



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Commodore floppy meghajtó megvalósítása FPGA-val

MSC ÖNÁLLÓ LABORATÓRIUM 2.

Készítette

Weisz Pál

Konzulens

Horváth Kristóf

2022. december 17.

Feladatkiírás

A hallgató feladata, hogy egy Commodore számítógépekhez készült floppy meghajtó egységet valósítson meg FPGA segítségével. A munka magába foglalja az eredeti hardver megismerését és annak áttervezését úgy, hogy azt az interfészáramköröket leszámítva meg lehessen valósítani modern technológiák felhasználásával. Cél még, hogy kész rendszer képes legyen valódi (azaz nem virtuális) floppy lemezek kezelésére egy PC floppy meghajtó felhasználásával.

Tartalomjegyzék

1. Bevezető	3
1.1. A feladat összefoglalása	3
1.2. Rendszerterv	4
1.3. Protokollok	5
1.3.1. A Commodore IEEE-488 soros busz	5
1.3.2. Floppy meghajtó	6
2. A hardver	8
2.1. Bemutatom a fejlesztőkártyát	8
2.2. Az interfészpanel	9
3. Digitális tervezés	10
3.1. Modulok	10
3.2. CPU	12
3.3. CIA	13
3.4. FDC	14
3.5. Órajel-generátor	14
3.6. Memóriák	15
4. Tesztelés, hibajavítás	16
4.1. Az interfész panel tesztje	16
4.2. Verilog-modulok	16
4.3. Debugolás	16
4.4. Valódi környezetben	16
4.5. Emulátor	16
Irodalomjegyzék	18
Függelék	19
F.1. Az eredeti 1581-es floppy meghajtó kapcsolási rajza	19
F.2. Az interfészkártya kapcsolási rajza	24
F.3. Az interfészkártya NYÁK-terve	27

1. fejezet

Bevezető

1.1. A feladat összefoglalása

Cél tehát, hogy egy szabványos IBM PC floppy meghajtót felhasználva FPGA segítségével egy olyan hajlékonylemez-es egységet valósítsak meg, mely Commodore-számítógépekkel kompatibilis és a hozzájuk való floppy-lemezeket írni-olvasni képes.

Az önálló laboratórium alatt végzett munkám során egy Commodore 1581 típusú, 3,5"-es lemezmeghajtó prototípusát készítettem el ily módon. A kitűzött cél megvalósításához felkutattam az eredeti meghajtó kapcsolási rajzát, szervizkönyvét, elolvastam a konstrukcióban alkalmazott alkatrészek adatlapjait. Megismerkedtem a Commodore számítógépes környezetben alkalmazott perifériák, interfészek szabványaival, működésével is. Ezek alapján, valamint az általam használt FPGA-fejlesztőpanel és PC-s meghajtó jelszintjeinek, tulajdonságainak figyelembe vételével megterveztem egy interfészpanelt, mely az alaplap vezérlő logikát implementáló FPGA-t illeszti a fizikai környezetéhez, vagyis a meghajtó hardveregységéhez és a számítógéppel való kapcsolatot biztosító soros porthoz.

Az eredeti 1581-es vezérlését egy komplett mikroprocesszoros rendszer látja el, melyet - funkcionalitását tekintve - egy az egyben az FPGA-n szintetizálva valósítottam meg. Az ehhez szükséges verilog-modulok egy részét korábbi projektekből emeltem át, a hiányzóakat pedig én magam implementáltam.

A rendszert először modulonként, majd különböző integráltsági szinteken is teszteltem, először a Xilinx ISE szimulációs környezetében, majd pedig logikai analízátorral a kész hardveren is. Az FPGA-n megvalósított rendszer alkalmas az eredeti 1581-es firmware-ének futtatására, mely bináris állomány formájában rendelkezésemre állt. A kezdeti sikeres integrációs tesztek követően processzor belső állapotát nagyon körülményessé vált vizsgálni, és mivel a rendszer egy ponton érzékelhetően hibára futott, másféle megközelítéssel próbálkoztam: írtam egy emulátorprogramot, mely segítségével sikerült meghatároznom és kijavítanom a készként átvett CPU implementáció hibáját.

További tesztek követően számos egyéb hibát derítettem fel és javítottam ki. A félév végeztével sikerül elérnem, hogy a meghajtó képes legyen hibamentesen kommunikálni soros porton keresztül a valódi Commodore számítógéppel.

1.2. Rendszerterv

Első lépés az irodalomkutatás volt, valamint az elinduláshoz szükséges információk összegyűjtése. Az eredeti meghajtó áttervezéséhez nélkülözhetetlen megismerni, hogyan működik, milyen részekből épül fel az eszköz - ebben nagy segítségemre voltak a nyilvánosan elérhető dokumentációk, kézikönyvek.[9] Azért esett a választás épp a Commodore 1581 típusú floppy meghajtóra, mert ez ma is többé-kevésbé elérhető kis méretű 3.5"-es hajlékonylemezeket használ, belső felépítését tekintve pedig jól elkülöníthető részekre dekomponálható, szemben például a 1541-essel.



1.1. ábra. A Commodore 1581 típusú hajlékonylemezes meghajtó

A Commodore 1581-es meghajtó tulajdonképpen maga is egy "számítógép", hiszen a kiszolgálni kívánt számítógéppel való kommunikációt, és magát a lemezkezelést egy, a meghajtó alaplaján található diszkrét integrált áramkörtől felépített processzoros rendszer végzi. A 1581-es és a számítógép közötti kommunikáció egy Commodore IEEE-488 szabványú soros buszon zajlik.[17] A floppy lemezhez fizikailag egy belső író-olvasó egység segítségével lehetséges hozzáférni, mely egyébként szabványos, Amiga számítógépeknél is használatos ún. Shugart-interfészsel rendelkezik.[4] Ezzel szemben az általam megtervezett rendszerben a floppy író-olvasó egységet egy mai modern asztali IBM PC-vel kompatibilis floppy meghajtóval helyettesítettem, mivel ilyen berendezéseket ma sem lehetetlen beszerezni, szemben az eredeti konstrukcióban alkalmazott típusúval.

A szervizkönyv mellékleteként megtalálható a meghajtó eredeti kapcsolási rajza is, melyet a további tervezéshez az alábbi részekre bontottam:

- *Soros port*: a soros busz meghajtását és leválasztását szolgáló áramkörti elemek
- *Floppy interfész*: a PC floppy meghajtó illesztéséhez szükséges bufferek, inverterek
- *FPGA*: az egész processzoros környezetet és minden más integrált áramkörti elemet a szükséges kiegészítő logikákkal együtt ezen fogok megvalósítani

Így jól elkülöníthetővé váltak azok a részek, melyekhez kiegészítő áramkör fizikai elkészítése szükséges az egyes protokollok tulajdonságainak ismeretében.

1.3. Protokollok

Következő feladat annak az előkészítése volt, hogy az itt ismeretett protokollokon szabványos módon történjen kommunikáció az alaplap és a PC floppy-meghajtó, valamint a számítógép között.

1.3.1. A Commodore IEEE-488 soros busz

A 8-bites Commodore asztali számítógépek az ún. Commodore IEEE-488 soros busz (vagy röviden IEC-busz) segítségével kommunikálnak a hozzájuk kapcsolt főbb perifériákkal, jellemzően nyomtatókkal vagy mágneses adathordozó alapú háttértárakkal. Eredetileg az IEEE-488 szabványból alakították ki a költségek csökkentése végett (innen az elnevezése). Ez alapvetően egy fél-duplex szinkron soros adatátviteli interfész, viszont számos speciális megoldást alkalmaz a szabvány pl. handshake vagy a buszra kapcsolódó eszközök jelenlét-érzékelésének megvalósítására.[17]

1.1. táblázat. Az IEC-busz jelei

Pin	Jelölés	Funkció
1	$\overline{\text{SRQ}}$	Service Request In
2	GND	Ground
3	$\overline{\text{ATN}}$	Serial Attention In/Out
4	$\overline{\text{CLK}}$	Serial Clock In/Out
5	$\overline{\text{DATA}}$	Serial Data In/out
6	$\overline{\text{RESET}}$	Serial Reset

Alacsony-aktív, nyitott kollektoros meghajtású vonalak ezek, 5V-os logikai jelszinttel. A számítógépez csatlakoztatott eszközöknek saját maguknak kell gondoskodniuk a tápellátásukról. Az egyes adatvonalakat mindkét végükön felhúzó ellenállások zárják le, a buszt nyitott kollektoros inverterek hajtják meg. Csatlakozó gyanánt 6 lábú DIN dugót alkalmaznak.

A soros buszra több eszköz is csatlakozhat, ezeket fizikailag daisy-chainelve lehetséges összekapcsolni egymással és a számítógéppel, emiatt szokásosan két csatlakozót építenek ki az egyes perifériákra. Az egyes eszközöket azonosítójuk alapján képes megcímezni a számítógép. Az adott azonosító DIP kapcsolók segítségével hardveresen konfigurálható, mely lemezmeghajtók esetén tipikusan 8 és 11 közötti egész értéket vehet fel.

A kommunikáció egységei 8-bites adatcsomagok, melyekben a legkisebb helyi értékű bit található az első helyen. A mintavételezés szinkron módon, a $\overline{\text{CLK}}$ jel felfutó élére történik. Ezek az adatcsomagok lehetnek vezérlő parancsok, vagy adatok. Vezérlő parancsokkal lehet a busz használatára vagy elengedésére utasítani az egyes perifériákat, vagy épp valamilyen irányú adatátvitelt kezdeményezni a megcímezett eszközzel. A vezérlő parancsok a buszon az $\overline{\text{ATN}}$ jel alacsony szintje mellett érkeznek mégpedig kizárólag a számítógép felől, innen lehet tudni, hogy nem egy általános adat átvitele történik.

A $\overline{\text{CLK}}$ és $\overline{\text{DATA}}$ vonalak kétirányúak, ezeket a floppy meghajtó is lehúzhatja. Ilyen módon jelzi a számítógépnek, hogy készen áll az adat fogadására vagy küldésére, de például bizonyos időkorlással kiegészített nyugtázásra is használja ezt a módszert a szabvány.[5]

1.3.2. Floppy meghajtó

A feladat egyik nehézségét az adta, hogy a 1581-es meghajtó eredetileg másfajta floppy író-olvasót tartalmazott, mint amilyeneket az IBM-kompatibilis személyi számítógépekben használtak, használnak. Ez nem is a működési módjukban, sokkal inkább az IBM PC és a Shugart interfészek közti különbségben nyilvánul meg:[13]

1.2. táblázat. IBM/PC és Shugart interfésszel rendelkező hajlékonylemez-meghajtók lábkiosztása

IBM/PC			Shugart		
Pin	Jelölés	Funkció	Pin	Jelölés	Funkció
2	$\overline{\text{REDWC}}$	Density Select	2	DCD	Disk Change Detect
4	n/c	Reserved	4	key	no pin in this position
6	n/c	Reserved	6	$\overline{\text{DS3}}$	Drive Select 3
8	$\overline{\text{INDEX}}$	Index	8	$\overline{\text{INDEX}}$	Index
10	$\overline{\text{MOTEA}}$	Motor Enable A	10	$\overline{\text{DS0}}$	Drive Select 0
12	$\overline{\text{DRVSB}}$	Drive Select B	12	$\overline{\text{DS1}}$	Drive Select 1
14	$\overline{\text{DRVSA}}$	Drive Select A	14	$\overline{\text{DS2}}$	Drive Select 2
16	$\overline{\text{MOTEB}}$	Motor Enable B	16	$\overline{\text{MTRON}}$	Motor On
18	$\overline{\text{DIR}}$	Direction	18	$\overline{\text{DIR}}$	Direction
20	$\overline{\text{STEP}}$	Step	20	$\overline{\text{STEP}}$	Step
22	$\overline{\text{WDATE}}$	Write Data	22	$\overline{\text{WDATE}}$	Write Data
24	$\overline{\text{WGATE}}$	Write Enable	24	$\overline{\text{WGATE}}$	Write Enable
26	$\overline{\text{TRK00}}$	Track 0	26	$\overline{\text{TRK00}}$	Track 0
28	$\overline{\text{WPT}}$	Write Protect	28	$\overline{\text{WPT}}$	Write Protect
30	$\overline{\text{RDATA}}$	Read Data	30	$\overline{\text{RDATA}}$	Read Data
32	$\overline{\text{SIDE1}}$	Head Select	32	$\overline{\text{SIDE1}}$	Side Select
34	$\overline{\text{DSKCHG}}$	Disk Change	34	RDY	Ready

Nem tüntettem fel a táblázatban, de mindenképp érdemes megjegyezni, hogy minden páratlan számú lábat a földre kötnék. Mivel a gyakorlatban szalagkábelben szokás továbbítani ezeket a jeleket, zavarvédelem szempontjából előnyös, ha az áthallás csökkentése végett nem jelvezetékek haladnak közvetlenül egymás mellett, hanem felváltva követik egymást a földvezetékekkel.

Hasonlóan a soros porthoz, mindkét fajta interfész esetén is 5V-os, open kollektoros meghajtású alacsony aktív jelekkel lehet találkozni, viszont nem előírás, hogy az eszköz tartalmazza a felhúzó ellenállásokat. Ezek PC esetén a számítógépben, jelen megoldásban pedig a 1581-es meghajtó alaplapján találhatók.

Megfigyelhető, hogy a jelek többsége megfeleltethető egymásnak.[1] PC esetén egy szalagkábelre két meghajtó kapcsolható, ezeket az A és B kiválasztójelek segítségével lehet megkülönböztetni egymástól, míg a Shugart interfészen akár 4 különböző eszköz is kiválasztható a $\overline{\text{DS}}$ jelek megfelelőjének földre húzásával.

Szembetűnő különbség ezen kívül még, hogy a Disk Change jel máshol van kivezetve a két esetben, a Density Select valamint a Ready jeleknek pedig nincs megfelelője a másik csatlakozón.

A Density Select jellel kapcsolatban egymásnak ellentmondó információkat találtam kutatásom során, valahol kimenetként, máshol bemenetként használják, de mindenképp a meghajtóban használt floppy lemez adatsűrűségével hozható kapcsolatba. Ennek oka, hogy fizikailag máshogy kell kezelni egy SD, egy DD vagy egy HD hajlékonylemezt.

Korszerű meghajtók ezt az adathordozó tokján található kivágás segítségével érzékelik, régi fajta (és főleg 5.25"-es) meghajtók esetén viszont ezzel a Density Select jellel írható elő, milyen adatsebességgel dolgozzon a meghajtó vezérlője. Az általam használt PC floppy meghajtóban például ez a jel nincs is kivezetve.[12]

A Ready jel előállításához mindenképp kiegészítő logika megtervezése kellett, mivel a 1581-es kapcsolási rajza szerint szükség van rá. Az eredeti író-olvasó egység adatlapja alapján ez a jel akkor aktív, ha van lemez a meghajtóban és emellett megfelelő sebességgel forog a motor.[2] Ha forog a motor, fordulatonként egy impulzus mérhető az Index jelen. Az általam használt PC-s meghajtóban ez az impulzussorozat kapuzva van, és csak akkor kerül ki a kimenetre, miután a motor elérte a megfelelő fordulatszámot. Ennek a felhasználásával előállítható a Ready jel, hiszen hardveresen biztosított, hogy a motor csak akkor forog, ha van a meghajtóban lemez.

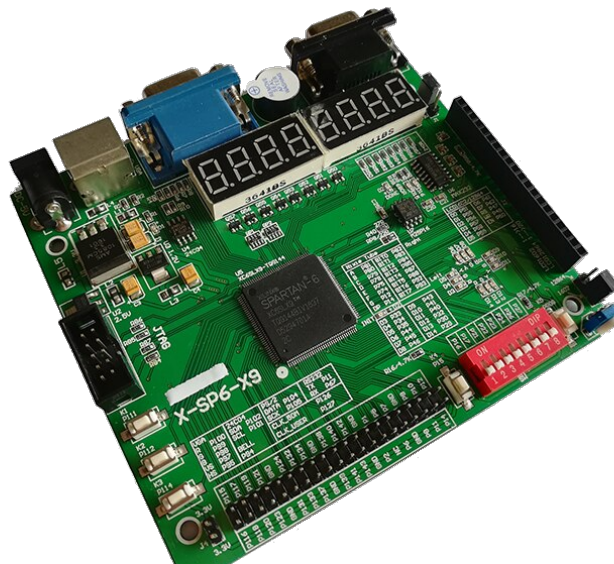
A Commodore 1581-es meghajtó két oldalú, 800kB kapacitású kétszeres adatsűrűségű (double-density, DD) lemezek kezelésére alkalmas. Az így formázott lemez oldalanként 80 sávot és 10 szektort tartalmaz fizikailag, a biteket MFM kódolással tárolja a rendszer. Mivel az így formázott lemez nem IBM kompatibilis, így a mai asztali számítógépekkel nem értelmezhető a tartalma. A feladatban használt PC floppy meghajtó reményeim szerint mégis tudja kezelni, hiszen az valójában csak alacsony szintű hozzáférést biztosít a lemezhez, a rajta lévő adatok feldolgozásáról az alaplapi processzoros rendszer gondoskodik.

2. fejezet

A hardver

2.1. Bemutatom a fejlesztőkártyát

A feladat megoldásához egy X-SP6-X9 jelzésű Xilinx Spartan 6 alapú FPGA-fejlesztőkártya állt rendelkezésemre. Számos szabadon felhasználható és széleskörűen konfigurálható IO kivezetésén kívül előnye, hogy tartalmazza az általános célú fejlesztésekhez szükséges perifériákat, nyomógombokat, kapcsolókat, LED-eket. Külső JTAG programozóval tölthető fel rá a bitstream, de egy 16MB-os SPI flash is helyet kapott, melyről szintén elvégezhető a konfiguráció. 5V-os tápellátással rendelkezik, viszont az IO lábak 3.3V-nak megfelelő CMOS logikai jelszinttel dolgoznak.



2.1. ábra. A megoldáshoz használt FPGA-fejlesztőpanel

Mivel a soros busz és az író-olvasó egységként szolgáló PC floppy meghajtó eltérő logikai jelszinteket használ, mint az FPGA, így mindenképp szükséges a valóságban realizálni egy szintillesztő áramkört. Ezt egy interfészpanel formájában terveztem és valósítottam meg.

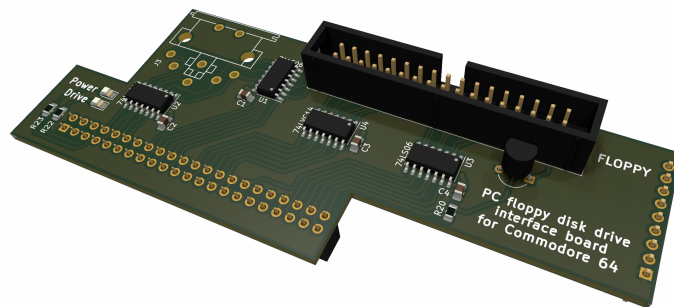
2.2. Az interfészpanel

Már a 1581-es kapcsolási rajzában is látható, hogy mind a soros port, mind a lemez-meghajtó esetén is meghajtófokozatokat, nyitott kollektoros buffereket vagy invertereket alkalmaztak, 1k Ω -os felhúzó ellenállásokkal kiegészítve. Ezeket az áramköri elemeket a szintillesztésre való tekintettel a valóságban is realizálnom kellett.

Az interfészpanel tervezésekor az eredeti terveknek megfelelő tulajdonságú integrált áramköri alkatrészeket választottam azzal a kritériummal kiegészítve, hogy a szükséges jelszint-illesztési feladatot is képesek legyenek ellátni. Gazdaságossági okokból, valamint az áramkör egyszerűsítése végett az összes kimeneti vonalat 74LS06 típusú nyitott kollektoros inverterrel, a bemeneteket 5V toleráns bemenetű 74LVC14 típusú CMOS inverterrel kapcsoltam a rendszerhez. Ebből a megoldásból ugyan az következik, hogy az eredeti kapcsolással ellentétben néhány jel így invertáltan áll rendelkezésre, de ezek visszaállítását az FPGA-n megvalósított rendszer implementálásakor figyelembe vettem.

Az illesztő áramkör kapcsolási rajza nem bonyolult, külön vettem rajta a soros porthoz és a floppy meghajtóhoz tartozó részeket, valamint helyet kapott rajta az eredeti 1581-es előlapján megtalálható két státuszjelző LED is. Az eredeti kapcsolási rajznak megfelelően a soros port kétirányú jeleit is különválasztottam.

Az áramkörnek két tápfeszültségre van szüksége, egy 3.3V-osra, és egy 5V-osra, mindkettőt az FPGA-fejlesztőpanelről biztosítottam. Ehhez rendelkezésemre állt a fejlesztőpanel kapcsolási rajza és lábkiosztása. A nyomtatott áramkört úgy terveztem meg, hogy közvetlenül illeszkedjen az FPGA-panel tüksoraira. A huzalozás és a lábkiosztás megtervezésekor törekedtem arra, hogy a lehető legkevesebb kereszteződéssel elférjenek egymás mellett a vezetősávok. Ergonómiai szempontokat is figyelembe vettem a tervezés során, hogy az FPGA-kártya kialakításának megfelelően maradjon hely a programozó csatlakozó, a meghajtó azonosítójának beállítására használt DIP kapcsolók és a RESET gomb számára, és ne takarja el az interfészpanel ezeket a felületeket, miközben rajta van. Hasonlóképp helyeztem el a floppy meghajtó csatlakoztatására szolgáló IDC csatlakozót és a soros port számára a 6 lábú Tuchel aljzatot. A mechanikai kialakításkor nehézséget okozott, hogy nem volt pontos műszaki rajz az FPGA-panel oldalsó tüksorának pontos helyéről, így azt becslés alapján tudtam csak pozicionálni, ez elég pontosan sikerült is.



2.2. ábra. A saját tervezésű interfészpanel 3D terve

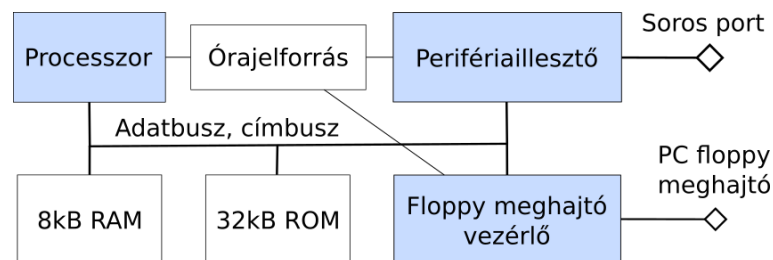
3. fejezet

Digitális tervezés

Az FPGA-ra a Xilinx ISE 14.3-as verziójú fejlesztői környezetének segítségével fejlesztettem a rendszert. Ez nem egy kimondottan korszerű ám szerencsére hibamentes szoftver. Azért ezt használtam mégis, mert a Spartan 6-os FPGA-kat a szoftver korszerű alternatívája (a Vivado) már nem támogatja. A leírófájlokat, modulokat és testbench-eket Verilog nyelven készítettem el, viszont helyenként szükséges volt VHDL-ben implementált részekkel is foglalkoznom később a hibakeresés során.

3.1. Modulok

A 1581-es meghajtót egy MOS 6502 típusú processzoron futó operációs rendszer irányítja. Az alaplapon megtalálható a firmware bináris állományát tartalmazó 32kB ROM és 8kB RAM. A perifériák illesztését egy 8520-as komplex interfész adapter (CIA), a lemez író-olvasó egység vezérlését egy WD1772 típusú floppy meghajtó vezérlő (FDC) integrált áramkör végzi. Ezek képezik a főbb logikai egységeket, így kézenfekvő volt modulba szervezni őket, és így beilleszteni a projektbe.



3.1. ábra. Az FPGA-n megvalósított rendszer sematikus rajza

Korábbi projektek eredményét felhasználva rendelkezésemre álltak a CPU, a CIA és az FDC implementációi, ezeket átvettem, esetenként továbbfejlesztettem munkám során. Az órajel-generátort, a RAM és ROM modulokat én készítettem el.

A rendszer 8-bites adatbuszt és 16 bites címbuszt használ, 2MHz-es rendszerórajelről jár minden a floppy vezérlő kivételével, mely 8MHz-es órajelet igényel. Ezen órajelek előállítása egy 4-bites számlálóval történt eredetileg, egy 16MHz-es oszcillátor jelének

leosztásával. Érdekesség, hogy az ehhez alkalmazott 74LS93-as IC konfigurálható bit-számú: 3 vagy 4 bites számlálót is lehetséges kialakítani a segítségével. Egy ebben a témában végzett korábbi próbálkozás során a nem megfelelő konfiguráció jelenthetett hibalehetőséget.

Az eredeti kapcsolásban az egyes logikai egységekhez tartozó címdekódolást és engedélyező jelek előállítását kombinációs hálózattal kiegészített multiplexerek végzik, a memóriatérkép az alábbiak szerint alakul:

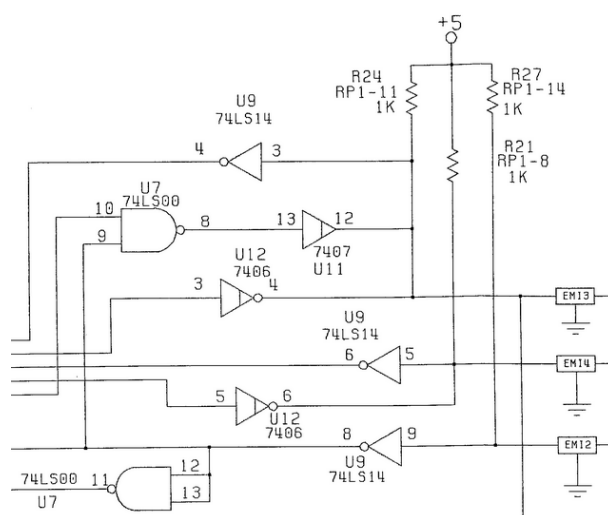
3.1. táblázat. Az 1581-es meghajtó processzoros rendszerének címtartomány-kiosztása

Eszköz	Címtartomány
RAM	0x0000 - 0x1FFF
CIA	0x4000 - 0x400F
FDC	0x6000 - 0x6003
ROM	0x8000 - 0xFFFF

A címdekóder leírása verilogban:

```
assign CSn_RAM = addr[15:13] != 3'b000;
assign CSn_ROM = !(rw && addr[15]);
assign CSn_CIA = addr[15:13] != 3'b010;
assign CSn_FDC = !(addr[15:13] == 3'b011);
```

Mivel 1581-es meghajtóban gyakran használnak nyitott kollektoros meghajtású logikai elemeket, így kézenfekvő, hogy a felhasznált logikai kapuk számának csökkentése végett huzalozott módon valósítsanak meg bizonyos logikai függvényeket. Erre az FPGA-n technológiai okokból nincs lehetőség, ezért a huzalozott logikájú részeket átterveztem, hogy logikai kapukkal is le lehessen azokat írni.



3.2. ábra. Részlet az eredeti meghajtó kapcsolási rajzából.

Huzalozott logikai kapcsolat megvalósítása a soros busz $\overline{\text{DATA}}$ vezetékén, és a neki megfelelő verilog-leírás:

```
assign DATA_OUT = (~SP_OUT) || DATA_OUT_AUX || (ATN_IN && ATN_ACK);
```

Bizonyos VHDL modulok implementációjában előfordult, hogy kétirányúként definiáltak jeleket, például az adatbusz esetén. Ennek használata nem szerencsés, mert bár a valóságban tényleg kétirányú ugyanaz a vonal, az FPGA-ra két különböző irányú jelvezetékként szintetizálódik, ezért a könnyebb érthetőség és a többi modullal való kompatibilitás kedvéért már a leírófájlban szétbontottam két különböző vezetékre. Hasonlóképp előfordult ennek a fordítottja is, amikor az eredeti kapcsolás tartalmazott kétirányú adatforgalom szétválasztására használt multiplexert, melyet így el lehetett hagyni az implementációban.

3.2. CPU

A 6502-es CPU egy NMOS technológiával készült 8-bites processzor. Adatbusza 8 bites, címbusza 16 bites, így összesen 64kB memóriát képes megcímezni. Kevés belső regisztere van: egy akkumulátor (A), két indexregiszter (X és Y) melyek különböző címzési módokhoz, címetolásra is felhasználhatók, egy stack pointer (S) egy állapotregiszter (P), és egy 16-bites programszámláló (PC). A memória (virtuálisan) 256-bájtos blokkokba, lapokba van szervezve.

A stack hardveresen rögzített helyen, az első lapon, a 0x0100-as memóriacímtől kezdődik, és 0x01FF-ig tart. Külön figyelmet érdemel még a 0x00-s memórialap (zero-page) mely gyorsabban hozzáférhető, ha a parancsok dedikált címzési módú verziójával érjük el az ott tárolt változókat. Az állapotregiszter bitjei flag-ek, logikai és aritmetikai műveletek eredményeivel kapcsolatos tulajdonságokat jeleznek, a szokásos előjel- (N), nulla- (Z), átvitel- (C) és túlcscordulás (V) biteken kívül tartalmaz egy BCD aritmetikát (D) és megszakításokat engedélyező bitet (I), valamint egy szoftveres megszakításkérés jelzésére szolgáló flag-et is (B). A reset vektor a 0xFFFFC 0xFFFFD címeken található, a megszakításvektor pedig a 0xFFFFE 0xFFFFF címeken - ezekről a helyekről töltődik be a programszámláló értéke a processzor indulásakor, illetve megszakításkérés esetén.[14]

Az eredeti 6502-es processzor a ϕ_0 bemeneti órajelből két másik, fázisban egymáshoz képest 90°-kal eltolt és egymással nem átlapolódó órajelet állít elő a rendszer többi része számára. Ezek közül a ϕ_2 -t használja csak az eredeti terv alapján a meghajtó, mely az eredeti órajellel megegyező fázisú.

A processzor implementációját többször lecseréltem a fejlesztés során. Először az eredeti MOS 6502-es processzor tranzisztor-szintű felépítése alapján generált verilog-modullal próbálkoztam.[8] Sajnos az automatikusan generált leírófájl monolitikus felépítésű és gyakorlatilag átláthatatlan, így mivel eleinte nem sikerült működésre bírni és a belső jelek vizsgálata nagyon körülményesnek bizonyult, hamar lecseréltem az Arlet Ottens-féle verilog-6502 core-ra.[11] Ez az implementáció az eredetivel ellentétben az FPGA-n való megvalósíthatóság és a szemléletes működés kedvéért mikroprogramozott architektúrájú, a benne található állapotgép ráadásul aszinkron működésű. Ebből adódóan egy speciális, impulzusszerű órajelet igényel, hogy a processzormag mikro-utasításai biztosan le tudjanak futni az adott órajelciklusban. Technológiai megfontolásból FPGA-s rendszerekben alapvetően szinkron logikai hálózatokat érdemes megvalósítani, így konzulensem

javaslatára elvettem ezt a megoldást is, és a fejlesztők körében gyakran alkalmazott T-65 nevű 6502 processzormag-implementációt használtam a továbbiakban.[6]

Ez a modul több kimenettel rendelkezik, mint a 6502-es processzor, a nem használt jeleket bekötetlenül hagytam. Amelyik bemeneteket a kapcsolási rajz szerint az 5V-os tápfeszültségre kell felhúzni, azokat egész egyszerűen logikai magas szintre kötöttem.

3.3. CIA

A 8520-as komplex interfész adapter (Complex Interface Adapter, CIA) IC két 8-bites IO portot, két 16-bites időzítőt, egy valós idejű órát és egy dedikált soros port perifériát tartalmaz. A 1581-es alaplapján a CIA az egyedüli periféria, mely képes megszakításokat kérni, ha valamelyik időzítője lejár vagy valamilyen esemény következik be a nagy sebességű soros porton. A megszakításkérés egyenként engedélyezhető, valamint a megszakítás forrása is lekérdezhető a CIA megszakításvezérlő regisztere segítségével. Hasonlóképp konfigurálhatók az időzítők, a valós idejű óra, és a két IO port paraméterei. A CIA A és B jelű IO portjaira csatlakoznak az eszköz azonosítóját kiválasztó DIP kapcsolók, a visszajelző LED-ek, valamint a soros busz jelei, irány szerint különválasztva. A csak bemenetként használt lábakra visszavezettem ugyanazon láb kimeneti irányú jelének értékét, hogy egy esetleges visszaolvasáskor jelen legyen rajta a valóságnak megfelelő logikai érték.

Érdekesség, hogy az IEC-busz jeleit az általános IO lábak segítségével is meg tudja hajtani, sőt alapvetően a 1581-es meghajtó ezt is használja az egyébként nagyobb sebességű dedikált soros periféria helyett. Ennek történelmi okai vannak, a Commodore 64-es számítógép egy tervezési hibából adódóan nem képes olyan gyorsan feldolgozni a nagysebességű soros porttal küldött adatot, ahogyan az ki tudná szolgálni. Később ezt javították, és a Commodore 128-as számítógép esetén már a soros busz $\overline{\text{SRQ}}$ jele szolgált (az eredeti specifikációtól eltérően soros órajelként) a gyors átviteli protokoll használatának kiegészítésére.[3]

A valós idejű órát nem az eredeti rendeltetési céljának megfelelően használja a meghajtó, viszont később a firmware-rel való ismerkedés során egy érdekes tervezési megoldásra derült fény: az alaplapot kétféle különböző típusú floppy vezérlővel is fel lehet szerelni, ez lehet WD1770 vagy WD1772. Az alaplapon egy átkötés beültetésével vagy elhagyásával lehet jelezni a firmware számára, melyik típusú IC szerepel a kapcsolatban, hiszen a két esetben eltérő rutinokat kell meghívnia a processzornak.

Mivel az összes általános célú IO láb foglalt már, a valós idejű órát léptető TOD láb vagy egy ellenálláson keresztül 5V-ra, vagy pedig a 2MHz-es rendszerórajelre kapcsolódik az átkötés jelenlététől függően. Szoftveresen ez úgy ellenőrizhető, hogy ha egy adott idejű szoftveres várakozás után megváltozik a valós idejű óra regiszterének értéke akkor ott az átkötés, egyébként nincs.

A 8520-as CIA implementációját a C64-MiSTer elnevezésű projektből vettem át. Ennek lényege, hogy egy egész Commodore 64 számítógép hardverleírását tartalmazza a MiSTer nevű nyílt forráskódú hardverkörnyezetre, melyen többféle retro számítógép és játékkonzol modern technológiákkal (FPGA) való megvalósítására terveztek [10]

3.4. FDC

A hajlékonylemezes meghajtó vezérlő (Floppy Disk Controller, FDC) egy dedikált integrált áramkör, mely a floppy író-olvasó modul vezérlőjeleit állítja elő közvetlenül, valamint ez fogadja a lemezmeghajtóról érkező nyers adatokat, visszajelzéseket is. Működését tekintve egy állapotgépet valósít meg, mely szoftver oldalról magas szintű parancsok regiszterbe írásával vezérelhető.[16]

A CIA-hoz hasonló módon, ehhez az IC-hez tartozó intellectual property-t is egy kész projektből emeltem át. A Suska projekt alapvetése, hogy egy Atari ST számítógép minden alkatrészét egyesével kicserélte a fejlesztő az annak megfelelő FPGA-s realizációjára.[7]

A kapcsolási rajz alapján érdekes módon vannak a floppy meghajtónak bizonyos jelei, melyek nem, vagy nem kizárólagosan az FDC chiphez vezetnek, ilyenek például a motorvezérlés vagy az írásvédettség ellenőrzésére szolgáló vonalak. Az is előfordul, hogy egyes kimenetek egyáltalán nincsenek is bekötve az IC-n, ezeket az hardverkonfiguráció során is bekötetlenül hagytam. Abban sincs egységesség, hogy a floppy meghajtó vezérlőjelei közül melyik használ ponált és melyik negált logikájú digitális jeleket. Ez különös figyelmet igényelt a a top modul huzalozásakor, mivel az interfészpanelen minden jelet invertálnak a szintillesztő áramkörök.

A PC-s floppy meghajtó és a meghajtóvezérlő IC közt némi kiegészítő logikára volt szükség a READY jel előállításához. A Shugart-kiosztású meghajtók specifikációja alapján sejtettem, hogy a READY jel előállítható egy SR-flipflop segítségével a motor engedélyező és az INDEX jeleket bemenetként felhasználva. Ezt alátámasztotta az a tény, hogy léteznek kifejezetten arra a célra készült adapter-áramkörök, hogy PC-s floppy meghajtókat illesztenek Shugart-interfészt használó számítógépes rendszerbe.[15] Ezeken a kapcsolásokon egy 4 darab 2 bemenetű NOR kaput tartalmazó chip található, melynek működését a szabadon elérhető NYÁK-tervek alapján visszafejtettem, és kideült, hogy valóban egy SR-flipflopot és két invertert valósít meg.

A READY jelet előállító logikai függvény verilog-implementációja:

```
reg RDY;
initial RDY <= 1'b1;
always @(posedge clk) begin
    if(!rstn)
        RDY <= 1'b1;
    else begin
        case({MOTEB, INDEX}) //motor on? index?
            2'b00: RDY <= 1'b1;
            2'b01: RDY <= 1'b1;
            2'b10: RDY <= RDY;
            2'b11: RDY <= 1'b0;
        endcase
    end
end
```

3.5. Órajel-generátor

Az többi modulhoz szükséges órajeleket ezzel a modullal állítottam elő. 16MHz-es rendszerórajelre feltételeztem, melyet a floppy vezérlő egy az egyben megkapott, a többi modul számára az ebből leosztott 2MHz-es ϕ_2 jelet adtam. A processzor implementációjából kihagyták az eredeti órajel-kondicionáló részt, mely a ϕ_0 -ból állítja elő a kétfázisú rendszerórajelre, de erre egyrészt nincs is szükség ebben a megoldásban, másrészt úgyszólván az órajel-generátor modul a felelős az összes szükséges órajel előállításáért.

A frekvenciaosztást egy egyszerű bináris számláló végzi. Mivel az Arlet-féle processzor-implementációhoz aszimmetrikus órajelre volt szükség, így a 2MHz-es órajel-impulzusokat komparálással állítottam elő, és ezen a későbbiekben sem módosítottam, mivel jól működött.

A CIA implementációjának érdekes módon szüksége van egy invertált ϕ_2 jelre is, ezt nem az órajel-modulban állítottam elő, hanem a bekötésnél vezettem rá az negált órajelre.

A floppy vezérlő modul specifikációja szigorúan előírja a 16MHz-es órajel használatát, mivel az FPGA-n való megvalósítás miatt belső állapotgépezetnek léptetéséhez és a vezérlésbe iktatott időzítések pontos megvalósításához nagyobb frekvenciára van szükség, mint az eredeti hardver esetén.

3.6. Memóriák

A meghajtó eredeti kapcsolásában aszinkron RAM és ROM chipet alkalmaztak, az adat- és címbusz meghajtását engedélyező jeleket címdekóderrel állítják elő. Én szinkron logikai vezérléssel biztosítottam a hozzáférést mindkétfajta memóriához. A RAM és a ROM is bájtos szervezésű, azaz egy memóriacímmel egy bájt összes bitjéhez hozzá lehet férni. Ha olvassuk a memóriákat, akkor ezek a bitek kikerülnek az adatbuszra, ha írjuk a RAM-ot, bekerül az adatbuszon lévő bájt az adott című helyre.

Megvalósítás szempontjából tulajdonképpen mindkét memória egy-egy nagy regisztertömb. Arra kell külön figyelni, hogy amikor nincsenek megcímezve, ne hajtás meg adatbuszt. Ez verilogban a Z logikai állapot használatával valósítható meg.

Mivel a ROM tárolja a 1581-es firmware-ét vagyis a CPU-n futó programot, így azt a rendszer konfigurálásakor bele kell azt valahogyan tölteni. Ehhez a \$readmemh függvényt használtam, mely egy megadott helyen található bináris állományával inicializálja a paraméterként megadott regisztertömböt.

A bináris állomány rendelkezésemre állt, ugyanarról a weboldaltól elérhető, ahol a 1581-es szervizkönyvét is megtaláltam. Mivel a verilog hex fájl vár a \$readmemh paramétereként, át kellett alakítanom a bináris állományt a megfelelő formátumúra. Linux alatt a következő bash-szkripttel végeztem ezt el:

```
for FILE in *.bin; do
hexdump -v -e '1/1 "%02X\n"' $FILE > ${FILE%.*}.mem;
done
```


4. fejezet

Tesztelés, hibajavítás

na ide jöhet minden

4.1. Az interfész panel tesztje

interfész panel tesztje (tx led világít mert eltér a fpga fejlesztőpanel adatlapja a valóditól duh)

4.2. Verilog-modulok

hogyan zajlott ez egyes modulok tesztje: órajel ram rom proci

4.3. Debugolás

4.4. Valódi környezetben

parancsok basic-ben tesztelés a valóságban: valódi C64 hardverrel (+hibajel kiolvasó szkript) + digitális analizátor + speckó kábelek

4.5. Emulátor

proci bug -> emulátor szkript soros port hiba: órajel-forrás helyessége -> PLL drive nem ready -> hibás ucf fájl (dskchg és read láb megcserélve)

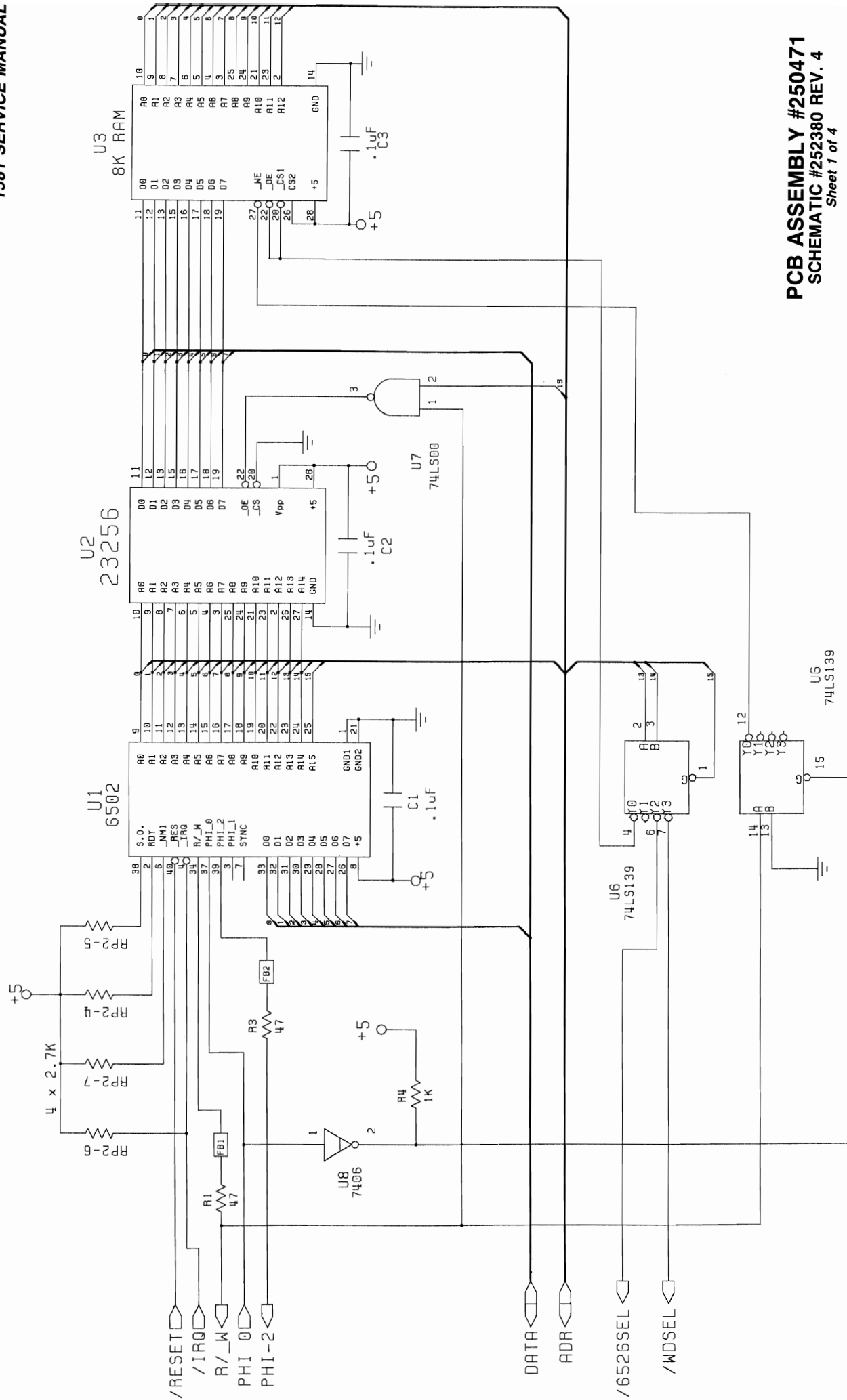
Irodalomjegyzék

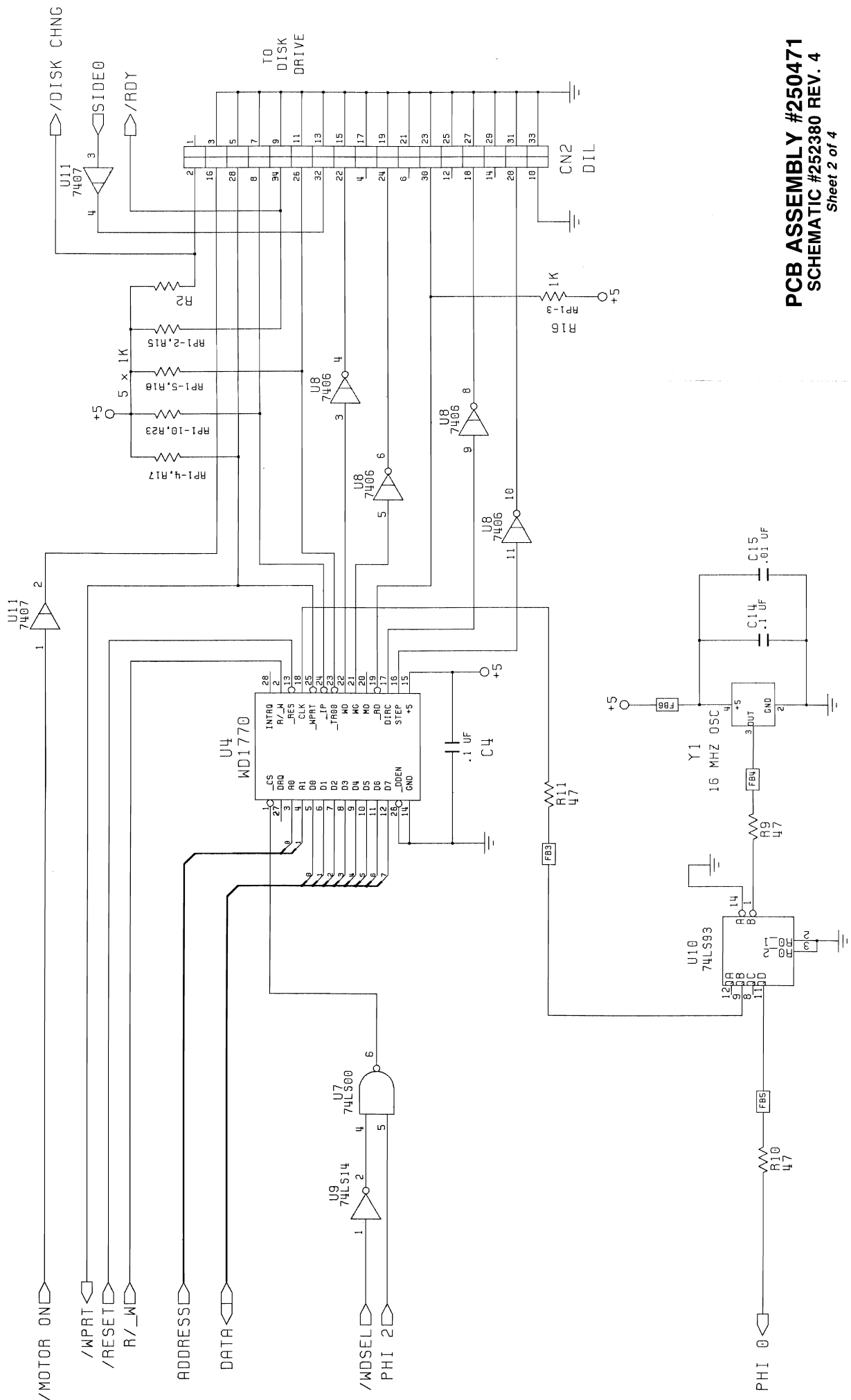
- [1] Thomas Brase. Floppy disk drive / bus interface. <https://retrocmp.de/fdd/general/floppy-bus.htm>, 2022. [Online; accessed 15-dec-2021].
- [2] CHINON INDUSTRIES, INC. *Chinon F-354C 135TPI Double-Sided 3.5 In Specifications*. URL: http://www.bitsavers.org/pdf/chinon/Chinon_F-354C_135TPI_Double-Sided_3.5_In_Specifications.pdf.
- [3] COMMODORE SEMICONDUCTOR GROUP, Postscript-conversion by Markku Alén. *6526 COMPLEX INTERFACE ADAPTER (CIA)*, February 2001. URL: http://archive.6502.org/datasheets/mos_6526_cia_recreated.pdf.
- [4] NEC Corporation. *FDI036A 3.5" FLOPPY DISK DRIVE PRODUCT DESCRIPTION*, 1985. URL: https://raw.githubusercontent.com/MiSTer-devel/AtariST_MiSTer/master/rtl/fdc1772/NEC%20FD1036%20Floppy.pdf.
- [5] J. Derogee. *IEC dissected - IEC-bus documentation as used for the 1541-III*, February 2008. URL: <http://www.zimmers.net/anonftp/pub/cbm/programming/serial-bus.pdf>.
- [6] FreeCores. t65. <https://github.com/freecores/t65>, 2005. [Online; accessed 15-dec-2022].
- [7] Experiment-S / Wolfgang Förster. Ein in vhdl modellierter open source ip-core mit atari st(e) funktionalität. <https://download.experiment-s.de/Configware/2K21A/rtl/vhdl.7z>, 2004. [Online; accessed 15-dec-2022].
- [8] Andrew Holme. Verilog 6502. <http://www.aholme.co.uk/6502/Main.htm>, 2016. [Online; accessed 15-dec-2022].
- [9] Commodore Electronics Limited. *SERVICE MANUAL 1581 3.5 DISK DRIVE*, June 1987. URL: [http://www.zimmers.net/anonftp/pub/cbm/schematics/drives/new/1581/1581_Service_Manual_314982-01_\(1987_Jun\).pdf](http://www.zimmers.net/anonftp/pub/cbm/schematics/drives/new/1581/1581_Service_Manual_314982-01_(1987_Jun).pdf).
- [10] MiSTer-devel. C64_mister. https://github.com/MiSTer-devel/C64_MiSTer/tree/master/rtl/iec_drive, 2019. [Online; accessed 15-dec-2022].
- [11] Arlet Ottens. verilog-6502. <https://github.com/Arlet/verilog-6502>, 2016. [Online; accessed 15-dec-2022].

- [12] Sony Corporation. *MPF920-Z 3½" Floppy Disk Drive*, 2004. URL: <https://pro.sony/s3/cms-static-content/operation-manual/4668278111.pdf>.
- [13] Sven Olaf Kamphuis, Malvineous, Kikinou, Peter Bye, archyx et. al. Floppy diskdrive pinout and wiring. https://old.pinouts.ru/HD/InternalDisk_pinout.shtml, 2019. [Online; accessed 15-dec-2022].
- [14] Synertek. *SY6500 8-Bit Microprocessor Family*. URL: <https://www.princeton.edu/~mae412/HANDOUTS/Datasheets/6502.pdf>.
- [15] toms01. 1581-pc-drive-adapter. <https://gitlab.com/toms01/1581-pc-drive-adapter/-/tree/master/>, 2020. [Online; accessed 15-dec-2022].
- [16] WESTERN DIGITAL CORPORATION, Edited By Jean Louis-Guérin. *WD1772 Floppy Disk Formatter/Controller*, January 2015. URL: http://info-coach.fr/atari/documents/_mydoc/WD1772-JLG.pdf.
- [17] Wikipedia contributors. Commodore bus — Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Commodore_bus, 2022. [Online; accessed 04-dec-2022].

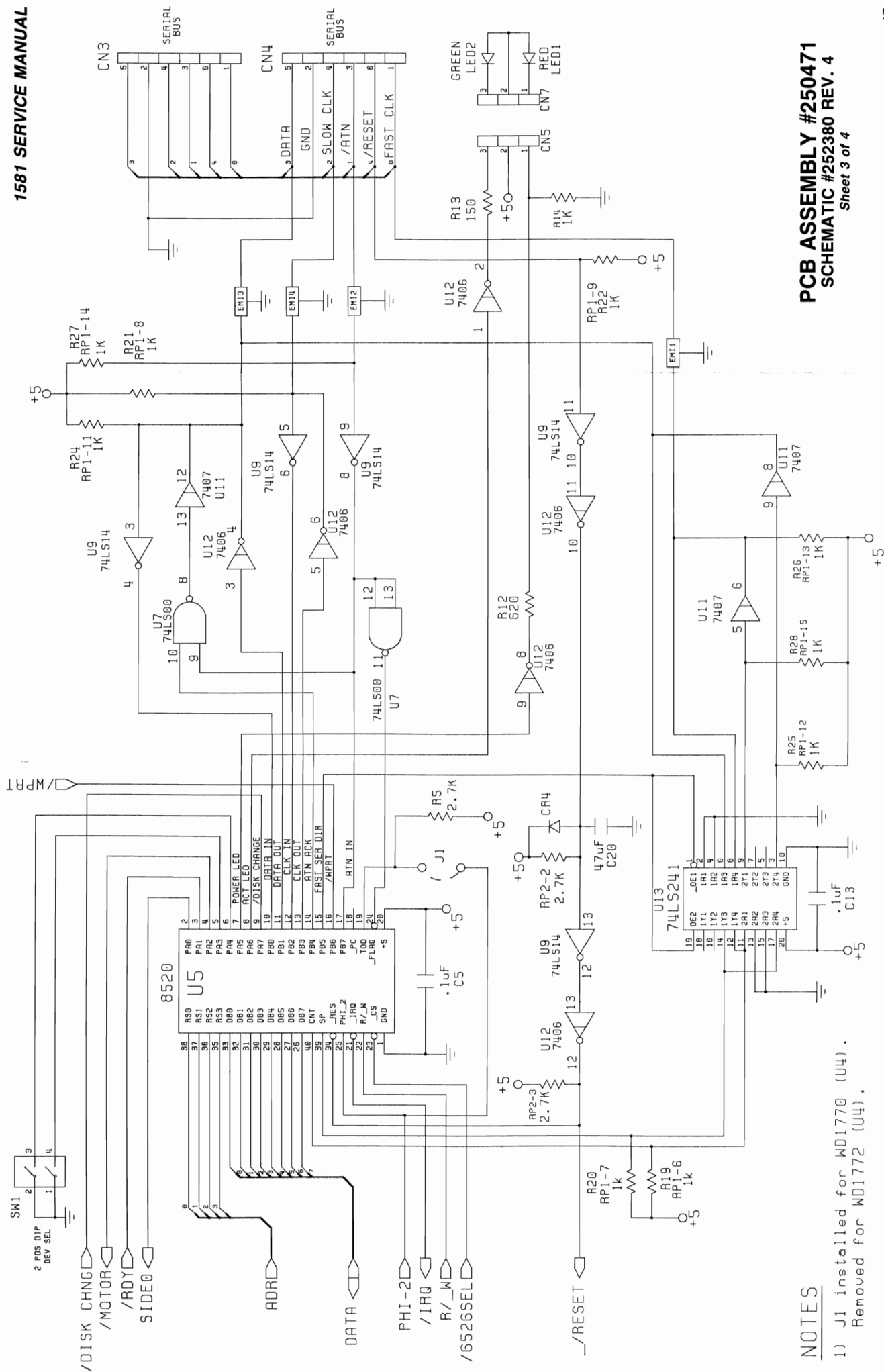
Függelék

F.1. Az eredeti 1581-es floppy meghajtó kapcsolási rajza

PCB ASSEMBLY #250471
SCHEMATIC #252380 REV. 4
Sheet 1 of 4

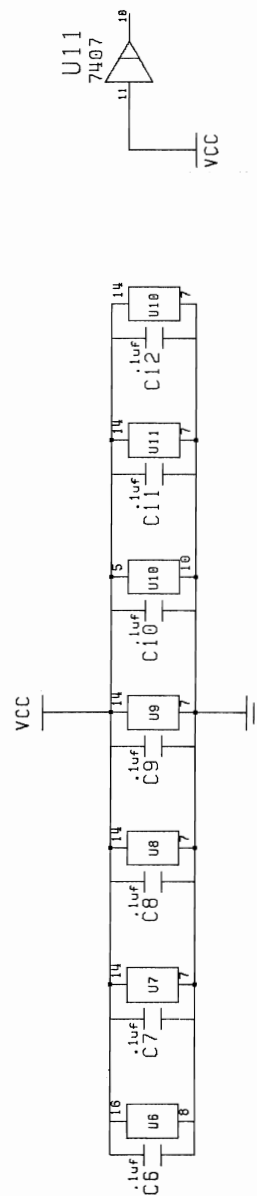
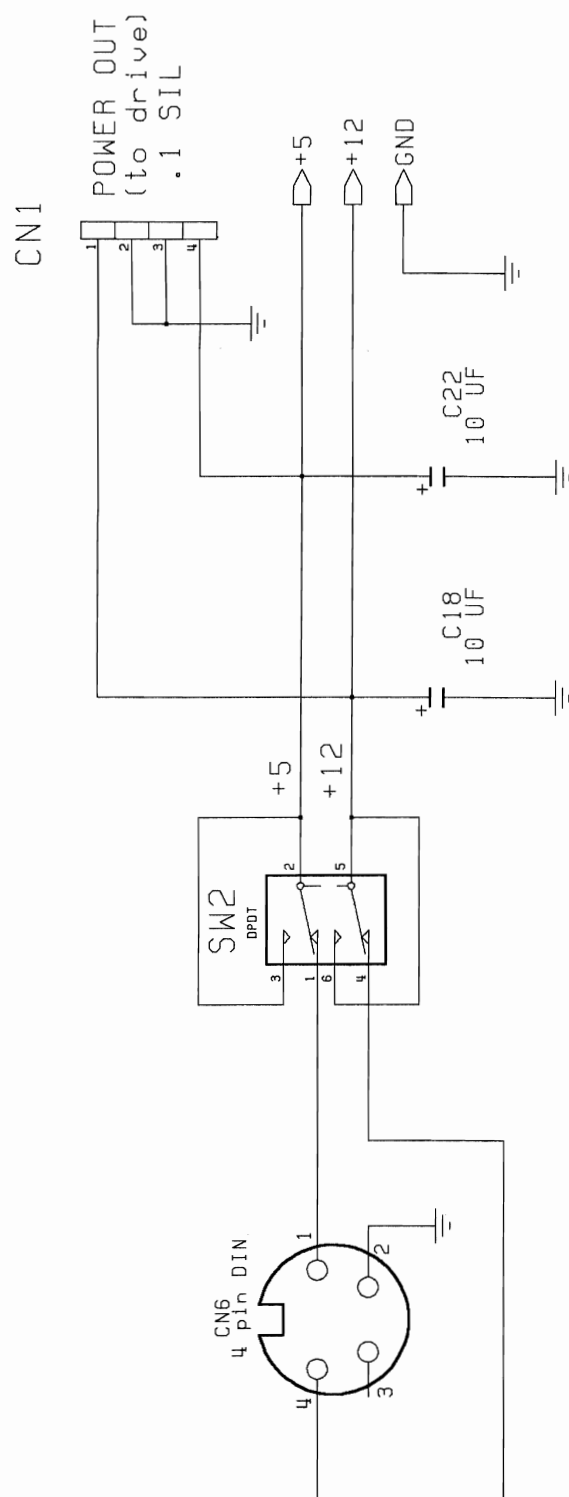


PCB ASSEMBLY #250471
SCHEMATIC #252380 REV. 4
Sheet 2 of 4



NOTES

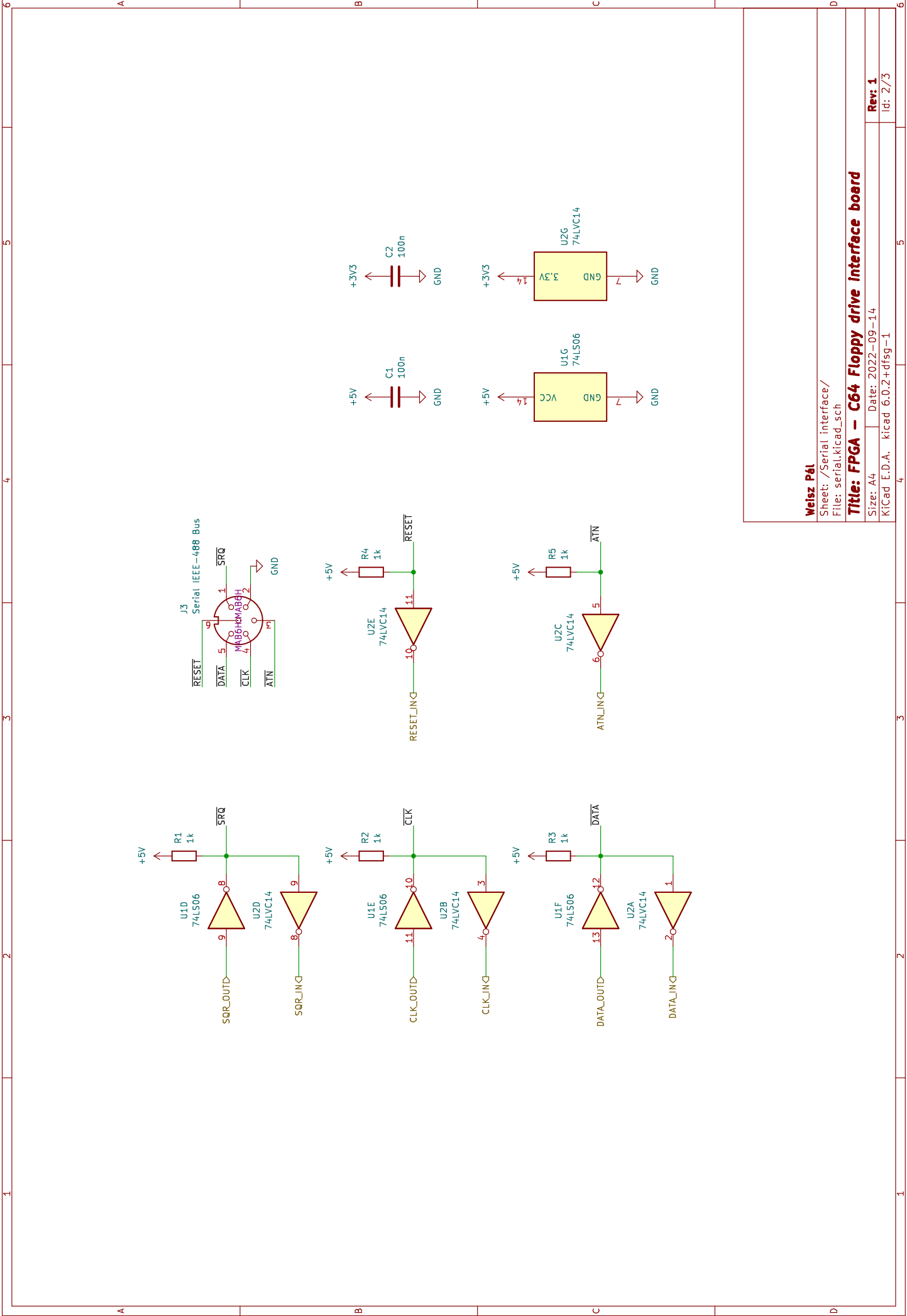
- 1) J1 installed for WD1770 (U4).
Removed for WD1772 (U4).



PCB ASSEMBLY #250471
SCHEMATIC #252380 REV. 4
Sheet 4 of 4

F.2. Az interfész kártya kapcsolási rajza





Weisz Pál

Sheet: /Serial interface/
File: serial.kicad_sch

Title: FPGAs - C64 Floppy drive interface board

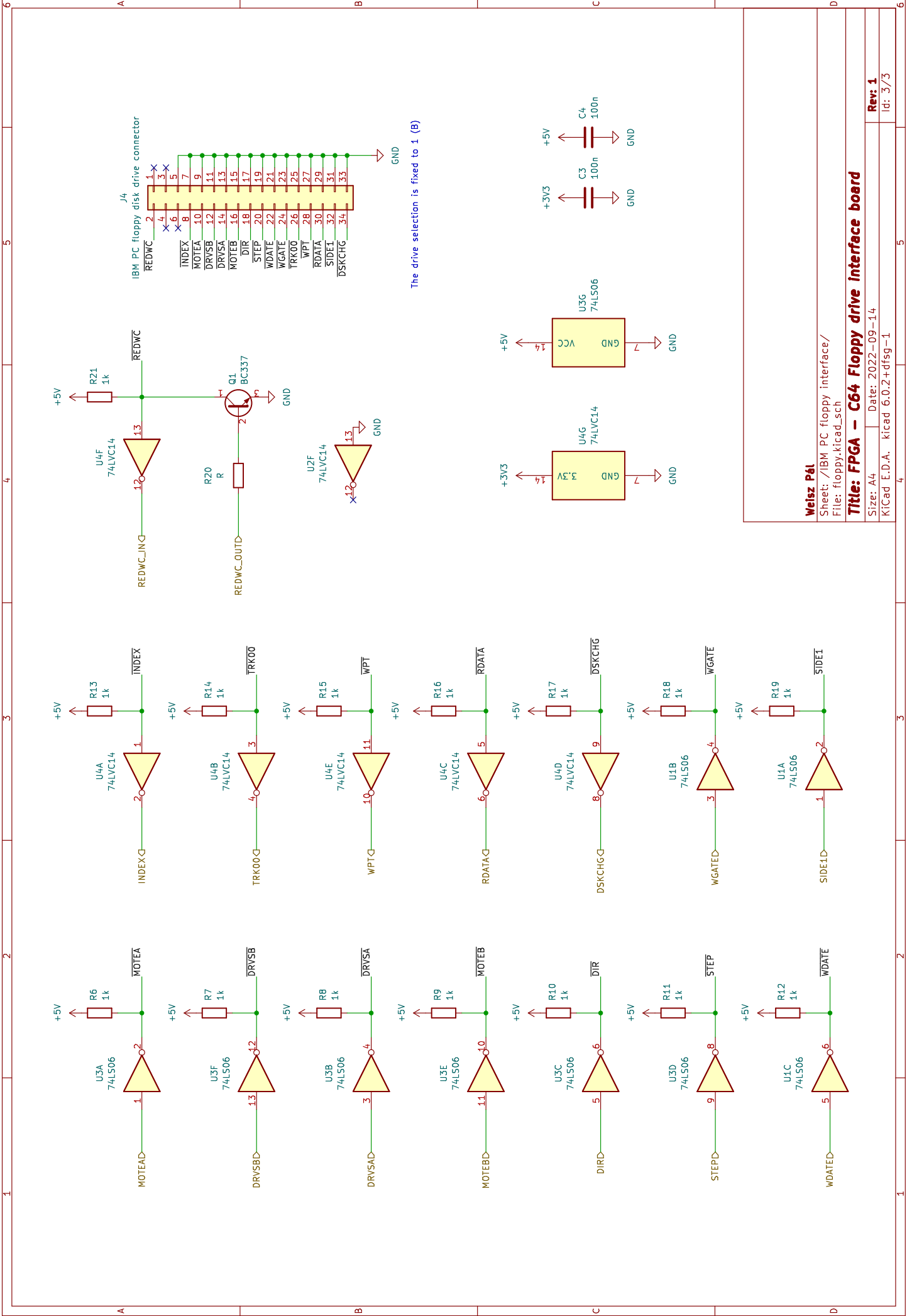
Size: A4

Date: 2022-09-14

KiCad E.D.A. kicad 6.0.2 + dfsg - 1

Rev: 1

Id: 2/3



E.3. Az interfészkártya NYÁK-terve

