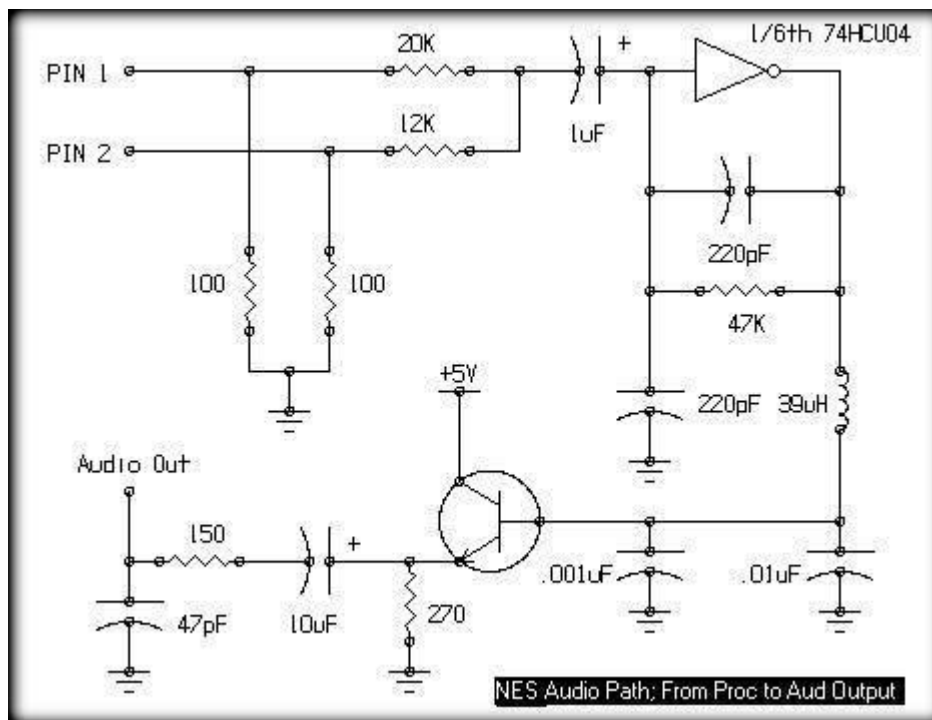
Interrupt request (IRQ) eli keskeytyspyyntö, jota ohjelmat käyttävät. Keskeytyspyyntö ilmenee, kun ohjelma laukaisee BRK komennon. Tämän seurauksena luetaan muistipaikka osoitteesta \$FFFA ja \$FFFF. Keskeytyspyynnöt jäävät suorittimelta huomiotta, jos interrupt disable binäärimuuttuja on asetettu. (Domingo & Bailey 2011.)

NMI

Non-maskable Interrupt on kriittinen keskeytys, jonka suoritin huomioi aina. Tällaisen keskeytyksen aiheuttaa PPU, kun kuvaruudun lopussa tapahtuu V-Blank. Näihin keskeytyksiin interrupt disable binäärimuuttuja ei vaikuta. Kun NMI -keskeytys tapahtuu, laitteisto latautuu osoitteista \$FFFA ja \$FFFB. Näiden keskeytysten syntyä voidaan estää,

4 AUDIOYKSIKKÖ APU

APU (Audio Processing Unit) sisältää 5 äänikanavaa, jonka rekisterit sijaitsevat muistipaikoissa \$4000-\$4013, \$4015 ja \$4017. Äänikanavia ovat DMC (Delta Modulation Unit), melugeneraattori, kolmiogeneraattori ja kaksi neliöaaltogeneraattoria. Kaikkien kanavien ulostulot yhdistetään epäsuoralla miksauksella. (NESDev 2013.)



KUVIO 9. Audioyksikön piirikaavio (NESDev 2013.)

5 GRAFIIKKAYKSIKKÖ PPU 2C07

PPU (Picture Processing Unit) vastaa grafiikan laskennasta. Värejä pystytään käyttämään yhtäaikaaisesti 16 ja käytettävissä on kaiken kaikkiaan 52 eri väriä. Piirillä on oma 16kb muistinsa (VRAM). PPU:lla on erillinen 256 tavun muistialue, johon tallennetaan sprite attribuutit. Tätä kutsutaan nimellä SPR-RAM. Sivun 14 kuvista 10 näkyy PPU:n muistikartta. (Diskin 2004)

CPU:n muistista paikkoja \$2006 ja \$2007 käytetään PPU:n muistin lukemiseen tai siihen kirjoittamiseen. Nämä toiminnot toteutetaan yleisimmin V-Blank:n aikana, jotta mahdollisilta virheiltä välttyttäisiin. Osoitteita käytetään samanaikaisesti kuvan tulostukseen, minkä vuoksi syntyvät häiriöt näkyisivät kuvaruudulla. (Diskin 2004)

PPU:n muisti käyttää 16-bittisiä osoitteita, mutta I/O rekisterit ovat vain 8-bittisiä. Tämä johtaa siihen, että kaksi kirjoitusta osoitteeseen \$2006 tarvitaan, jotta saadaan oikea osoite. Sen jälkeen tieto on luettavissa osoitteesta \$2007. Jokaisen \$2007 osoitteen kirjoituksen jälkeen osoite kasvaa joko yhdellä tai 32, jonka määrää bitti kaksi osoitteesta \$2000. (Diskin 2004.)

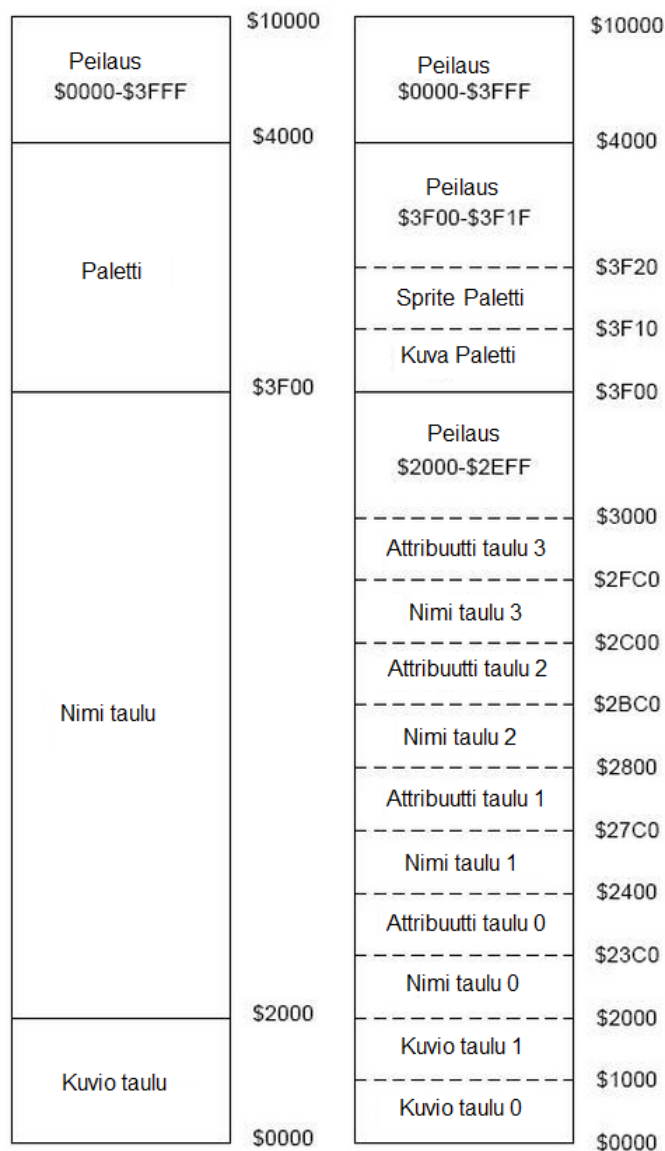
5.1 PPU rekisteri

PPU:n käyttämät rekisterit sijaitsevat osoitteessa \$2000-\$2007, jotka sijaitsevat päämuistissa. Nämä osoitteet peilataan aina joka kahdeksas bitti paikkaan \$2008-\$3FFF. Ylimääräinen rekisteri, joka sijaitsee paikassa \$4014, käytetään Direct Memory Access (DMA).

CPU ohjaa PPU:n toimintaa osoitteista \$2000 ja \$2001. Osoitteen \$2000 seitsemättä bittiä voidaan käyttää NMI:n lamauttamiseen. NES tukee sekä 8x8 että 8x16 spriteä. Asettamalla viides bitti osoitteesta \$2000, vaihtuvat spritet 8x16. Oletuksena tämä arvo on 8x8. Seuraavaksi luettavat tai kirjoitettavat osoitteet PPU:n muistista kasvaa jokaisella I/O lukukerralla. Arvo, jota kasvatetaan, säädetään asettamalla arvo bitti kahdelle osoitteesta \$2000. Arvolla yksi säädetään osoitetta horisontaalisesti ja arvolla 32 säädetään osoitetta

vertikaalisesti. Osoitteella \$2001 voidaan säätää taustaa ja spriteja. Asettamalla bitti kolme tyhjäksi, saadaan tausta piiloon. Jos bitti neljä tyhjennetään, saadaan spritet piiloon.

PPU:n statusrekisteri sijaitsee muistipaikassa \$2002, josta PPU ilmoittaa tilansa CPU:lle. PPU ilmoittaa V-Blank tilasta, kun se on asettanut bitin seitsemän. Bitit kuusi ja seitsemän liittyvät spriteihin ja ne kuvaillaan myöhemmin kohdassa väripaletti. Jos bitti neljä on tyhjä, ei PPU hyväksy kirjoituksia VRAM muistiin. Bitti seitsemän asetetaan nollaksi, kuten asetetaan osoitteet \$2005 ja \$2006, kun luku tapahtuu osoitteesta \$2002. (Diskin 2004)



KUVIO 10. PPU muistikartta (Diskin 2004)

V-Blank

V-Blank ilmoittaa, milloin PPU on päivittämässä ruutua tai se on luomassa vertikaalista väritöntä impulssia. Se sijaitsee PPU:n statusrekisterin seitsemännessä bitissä. Kun V-blank on asetettu, voidaan PPU:n muistiin päästä käsiksi osoitteesta \$2006-\$2007. (Fayzullin 2005.)

Direct Memory Access

Oikosiirto eli DMA tarkoittaa tiedostojen kopiointia koneen sisällä sen käymättä suorittimella. Tämä mahdollistaa suurtenkin tietomäärien siirtämisen nopeasti, kun ohjelmiston ei tarvitse sitä käsitellä. Kun kirjoitetaan osoitteeseen \$4014, voidaan koko sprite muisti kirjoittaa yhdellä komennolla DMA:n avulla. (Techterms.com)

Väripaletti

Oheisessa kuviossa on NES väripaletti, jossa on kaikkiaan 64 väriä, joista erilaisia on 54, ja koska vain 64 eri uniikkia arvoa tarvitaan, bitit kuusi ja seitsemän voidaan jättää huomiotta. Väripaletteja on kaksi, joista kukin pystyy näyttämään 16 eri väriä. Kuvapalettiin, joka näyttää mahdolliset väri vaihtoehdot taustakuvalle, ja spritepaletti, josta saadaan värit spriteille. Kuvapaletti sijaitsee muistipaikassa \$3F00-\$3F0F. Spritepaletti sijaitsee muistipaikassa \$3F10-\$3F1F. (<http://nesdev.com/nesgfx.txt>)



KUVIO 11. NES väripaletti (Napierski 2012.)

5.2 VRAM

VRAM (Video Random Access Memory) on muisti, joka on tarkoitettu grafiikan tallennukseen. Suoritin lukee ensin esitettävän kuvan, joka tämän jälkeen tallennetaan VRAM muistiin. VRAM piirit ovat kaksiporttisia, minkä ansiosta muistia pystytään lukemaan ja kirjoittamaan samanaikaisesti. (Techterms.com)

5.3 BCD -luvut

Binary Coded Decimal lukuja, eli binäärikoodattuja desimaalilukuja, käytetään esimerkiksi taskulaskimien näytöissä. Esitystapana BCD -luville käytetään neljää bittiä, jossa numerot 0-9 esitetään XXXX muodossa. Esimerkiksi desimaaliluku kaksi olisi oheisen taulukon mukaan BCD -lukuna 0010. Seuraavassa taulukossa näytetään, kuinka BCD -lukujen muunnokset menevät. (Lahtinen 2010.)

Desimaaliluku	BCD-luku
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
8	1000
9	1001
10	0001 0000
11	0001 0001
12	0001 0010

TAULUKKO 12. BCD -lukujen muunnokset (Lahtinen 2010.)

5.4 Mallitaulu

Osoitteissa \$0000 ja \$1000 sijaitsevat NES:n kaksi mallitaulua, jotka säilövät 8x8 pikselilaatat. Yleisimmin pelit tallentavat mallitaulut CHR-ROM piirille. Tämän puuttuessa tallennetaan mallitaulut RAM piirille. Kuvaa luotaessa käytetään kahta bittiä jokaista laatan pikseliä kohden tallennettaessa sitä mallitauluun. Loput kaksi bittiä otetaan attribuuttitaulusta. Seuraava kuvio selvittää tätä tapahtumaa. (Fayzullin 2005.)

Hahmo	Värit	Mallitaulukoiden sisältö			
...*....	00010000	00010000	\$10	+ ->	00000000 \$00
..O.O...	00202000	00000000	\$00		00101000 \$28
.#...#..	03000300	01000100	\$44		01000100 \$44
O.....O.	20000020	00000000	\$00		10000010 \$82
*****. ->	11111110 ->	11111110	\$FE		00000000 \$00
O.....O.	20000020	00000000	\$00		10000010 \$82
#.....#.	30000030	10000010	\$82		10000010 \$82
.....	00000000	00000000	\$00		00000000 \$00
+-----+					

KUVIO 13. Hahmon luonti (Fayzullin 2005.)

5.5 Nimitaulu

Nimitaulu sisältää hahmokoodit, jotka on järjestetty 30 riviin, joista jokainen on 32 tavua. Jokainen laatta on kooltaan 8x8 pikseliä, joten koko nimitaulu on kooltaan 256x240 pikseliä tai 32x30 laattaa. PPU tukee kaikkiaan neljää nimitaulua, jotka sijaitsevat osoitteissa \$2000, \$2400, \$2800 ja \$2C00, mutta koska NES sisältää niin vähän VRAM muistia, pelataan kaksi nimitaulua. (Diskin 2004.)

Jokaisella nimitaululla on oma attribuuttitaulunsa, jotka sisältävät kaksi ylintä bittiä laattojen väreistä. Jokainen tavu edustaa 4x4 laatan ryhmää ruudulla, joista luodaan 8x8 attribuuttitaulu. Seuraava kuvio esittää, kuinka jokainen 4x4 laatan ryhmä jaetaan neljään 2x2 neliön ryhmiin. (Diskin 2004.)

(0,0)	(1,0)	0	(2,0)	(3,0)	1
(0,1)	(1,1)		(2,1)	(3,1)	
+-----+					
(0,2)	(1,2)	2	(2,2)	(3,2)	3
(0,3)	(1,3)		(2,3)	(3,3)	

KUVIO 14. Nimitaulu (Fayzullin 2005.)

5.6 Spritet

Spritejä on kaiken kaikkiaan 64 kappaletta, joista jokainen käyttää neljä tavua SPR-RAM. Ne voivat olla kooltaan 8x8 pikseliä tai 8x16 pikseliä. Spritet ovat hahmoja, joita piirretään kuvaruudulle. Sprite attribuutit toimivat seuraavasti:

- Tavu 0 = Pitää sisällään vasemman ylälaidan Y-koordinaatit spritelle miinus yksi
- Tavu 1 = Spriten luettelonumero mallitaulussa
- Tavu 2 = Säilöö spritejen attribuutit
 - Bitit 0-1 = Värin tärkeimmät kaksi bittiä
 - Bitti 5 = Määrittää, onko spritellä suurempi arvo kuin taustalla
 - Bitti 6 = Määrittää spriten asennon horisontaalisesti
 - Bitti 7 = Määrittää spriten asennon vertikaalisesti

Spritet voidaan kirjoittaa tai lukea yksi kerrallaan. Ensin asetetaan osoite, joka on \$2003, sitten luetaan tai kirjoitetaan osoitteeseen \$2004. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää DMA operaatiota osoitteeseen \$4014, jolloin koko SPR-RAM kirjoitetaan.

Jokaiseen skannausviivan aikana järjestelmä tarkastelee, mikä sprite on skannattavalla alueella, jotta oikeat spritet tulevat piirretyksi päällimmäiseksi. Tärkein sprite 0 piirretään aina päällimmäiseksi ja on ensimmäinen sprite. Kun viimeinen kahdeksas sprite on saavutettu, ilmoittaa järjestelmä tästä asettamalla bitti viiden I/O rekisterin osoitteesta \$2002. (Diskin 2004.)

6 PELIKASETTI

NES pelit ovat harmaassa muovikotelossa, jonka sisällöstä yli puolet on tyhjää tilaa. Pelit tallennetaan piirilevyllä olevalle ROM piirille. Joissakin peleissä on mahdollisuus tallentaa pelit sisäiselle RAM piirille. Piirille syötetään virtaa pariston avulla.



KUVIO 15. Pelikasetti



KUVIO 16. Pelikasetin sisältö (Diskin 2004.)

Ensimmäisten NES pelien käyttämä muistin määrä oli alkujaan vähäistä. Kun pelit kehittyivät ja tulivat entistä laajemmiksi, vaadittiin suurempia muistimääriä. Suuremman muistimäärän saamiseksi oli NES:n pystyttävä vaihtamaan dataa sisään ja ulos muistipiiristä. Tähän keksittiin MMC-piiri (Memory Management Chip). Kun järjestelmä

vaatii pääsyä dataan, jota ei ole saatavilla käytössä olevalla muistipiirillä, osoittaa ohjelmisto tarpeen vaihtaa toiseen muistipiiriin, jolloin olemassa oleva muisti korvataan. Seuraavat MMC-piirit ovat yleisimpiä. (Diskin 2004.)

UNROM

UNROM-piiri oli ensimmäinen piiri, joka salli muistinvaihdoksen. Piirillä pystytään vain PRG-ROM piirin vaihdoksiin. Maksimimäärä vaihdettavia PRG-ROM piirejä saa olla kahdeksan. (Diskin 2004.)

CNROM

CNROM sallii CHR-ROM piirien vaihdoksen, muttei PRG-ROM piirien. Tämän takia pystytään luomaan hienompia graafisia ulkoasuja peleille, muttei laajempaa maailmaa. (Diskin 2004.)

MMC1

MMC1 on kaikista yleisin MMC-piiri. Sen avulla on mahdollista laajentaa sekä PRG-ROM:a että CHR-ROM:a. Piirin avulla pystytään myös tallentamaan pelejä ja se mahdollistaa myös nimitaulun peilauksen. Piirillä pystytään hyödyntämään PRG-ROM piirejä maksimissaan kahdeksaa. (Diskin 2004.)

MMC3

Piirillä pystytään laajentamaan sekä PRG-ROM:a että CHR-ROM:a. MMC3 piirillä oli mahdollista valikoivaan ruudun selaukseen, jolloin osa ruudusta pysyy paikoillaan muun kuvan liikkuessa. MMC3 mahdollistaa kaikkiaan 32 PRG-ROM piirin käytön maksimissaan. (Diskin 2004.)

ROM

Lukumuisti on niin sanottu pysyväismuisti, joka sisältää laitekohtaisia pysyviä tietoja. ROM:n sisältämät tiedot eivät häviä virran katkaisun jälkeen. ROM muistia voidaan ainoastaan lukea. PROM (Programmable ROM) on ROM piiri, jolle voi kirjoittaa tietoa yhden kerran. (Lahtonen & Heinonen.)

7 PELIOHJAIN

Pelejä ohjattiin konsolin mukana toimitetulla ohjaimella, jossa on kaiken kaikkiaan kahdeksan painiketta. Ensimmäisestä kuviosta näkee, kuinka näppäimet on sijoiteltu.



KUVIO 17. Peliohjain

Toisesta kuviosta näkee, millainen on ohjaimen piirilevy. Piirilevyn toisella puolella on näppäinten kontaktipinnat. Näppäinten ja kontaktipintojen välissä on näppäinmattoja, joissa on sisällä pieniä metallilevyjä. Näppäintä painettaessa levy tulee kosketuksiin piirilevyn kontaktipinnan kanssa, mikä sulkee piirin. Tämä tieto välittyy suorittimelle, jolloin suoritin osaa tehdä oikean toiminnon. Toiminto määräytyy pelin mukaisesti. (Tyson 2000.)



KUVIO 18. Ohjaimen sisältä, josta näkee vaihtorekisteripiirin



KUVIO 19. Ohjaimen kontaktipinnat ja kuminäppäimet

Ohjainta luetaan osoitteesta \$4016 ja kirjoitetaan osoitteisiin \$4016 ja \$4017. Näppäinten luku tapahtuu seuraavassa järjestyksessä: A, B, Select, Start, Up, Down, Left, Right. Jokaisen näppäimen tila raportoidaan 8-bittisenä.

Piirilevyllä on 8-bittinen parallel-to-serial vaihdosrekisteripiiri(4021), jonka voi nähdä kuviosta 16. Piiri käyttää sarja sisääntuloa, jolloin vaihdosrekisterin ulostulo ketjutetaan seuraavaan. Ketjun loppupäässä sarja sisääntulo voidaan linkittää maahan tai vcc:n. Tämä määrää ulostulon tilan, kun kaikki bitit on vaihdettu pois. Eurooppalaisessa NES-konsolissa tämä on sidottuna maahan, jolloin vaihdosrekisteri tuottaa nollan. Tämä muunnetaan invertterillä ykköseksi jokaisen luvun jälkeen, kun ensimmäiset kahdeksan on luettu. (NESDev 2014.)

8 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin tarkemmin Nintendo Entertainment System –laitteen tekniikkaan ja sen sisällä tapahtuvaan komponenttien väliseen kommunikointiin. Opinnäytetyössä tutustuttiin myös laitteistossa käytettävään ohjaimen tekniikkaan ja pelikasettien sisäiseen tekniikkaan.

Nintendo Entertainment System on laitteena varsin monimutkainen laite. Laitteen eri komponentit välinen kommunikointi tapahtuu I/O rekisterin kautta. Tämä tekniikka mahdollistaa datan siirron tai sen kirjoittamisen tiettyyn muistipaikkaan. Pääsuoritin käyttää tätä tekniikkaa kommunikoidakseen muiden laitteiden, kuten grafiikkayksikön, kanssa.

Ohjaimen sisäinen rakenne on varsin yksinkertainen. Vaihdosrekisteripiiri tarkkailee, milloin mitään nappia painetaan. Kun nappi painetaan pohjaan, tulee näppäinmaton metallilevy kosketuksiin piirilevyn kontaktipinnan kanssa, jolloin piiri sulkeutuu. Tämä tieto välittyy vaihdosrekisteripiirille, joka sittemmin kulkeutuu pääsuorittimelle.

Pelien sisäinen tallennuskapasiteetti on kasvanut, kun pelien maailmat ovat kasvaneet. Alkujaan Super Mario Bros. 1 –pelin tapaisissa peleissä riitti vähäinen määrä muistia. Pelien kehittyessä jouduttiin kehittämään muistinkäsittelykontrolleri, joka mahdollisti muistipiirin vaihdoksen, jolloin pystyttiin luomaan laajempia maailmoja peleihin.

Vaikkakin lähteitä on paljon, oli laitteiston tekniikkaa sisältäviä sivustoja vaikea löytää. Oman haasteensa työn tekemiselle antoi se, että suurin osa sivustoista oli englannin kielellä. Opinnäytetyön tekeminen oli hyvin mielenkiintoista ja se antoi paljon intohimoiselle peliharrastajalle.

LÄHTEET

NESDev 2014. WWW-dokumentti. Saatavissa:

http://wiki.nesdev.com/w/index.php/Standard_controller. Luetu 17.4.2014.

Jeff Tyson 2000. WWW-dokumentti. Saatavissa:

<http://electronics.howstuffworks.com/playstation3.htm>. Luetu 18.4.2014.

Tommi Lahtonen & Petri Heinonen. WWW-dokumentti. Saatavissa:

<http://appro.mit.jyu.fi/doc/tietokone/index4.html#TOC0>. Luetu 20.4.2014.

Marat Fayzullin 2005. Nintendo Entertainment System Architecture. WWW-dokumentti.

Saatavissa: <http://fms.komkon.org/EMUL8/NES.html#LABF>. Luetu 21.4.2014.

Jouni Lahtinen 2010. GX Works 2 –ohjelman käyttöohje ohjelmoitavan logiikan ohjaamiseen. Tampereen ammattikorkeakoulu. WWW-dokumentti. Saatavissa:

http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/13721/Lahtinen_Jouni.pdf?sequence=1,%20s-25. Luetu 23.4.2014.

Techterms.com 2014. WWW-dokumentti. Saatavissa:

<http://www.techterms.com/definition/vram>. Luetu 20.4.2014.

Steve Napierski 2012. The NES that never was... WWW-dokumentti. Saatavissa:

<http://www.duelinganalog.com/article/the-nes-that-never-was/>. Luetu 22.4.2014.

Techterms.com 2014. WWW-dokumentti. Saatavissa:

<http://www.techterms.com/definition/dma>. Luetu 20.4.2014.

NESDev. How NES Graphics work The Basics. WWW-dokumentti. Saatavissa:

<http://nesdev.com/nesgfx.txt>. Luetu 25.4.2014.

Patric Diskin 2004. Nintendo Entertainment System Documentation. WWW-dokumentti.

Saatavissa: <http://nesdev.com/NESDoc.pdf>. Luetu 27.4.2014.

Marat Fayzullin 2005. PPU Memory. WWW-dokumentti. Saatavissa:

<http://fms.komkon.org/EMUL8/NES.html#LABG>. Luetu 26.4.2014.

NESDev 2013. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://wiki.nesdev.com/w/index.php/APU>.

Luetu 25.4.2014.

Harri Järvinen & Risto Westman 2005. Keskeytykset DOS ja Windows. Lappeenrannan

Teknillinen Yliopisto. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www2.it.lut.fi/kurssit/04-05/010539000/downloads/doswinkeskeytykset.pdf>. Luetu 18.4.2014.

Don Domingo & Laura Bailey 2011. Red Hat Enterprise Linux 6. WWW-dokumentti.

Saatavissa: https://access.redhat.com/site/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_Linux/6/html/Performance_Tuning_Guide/s-cpu-irq.html.

Luetu 19.4.2014.

NES Hacker 2012. WWW-dokumentti. Saatavissa:
http://www.thealmightyguru.com/Games/Hacking/Wiki/index.php?title=Zero-Page_Indexed_Addressing. Luettu 19.4.2014.

Jarmo T. Alander 2013. Keskusyksikkö eli suoritin. WWW-dokumentti. Saatavissa:
<http://lipas.uwasa.fi/~TAU/AUTO1010/slides.php?File=6400CPU.txt&Page=-1>. Luettu 15.4.2014.

Aku Häsänen 2014. Reaaliaikaisten internet-pelien verkkotekniikasta. Tampereen yliopisto informaatiotieteiden laitos, tietojenkäsittelyn pro-gradu- tutkielma. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://tampub.uta.fi/bitstream/handle/10024/95046/GRADU-1394549711.pdf?sequence=1>. Luettu 14.4.2014.

Elias Hämäläinen 2005. Tietokoneen rakenne: harjoitustyö. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://issuu.com/elias/docs/tietokoneen_rakenne. Luettu 14.4.2014.