

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

AUTOMATIZÁLÁSI ÉS INFOKOMMUNIKÁCIÓS INTÉZET

FPGA-s EEPROM programozó eszköz tervezése

KÉSZÍTETTE:

Szabó Ferenc

KONZULENS:

Konzulens neve

beosztása

Miskolc, 2025.

EREDETISÉGI NYILATKOZAT

Alulírott **Szabó Ferenc**; Neptun kód: *JODV94* a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának végzős, *gépészmérnök* szakos hallgatója ezennel büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában nyilatkozom és aláírással igazolom, hogy

FPGA-s EEPROM programozó eszköz tervezése

című szakdolgozatom/diplomatervem saját, önálló munkám; az abban hivatkozott szakirodalom felhasználása a forráskezelés szabályai szerint történt.

Tudomásul veszem, hogy szakdolgozat esetén plágiumnak számít:

- szószerinti idézet közlése idézőjel és hivatkozás megjelölése nélkül;
- tartalmi idézet hivatkozás megjelölése nélkül;
- más publikált gondolatainak saját gondolatként való feltüntetése.

Alulírott kijelentem, hogy a plágium fogalmát megismertem, és tudomásul veszem, hogy plágium esetén szakdolgozatom visszautasításra kerül.

Miskolc, 2025. május 13.

(*Szabó Ferenc*)

Tartalomjegyzék

1. Idegen nyelvű összefoglaló	6
2. Bevezetés	7
2.0.1. Téma választás Háttér	7
2.0.2. A Project bemutatása	8
3. Tartalmi rész	10
3.1. Technikai Háttér	10
3.1.1. Mi a FPGA?	10
3.1.2. Mi a VHDL?	13
3.1.3. Kommunikációs protokollok	15
3.2. NYÁK tervezés	19
3.2.1. A NYÁK tervező program bemutatása	19
3.2.2. A KiCad ban végzett munka bemutatása	20
3.3. A Programozó entitásai	30
3.3.1. A Int_Osc entitás	30
3.3.2. A write8bit entitás	33
3.3.3. UART_TX entitás	34
3.3.4. A UART_RX entitás	35
3.3.5. A writePage entitás	37
3.4. First section	38
3.5. Second section	38

4. Probléma tárgyalása	39
4.1. A Section	39
4.1.1. A Subsection	39
4.2. Another Section	39
4.3. Alfejezet	39
Összefoglalás	41
A Melléklet	42

Ábrák jegyzéke

2.1. Projekt terv blokkvázlata	9
3.1. A MAchXO2 FPGA családból egy CLB	12
3.2. UART adatkeret	16
3.3. UART blokkvázlat	17
3.4. SPI blokkvázlat	18
3.5. A programozó kapcsolási rajza	20
3.6. Ellenállás Jumper-ek	21
3.7. Ellenállásokon lévő feszültség összefüggése	21
3.8. VCC és VBUS közösítő jumper	22
3.9. Fontos feszültségek és a GND kivezetése	23
3.10. A programozó NYÁK-ja	23
3.11. KiCad limit beállítások	24
3.12. A NYÁK alsó rétege	25
3.13. SPI kimenet	25
3.14. I2C kimenet	26
3.15. A rounded tracks plugin UI-ja	27
3.16. Egy trace a plugin használata előtt	27
3.17. Egy trace a plugin használata után	28
3.18. Példa egy csúnyán tervezett trace-re	28
3.19. Teardrop vias UI	29
3.20. Teardrop plugin használata előtt	29

3.21. Teardrop plugin használata után	30
3.22. Elérhető CLK-frekvenciák az FPGA adatlapja alapján [1]	32

Táblázatok jegyzéke

1. fejezet

Idegen nyelvű összefoglaló

Here comes the summary...

2. fejezet

Bevezetés

2.0.1. Téma választás Háttér

Szinte naponta hallhatunk újabb és újabb, egyre gyorsabb és hatékonyabb Intel illetve AMD hagyományos desktop processzorokról. Ugyanakkor létezik egy másik típusú integrált áramkör, amelyről kevesebb szó esik, mégis számos területen meghatározó szerepet játszik: ezek az FPGA-k.

Az FPGA-k széles körben alkalmazottak. Az FPGA-k egyik legnagyobb előnye, hogy lehetővé teszik a mérnökök számára saját, célzottan megtervezett logikai műveletek végrehajtását, rendkívül nagy sebességgel. Nem feltétlenül azért gyorsabbak, mert több GHz-es órajellel rendelkeznek, mint egy mai hagyományos CPU, hanem mert az áramkörök működése nagyon specifikusan, az adott feladathoz igazítva valósítható meg. Egy FPGA-ban akár több százezer ugyanolyan logikai blokkot lehet tervezni és megvalósítani. Emiatt kiválóak lehetnek a párhuzamos számításban. Így minden terület, ahol ez fontos lehet, használva vannak, legalább a fejlesztési szakaszban.

Például valós idejű rendszerekben vagy bonyolult jelfeldolgozási feladatokban. A mesterséges intelligenciáknál is fontos az ultragyors párhuzamos adat átvitel vagy feldolgozás. Például I/O feladatoknál. De az FPGA-kat jellemzően AI gyorsítók vagy AI processzorokként is alkalmazzák. Mesterséges intelligencia betanítási feladatokban az FPGA-alapú gyorsítók gyorsabb teljesítményt tudnak nyújtani, mint a hagyományos GPU-k. Hasonló előnyök miatt az FPGA technológia kiemelt szerepet kapott a kép-

és videófeldolgozás területén is. Számos fogyasztói elektronikai eszközben, például virtuális valóság szemüvegekben FPGA-k végzik a beérkező videójelek feldolgozását és a kijelzőkre történő leképezését.

Az automata járművek fejlesztése során is használtak, hiszen alapvető fontosságú a környezet gyors és pontos érzékelése ezeknél a rendszereknél, ami nagymértékű párhuzamos adatfeldolgozást igényel. Jelentős szerepet töltenek be a hagyományos processzorok és az ASIC-ek fejlesztései során. Gyakran vannak használva a tervezők által új dizájnok validálására, debuggolására, mielőtt megrendelik az első prototípusokat egy félvezetőgyártó vállalatól. Bonyolult digitális rendszerek működése gyorsan és költséghatékonyan tesztelhetők, ha FPGA-kon vannak szimulálva. Mindezek alapján elmondható, hogy az FPGA egy olyan technológia, amely meghatározó szerepet tölt be a különböző iparágakban, és várhatóan a jövőben még inkább.

Tanulmányaim során különösen megfogott ez a terület, ezért választottam szakdolgozatom két fő témájául az FPGA-k és a VHDL hardverleíró nyelv mélyebb megismerését. A projektben a NYÁK tervezése is kiemelt szerepet kapott. Úgy gondolom, hogy a NYÁK-tervezés mindig is keresett szaktudás marad a villamosmérnöki szakmában, hiszen bármilyen modern beágyazott rendszer létrehozása elképzelhetetlen megfelelő áramköri integráció nélkül.

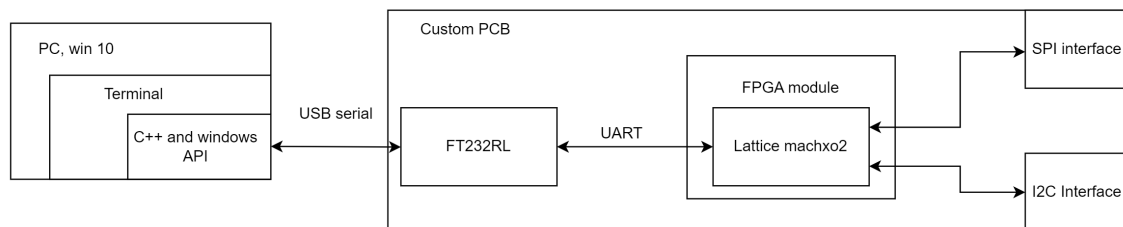
A jövőben szeretnék beágyazott rendszerek fejlesztésével foglalkozni, hol a hardveres és szoftveres ismeretek egyaránt fontosok. A NYÁK-tervezés tudása ebben alapvető kompetenciának számít.

A szakdolgozat témája, miről szól(?), mi a célkitűzés(?), a szakdolgozat felépítése (?) mi az egyes fejezetek rövid tartalma (?)

2.0.2. A Project bemutatása

Projectembe egy összetett, de egyedül megvalósítható beágyazott rendszert akartam megvalósítani. Es használni, illetve próbára szerettem volna tenni a VHDL-ben való tervezési tudásomat. Szerettem volna egy számomra új programozási nyelvel is megismerkedni, és végül a C++-t választottam.

Ezek miatt egy EEPROM programozó megvalósítását választottam. A project saját ötlet volt, és úgy gondolom megfelelő szakmai kihívás volt.



2.1. ábra. Projekt terv blokkvázlata

Ez a block diagramm volt a project kiinduló ötlete. A felhasználó a c++-ban írt program futtatásával tud kommunikálni a programozóval terminálon keresztül. A programtól kapott USB kommunikációt a FT232RL váltja át UART csomagokká az FPGA module számára. Az FPGA module-ön megvalósított VHDL-ben megírt logikai áramkör pedig a kapott parancsok alapján küld SPI és I2C parancsokat a programozandó EEPROM chipnek. Az EEPROM chip válaszait esetleges válaszait pedig visszakonvertálja UART csomagokká a FT232RL-nek, amely visszaküldi a PC-nek.

3. fejezet

Tartalmi rész

3.1. Technikai Hátter

3.1.1. Mi a FPGA?

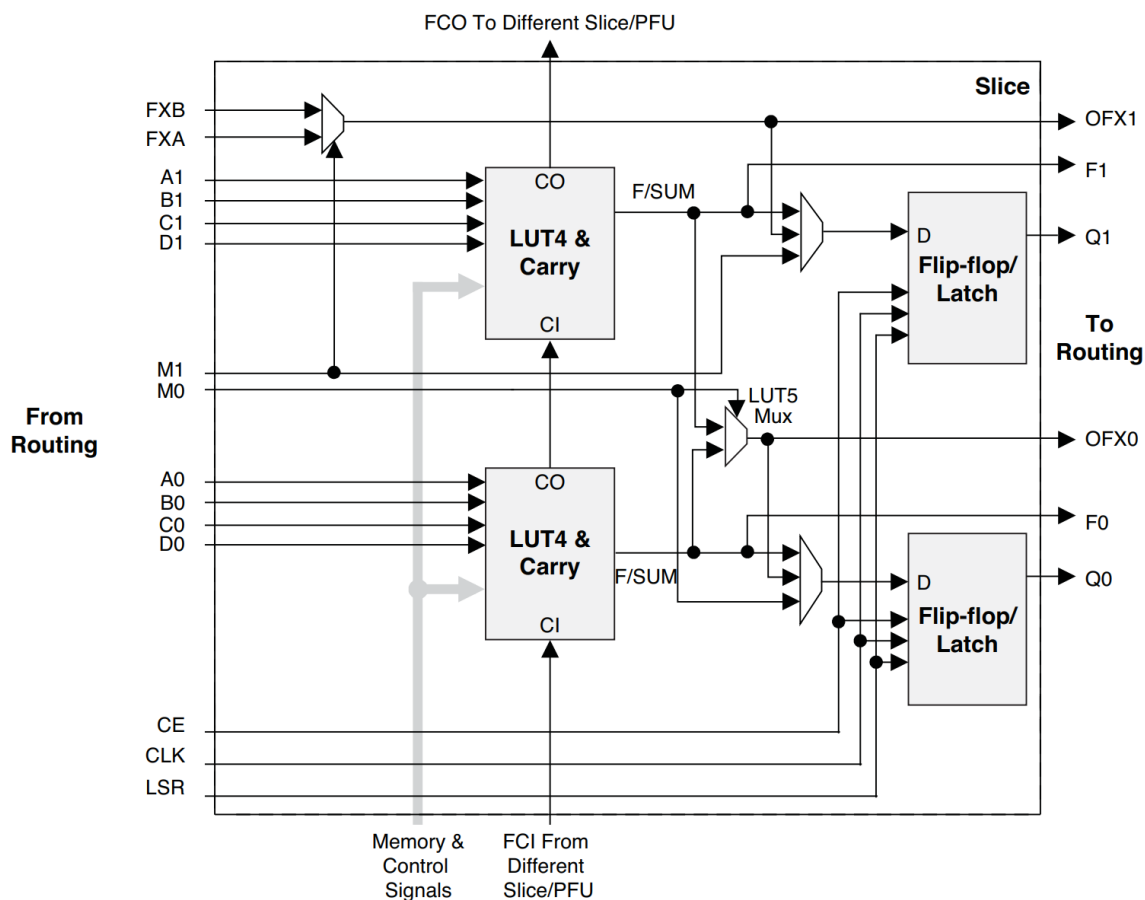
A FPGA egy rövidítés, teljes nevükön ezeket a chipeket, Field-programmable gate array-ként, magyarul a felhasználás helyén programozható logikai kapumátrixokként ismerjük. Az FPGA-ra HDL nyelveken lehet tervezni digitális áramköröket, amik megvalósulnak fizikailag a chip belsejében.

Az FPGA-k tartalmazznak logikai cellákat, különböző tartalmakkal: flip-flop-ok, LUT-ok, illetve logikai kapuk stb. Ezeket a cellákat lehet programozás során tetszőlegesen összeköttet-ni, így alakulnak ki a tervezett digitális áramkörök. Az FPGA-kon „futó kódot”, azaz a design-t, firmware-nek szoktuk nevezni. A firmware szónak más az eredete, mégpedig a csak olvasható memóriába írt program, de az FPGA-k használata körül is elterjedt. A szó maga jól leírja, hogy a FPGA programozható, de közben egy tényleges digitális áramkör valósul meg.

Az FPGA-k megtalálhatók fogyasztói termékekben is, de nagy szerepet játszanak, sok fejlesztési környezetben is, főleg ASIC fejlesztésnél. Termékekben azért lehet hasznos egy FPGA, mert specifikus feladatokat nagyon jól tud elvégezni, és ha a gyártó cég akar változtatni a chip működésén, akkor van rá lehetőség egy firmware frissítéssel. Jó példa az FPGA-k használatára a fogyasztói virtuális valóság készülék. A

készülékbe küldött videó adatot fel kell dolgozni, és helyesen rátérképezni a készülék kijelzőire. Mindezt minél gyorsabban, hogy a felhasználó minél kevesebb jelkésést érezzen a fejmozgatás és a kép változása között. Ilyen feladatokra tökéletes az FPGA, hiszen ugyanazt a matematikai műveleteket kell elvégezni, ugyanolyan formátumú adatra, több milliószor egymás után. Egy hagyományos CPU ugyan-ebben a feladatban, rosszabbul szerepelne, még ha hasonlóan gyors az órajele is. A CPU-k arra vannak tervezve, hogy minél több használati esetet fedjenek le, és sok feladat elvégzésére könnyen lehessen őket programozni. Az ilyen feladatoknál éppen emiatt, nem a legoptimálisabban végzik el a számításokat, mivel nem erre lettek tervezve. Egy példán keresztül bemutatva: ha egy ember kap egy utasítássort kenyérsütéshez, akkor végre tudja hajtani az utasításokat, és képes egy kenyeret sütni, de lassabban, mint egy kenyérsütéshez tervezett automata gép. Ugyanennek az embernek írhatunk utasításokat egy villanykörte becsavarására is, de a kenyérsütő gép soha nem lesz képes villanykörtét becsavarni. Ehhez egy másik gépet kellene tervezni. A hasonlatban az ember egy CPU, az utasítássor a hagyományos kód és a tervezett automata gép egy FPGA-n megvalósított design.

A legtöbb fejlett FPGA manapság SRAM-alapú. Ezek az eszközök konfigurálható logikai blokkokat (CLB-k), és programozható I/O blokkokat tartalmaznak, a jelek chipbe történő be- és kivezetéséhez, valamint programozható útválasztó mátrixot, a CLB-k összekapcsolásához. Ahogy az elnevezés is sugallja, ezeknek az eszközöknek a konfigurációját, a belső SRAM tárolja a chipen. Mivel a programozható összeköttetések nem ideálisak (ellenállásuk és kapacitásuk van), az egyes útvonalak hossza, nagy hatással van az elkészült design elérhető teljesítményére. Az összekapcsolások okozta késések jelentősek, ezért előfordulhat, hogy nehéz megjósolni a sebességet a tényleges útválasztás befejezése előtt. Ahogy az eszközök kihasználtsága megközelíti a 100%-ot, az útválasztás jelentősen nehezebbé válik. A netlist generáló folyamat, kritikus fontosságú az elkészült design kívánt teljesítményének eléréséhez. Ebben a fejlettebb szintetizátorok nagyban segíthetnek.



3.1. ábra. A MachXO2 FPGA családból egy CLB

A fenti diagram egy egyszerű konfigurálható logikai blokkot / logikai elemet mutat be. Ez a CLB, a MachXO2 FPGA termékcsalád adatlapjában található, ehhez a termékcsaládhoz tartozik az az FPGA is, amivel én dolgoztam. A modern és komolyabb FPGA-k bonyolultabb megvalósításokat tartalmaznak további erőforrásokkal, például blokk RAM-okkal, shift regisz-terekkel, összeadókkal stb. A kis LUT-ok (általában 4-6 bemenet) a kombinációs logika megvalósítását szolgálják. A logikai blokkok általában tartalmaznak LUT-okat és néhány flip-flop-ot. A CLB-n belüli kapcsolatok meglehetősen rövidek, így a késleltetésük általában jelentéktelen. A CLB-ket általában az FPGA-n belül szigetekként helyezik el, amelyeket az összekapcsolási mátrix vesz körül, ahol a szomszédos CLB-k, általában rövid és gyors kapcsolatot tartalmaznak közöttük. Ezen kapcsolatok alkalmazásával bonyolultabb funkciók is megvalósíthatók, a szomszédos blokkokból történő erőforrások „kölcsonvétele”. Ez azonban, csak megfelelő

elhelyezés mellett történhet meg. Például egy összeadó bitjeit, sorrendben egymás mellé kell helyezni. Ez a szintetizátor felelőssége, de általában a tervezőnek ismernie kell a cél FPGA belső architektúráját, az erőforrások legjobb kihasználása érdekében. Manapság eléggé elterjedtek a beépített oszcillátorok, tápegységek, melyek a rendszer-szintű tervezést segítik, és helyet spórolnak. Nem szabad figyelmen kívül hagyni azt a tényt, hogy a megfelelő tápegység megtervezése meglehetősen összetett feladat a modern FPGA-k számára, ahol sok jel, nagy frekvencián működik, és több tápsínre van szükség, nagy áramerősséggel. Az indítási blokkok segíthetnek a terv minden részének megfelelő inicializálásában, rendszerindítás után, vagy alaphelyzetbe állítás esetén.

Az FPGA-kat jelfeldolgozásra is használják, ahol a dedikált szorzók / digitális jelfeldolgozási blokkok hatékonyabbak, mint a CLB-alapú blokkok. Ezek a dedikált blokkok sokkal kevesebb helyet foglalnak el az IC belsőjében, és magasabb frekvencián, kisebb teljesítménnyel tudnak működni. A belső memória flip-flop-okból való szintetizálása, pazarló folyamat. A modern FPGA-k beépített memóriablokkokat tartalmaznak, amelyekre általában szükség van, mivel a legtöbb tervnek valamilyen FIFO-ra, vagy bufferre van szüksége az átmeneti adatok tárolására. A legtöbb FPGA legalább kétportos memóriát tartalmaz, ahol az olvasási és írási műveletek egyszerre történhetnek, két dedikált porton. Az órajelgenerátorok, manapság egyaránt elterjedt erőforrások.

3.1.2. Mi a VHDL?

A VHDL az egyik legelterjedtebb HDL, a VERILOG mellett. A HDL, azaz hardware description language, magyar neve, hardware leíró nyelv. A VHDL egyben egy standard, és egy programozói nyelv. Programozói nyelv, mert segítségével absztrakt módon lehet leírni egy digitális áramkör működését, amit majd szintetizálás után, meg lehet valósítani egy FPGA segítségével. Egyben egy standard is, amit az IEEE tart fent. Minden 5 év után frissül, hogy lépést tartson az ipari szükségekkel. A VHDL nehézsége, mint minden más leíró nyelvnek is, nem csak az, hogy meg kell tanulni a programozó nyelvet, hanem az is, hogy tudni kell, hogy a különböző szerszámok, amiket használunk a fejlesztés során, hogyan értelmezik majd a kódot. Amikor egy design működik

szimulátorban, nincs rá garancia, hogy szintetizálás után is működni fog. Komolyabb designok tervezése ezeket a lépéseket szokta követni:

- (a) Az elvárt digitális működés leírása HDL nyelven, egyben, majd a szimulációhoz szükséges „testbench” megírása.
- (b) A design szimulálása szimulátorral, debug-olás.
- (c) A design szintetizálása a tényleges a FPGA-ra.

A testbench szerepe az, hogy szimuláció közben, a design bemeneteit szimulálja, illetve kimeneteire válaszoljon, ha kell. Például egy I2C mester tervezése után, a testbench viselkedhet úgy, mint egy szolga. A VHDL tartalmaz szintetizálhatatlan részt is, nagyrészt azért, hogy testbench írásakor egyszerűbben és gyorsabban lehessen haladni. VHDL-nek azt a részét, ami szintetizálható, RTL-nek (register transfer level) hívjuk.

A szintetizálás az utolsó és legkritikusabb lépés, mielőtt egy működő design-t megvalósítunk.

1. A szintetizátor először generál egy kapu szintű netlist-et. Utána a generált netlist-et rátérképezi a specifikus logikai cellákra az FPGA-ban, flip-flop-okra, look-up table-okra és logikai kapukra stb.
2. Ezután készül egy netlist, ami a specifikus FPGA modellre tartozik, a szintetizátor eldönti az összes szükséges cella legjobb elrendezését, összezsátolását.
3. Végül következik az időzítés analízis. Komolyabb designoknál fontos a helyes működéshez, hogy adott értékeknél ne legyen nagyobb a „slack”. Ezen azt értjük, hogy egy logikai jel később ér a netlist-ben megadott helyére, mint kellene, és emiatt hibás a design. Ilyesmi akkor történik, ha például egy jel túl sok logikai kapun megy át anélkül, hogy az órajelhez újra időzítve lenne. Ilyenkor a megoldás az, hogy a logikai kapuk közepénél, újra szinkronizáljuk a jelet egy flipfloppal.
4. Ezután a szintetizátor előállít egy bit fájlt, amit rá lehet programozni az FPGA SRAM-jébe.

A VHDL entitás, egy darab hardware-nek lehet mondani, aminek definiált kimenetei is bemenetei vannak. Egy tervezett entitás lehet komplex, egyszerű, lehet szimpla ÉS kapu vagy akár SPI mester is. Egy entitáson belül lehet több, már megtervezett entitás is összekapcsolva.

Egy entitásnak két része van, amit VHDL-ben meg kell tervezni:

1. Az entitás definíció, ahol meg kell adni az entitás nevét, bemeneteit és kimeneteit
2. A szerkezet definíció, ahol az entitás működését kell leírni.

3.1.3. Kommunikációs protokollok

Ahhoz, hogy adatot tudjunk átadni egy feladótól egy fogadónak, fontos, hogy ugyanazt a „nyelvet” beszéljék. Ha két ember különböző nyelven beszél egymással, akkor nem fogják egymást érteni. Ehhez hasonlóan, ha egy feladó IC, az adatot egy bizonyos protokoll szerint kódolja, de a fogadó nem ismeri a protokollt, akkor nem történik meg az adatátvitel. Tehát egy protokoll szabályai leírják az adat kódolását/dekódolását, és a csatornát is, amin folyik a kommunikáció.

Analízis elrendezés

UART

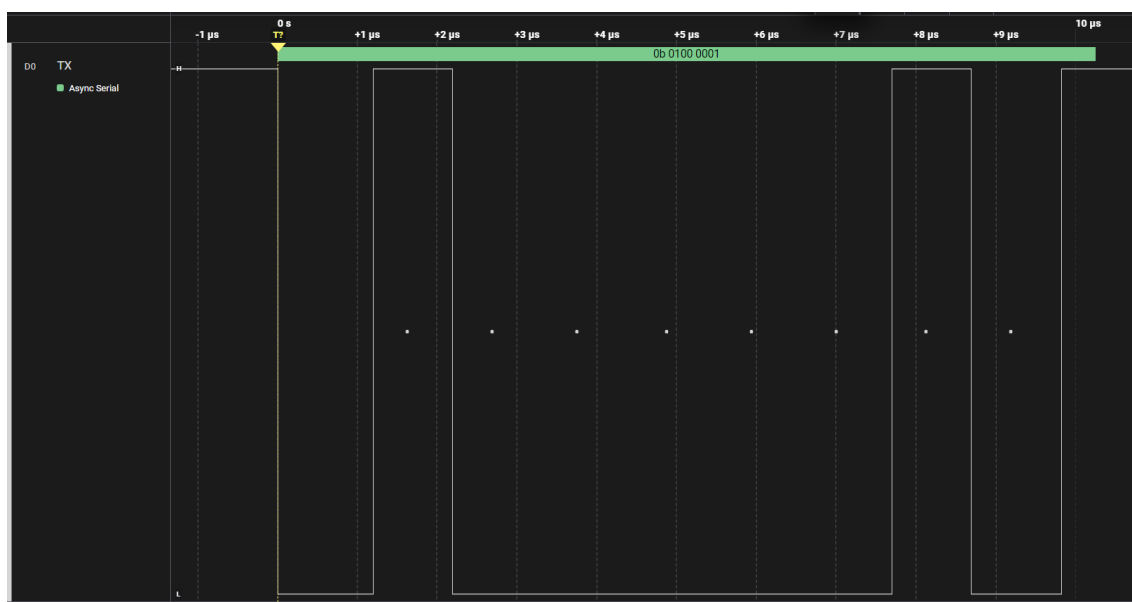
Az általam készített programozó sok kommunikációs protokollt használ, köztük az UART-ot. A számítógéppel való kommunikálás UART-on keresztül történik, a FT-DI232 UART-USB átalakító segítségével.

Az UART egy rövidítés teljes neve: Universal asynchronous receiver transmitter. Egy aszinkron, soros protokoll, ami azt jelenti, hogy nincs órajel vonal, hanem az időzítést a küldő és fogadó külön-külön követi, és az adatot bitenként kell küldeni/fogadni. Ezért fontos, hogy mindkét fél ugyanazzal az időzítéssel dolgozzon. Ezt az időzítést szimbólum per szekundumban mérjük, és Baud-nak hívjuk. Ha a kommunikáció időzítése 9600 Baud, akkor a fogadó tudja, hogy egy szimbólum 1/9600 másodpercig lesz megtartva a vonalon, és helyesen tudja mintavételezni az adatkeretben levő adatot. De

a Baud ráta nem egyenlő a maximum adatsebességgel, tehát 9600 Baud az nem 9.6 kb/sec. Ez az adatkeret, és egy pár kötelező időzítés miatt van. Az adatkeret azért szükséges, hogy a fogadó tudja mikor kezdődik egy adat, és hol van a vége. Az adatkeret tartalmazhat egy paritás bitet is. Az adatkeret tulajdonságai is egyezni kell az adó és fogadó között.

Tehát a fontos tulajdonságok:

- Baud ráta
- Adatbitek száma
- Paritás bit használata.



3.2. ábra. UART adatkeret

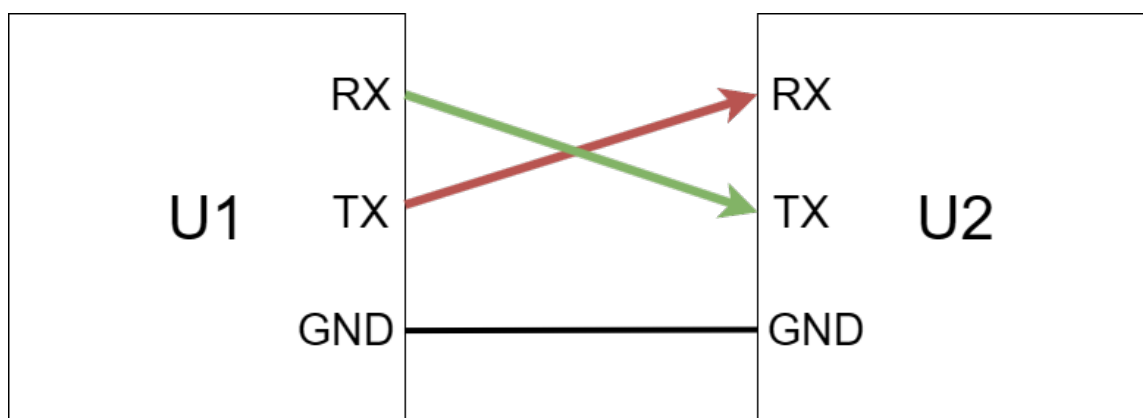
A képen látható egy adatkeret, amit az FPGA küld az FTDI232-nak. A Baud ráta ebben az esetben 921600 Baud, azaz egy szimbólum ideje: $1/921600 \text{ Baud} = 1.09 \mu\text{s}$. Ezt az analízátor program segítségével meg is jelöltem a képen.

A tétlen állapotot megbontja az indító bit.

Az indító bit után látható az adat bájt LSB bit sorrenddel, ez azt jelenti, hogy az első bit értéke 2^0 a második 2^1 , stb.

Ezután látható a stop bit, a stop bit 1 db szimbólum ideéjig magas szinten tartja a vonalat. Ha van paritás bit akkor az a stop bit előtt van volna, én viszont nem használok hiba detektálást.

Ezután a vonal visszatér a tétlen állapotba (logikai magas).

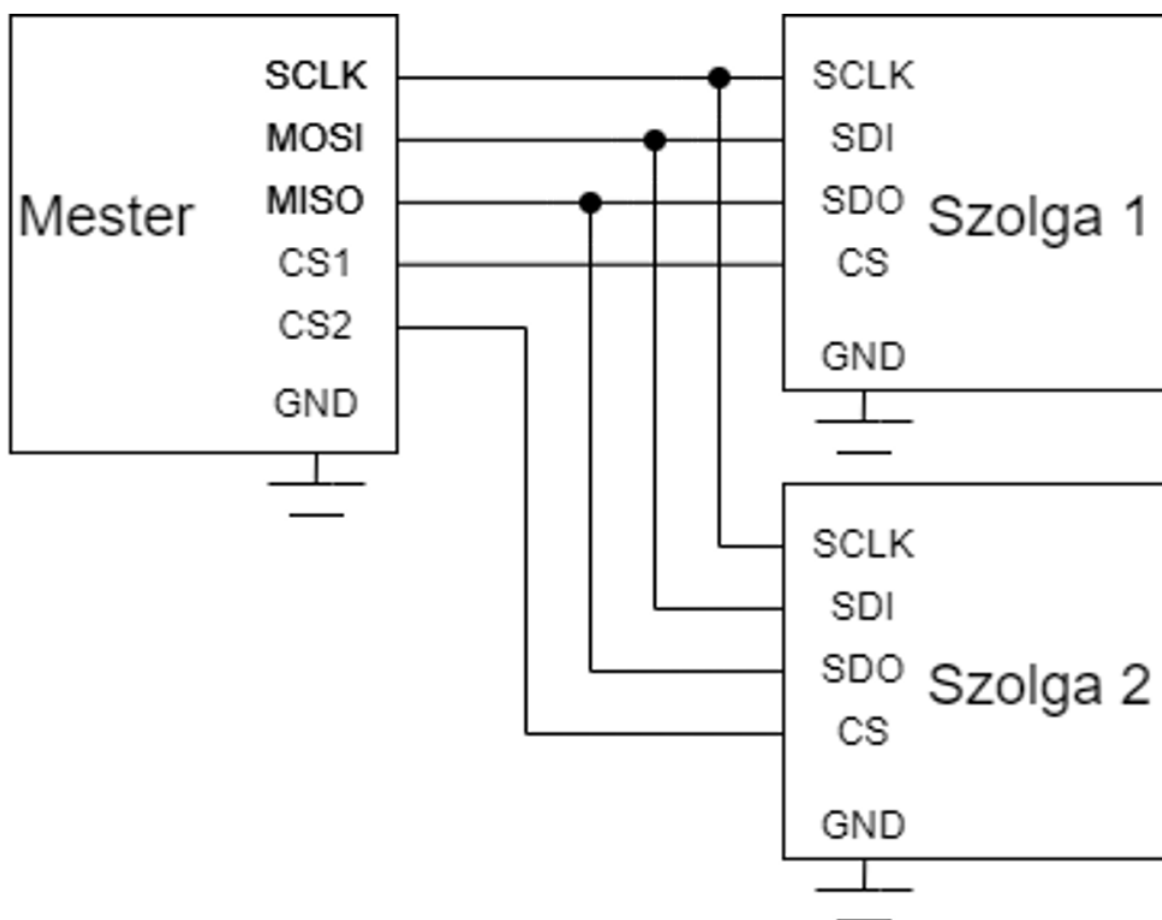


3.3. ábra. UART blokkvázlat

Az UART protokollban a vonalakat RX-nek és TX-nek hívjuk. A küldő és a fogató rendelkezik saját RX és TX lábbal. A TX láb a küldő- és a RX láb a fogadó láb. Nem kötelező az összes vonalakat használni, ezért a kommunikáció lehet szimplex, vagy fél/teljes duplex. Szimplex módban, csak az U1 Tx lába csatlakozna, az U2 RX lábához, és csak küldeni lenne képes az adatot. A fél/teljes duplex konfigurációban, hasonlóan lenne kapcsolva a képhez, és attól függően, hogy az U1/U2 képes-e egyszerre küldeni és olvasni adatot, a kommunikáció fél, illetve teljes duplex lenne. Az én nyákomon a kommunikáció teljes duplex.

SPI

Az SPI kommunikációs protokoll, egy rendkívül elterjedt és rugalmas protokoll, teljes neve serial peripheral interface. Az UART-al ellentétben szinkronizált protokoll, és teljes duplex.



3.4. ábra. SPI blokkvázlat

SPI protokollban több, mint két IC tudja használni ugyanazokat a vonalakat, de egyszerre csak kettő lehet aktív, ezért van mester és szolga. A mester szerepe az, hogy kiválasszon egy szolgát, és kezdje a kommunikációt. A szolga csak akkor képes kommunikálni, ha ki van éppen választva. A kiválasztást a CS „chip select” vonalokon keresztül végzi el a mester. Minden szolgának külön CS vonal kell, de a többi vonalat meg tudják osztani. Emiatt minden szolgának elég 4 láb (referencia pontot kivéve), még a mesternek kell 3db, plus minden szolgaként egy láb (ismét referencia pontot kivéve).

Mivel az SPI szinkron protokoll a szimbólum sebességet itt nem az előre beállított Baud ráta határozza meg, hanem a mester előállít egy órajelet a SCLK vonalon, amit figyelnek a szolgák a kommunikálás alatt. A szimbólumsebesség tehát csak a SCLK frekvenciájától függ.

A MOSI vonal egy rövidítés. Teljes neve magyarra fordítva „mester ki szolgál be”, ez a vonal hordozza a mestertől küldött soros adatot, a szolgál oldalán a lábat SDI-nak (soros adat be) hívjuk. A MISO vonal mester be szolgál ki és a szolgál oldalon SDO-nak (soros adat ki) hívjuk. Az adatkeretet bemutatásához használok ismét a programozómat, mégpedig egy kommunikációt egy spi EEPROM és az FPGA között.

3.2. NYÁK tervezés

3.2.1. A NYÁK tervező program bemutatása

A KiCad egy ingyenes, nyílt forráskódú szoftvercsomag. Elsősorban kapcsolási rajzok és nyomtatott áramkörök tervezésére szolgál. Egy KiCad projecten belül lehet tervezni nyakokat, kapcsolási rajzokat, lábnyomokat, és szimbólumokat is.

A KiCad sok hasznos segédprogramot is tartalmaz, amelyek segítenek az kapcsolási rajzok és a nyomtatott áramkörök tervezésében.

Támogatja a kapcsolási rajzok elkészítését, az alkatrészekhez tartozó lábnyomok hozzárendelését, valamint a nyomtatott áramkörök fizikai elrendezésének megtervezését. A PCB tervezés során több réteg kezelésére is lehetőség van, akár 32 rétegű áramkörök tervezése is lehetséges.

A tervezett áramkörök vizuális ellenőrzését egy integrált 3D nézet segíti, amelyben a felhasználó valósághű képet kaphat a végső NYAK-rol.

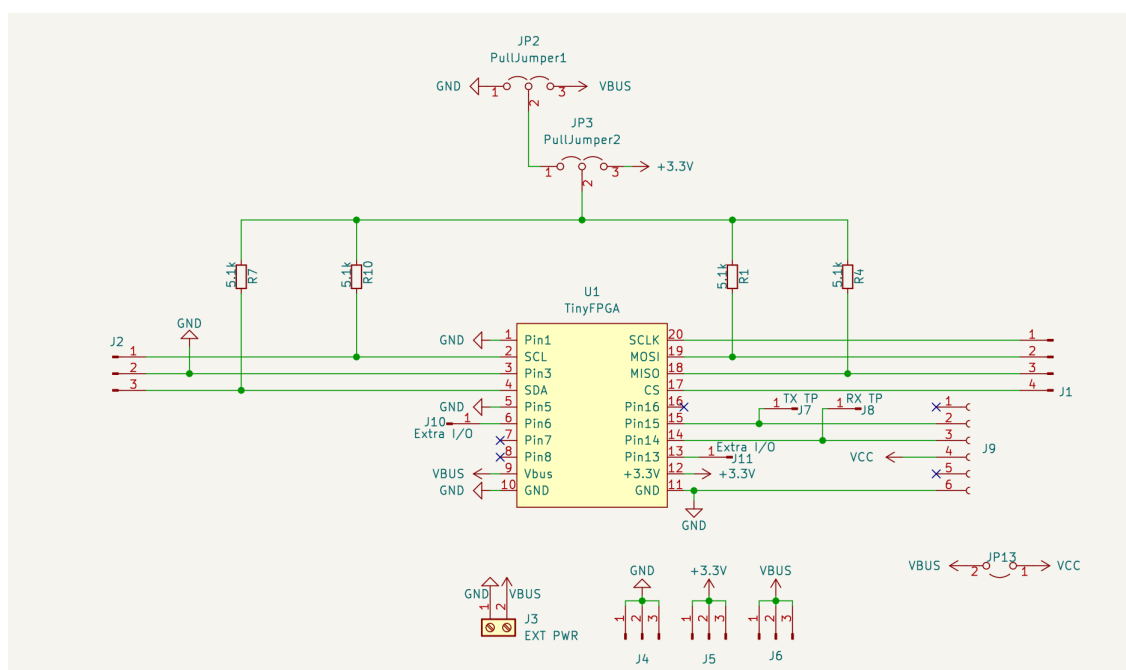
A tervezési folyamat biztonságát a beépített elektromos szabályellenőrző (ERC) és tervezési szabályellenőrző (DRC) rendszerek garantálják, amelyek képesek a gyakori tervezési hibák, például az elmaradt összeköttetések vagy a nem megfelelő távolságok automatikus felismerésére.

A gyártási előkészítést a KiCad támogatja gyártási fájlok (például Gerber, drill fájlok) generálásával, valamint beépített anyagjegyzék/BOM készítő funkcióval is rendelkezik. Ezen felül a KiCad lehetővé teszi saját szimbólum- és lábnyomkönyvtárak létrehozását, valamint 3D modellek hozzárendelését az alkatrészekhez. Amit és is kihasználtam, az, hogy a KiCad szoftver Python szkriptek támogatásával bővíthető,

amely különösen hasznos mivel nyílt forráskódú a KiCad. A kiterjedt, közösségi alapú dokumentáció és a hozzáférhető tanulási források tovább növelik a program használhatóságát mind kezdő, mind haladó felhasználók számára. Ezek miatt választottam a KiCad-ot.

3.2.2. A KiCad ban végzett munka bemutatása

Kapcsolási rajz

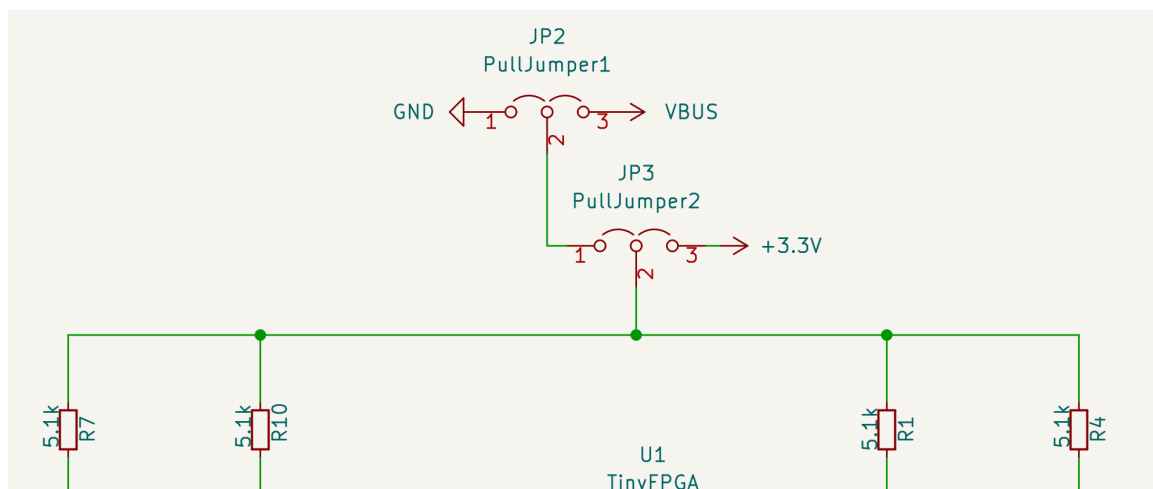


3.5. ábra. A programozó kapcsolási rajza

A kapcsolási rajz viszonylag egyszerű, nincs sok alkatrész. A felhúzó ellenállásokat kivéve csak csatlakozók meg jumper-ek vannak a NYÁK-on. Mégis igyekeztem sok időt fordítani a tervezésre.

A célom az volt, hogy ez egy általánosan használható EEPROM programozó legyen, ehhez rugalmasnak kellett megterveznem. A jumper-ek segítségével az ellenélások 3V3 vagy 5V felhúzó ellenállások, vagy akár lehúzó ellenállásokként is tudnak szolgálni. Így sokféle EEPROM module-okat tud támogatni az áramkör. Ha a JP2 jumper 1-es és 2-es pin-je van közösítve, akkor a GND van kiválasztva. Ha a JP2 jumper 2-es és

3-es pin-je van közösítve, akkor 5V van kiválasztva. Ha a JP3 jumper 2-es és 3-es pin-je van közösítve, akkor 5V van kiválasztva.



3.6. ábra. Ellenállás Jumper-ek

	JP2	JP3	Ellenállásokon lévő feszültség
Pin-ek közösítve	1,2	1,2	GND (0V)
	2,3	1,2	5V
	1,2	2,3	3.3V
	2,3	2,4	3.3V

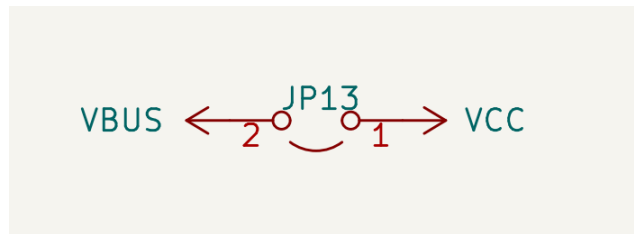
3.7. ábra. Ellenállásokon lévő feszültség összefüggése

A áramkörnek 4 lehetséges tápja van

- A TinyFPGA 5V VBUS PIN-je. A pin közvetlen össze van kötve a module mikró USB 5V tápjával. Tehát amikor a TinyFPGA module csatlakoztatva van a mikró USB-n keresztül a VBUS pin kimenetként szolgálhat. A TinyFPGA module a betápját is a VBUS látja el. Szóval, ha a TinyFPGA nincs csatlakoztatva az USB-hez akkor a VBUS pin bemenetként is működhet.
- A TinyFPGA 3V3 PIN. Ez a kimenet a TinyFPGA module power management IC-je generálja a VBUS 5V feszültségéből.

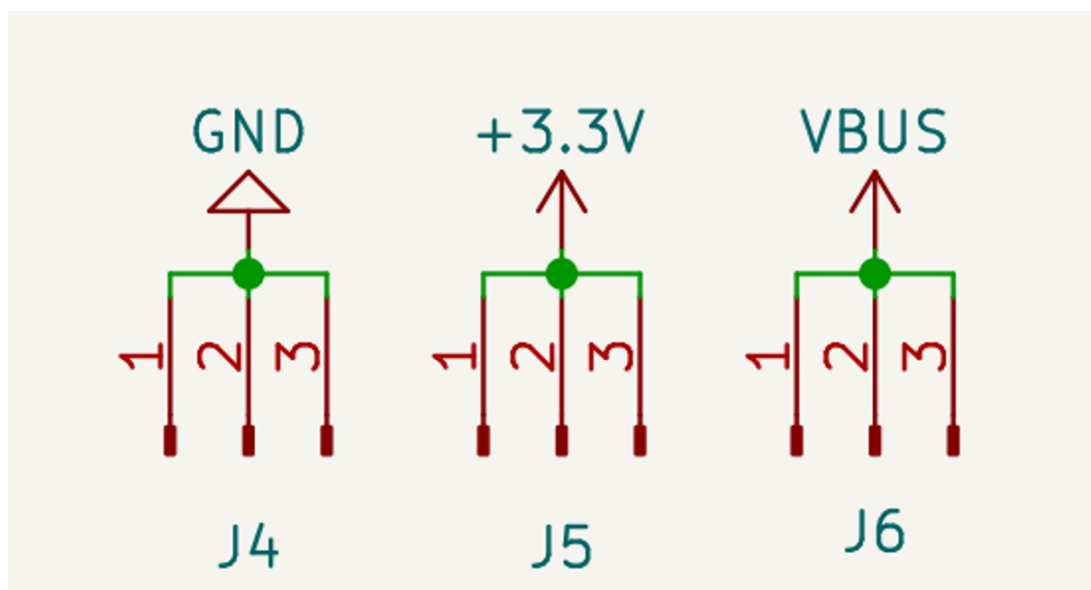
- Az FTDI232 VCC kimenete. Ami alítható 3V3 és 5V között a FTDI232 module-on egy jumper-el.
- Az EXT PWR csatlakoztatón, amit biztonság kedvéért raktam hozzá az áramkörhöz, ha szükséges lenne a jövőben egy külső táp..

A Jumper-ek úgy vannak megtervezve, hogy bármijeik 5V-od bemenet szolgálhasson tápként a NYÁK-nak meg a hozzá csatolt memória module-oknak. De a tervezett legtöbbet használt konfiguráció az a FTDI232 VCC kimenetét használja az 5V módban. Ilyenkor persze a JP13 jumper két pin-je közösítve kell, hogy legyen, hogy a TINY FPGA megkapja a 5V tápot.



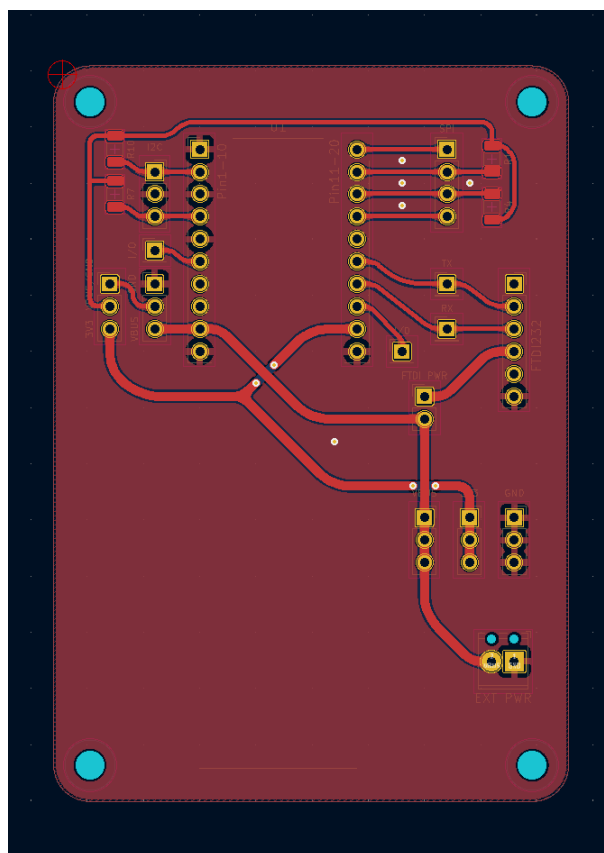
3.8. ábra. VCC és VBUS közösítő jumper

A NYÁK-on ki van vezetve 3-3 pin-en a GND, 3V3, és a VBUS. Ezek a csatlakozók tápként szolgálnak a csatlakoztatott memória module-oknak, illetve mérés pontoknak is alkalmasak.



3.9. ábra. Fontos feszültségek és a GND kivezetése

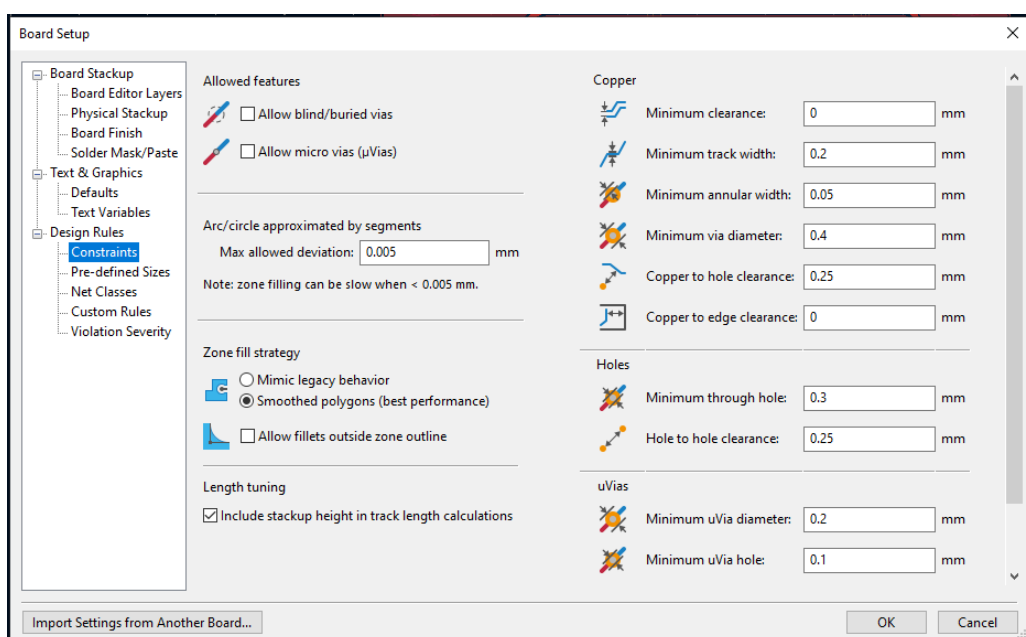
NYÁK tervezés



3.10. ábra. A programozó NYÁK-ja

Ez a végleges NYÁK terv, ez az a design, aminek gyártását megrendeltem. Egy két réteges egyszerű nyák. De egy ilyen egyszerűbb NYÁK tervezése közben fontos betartani az alapszabályokat.

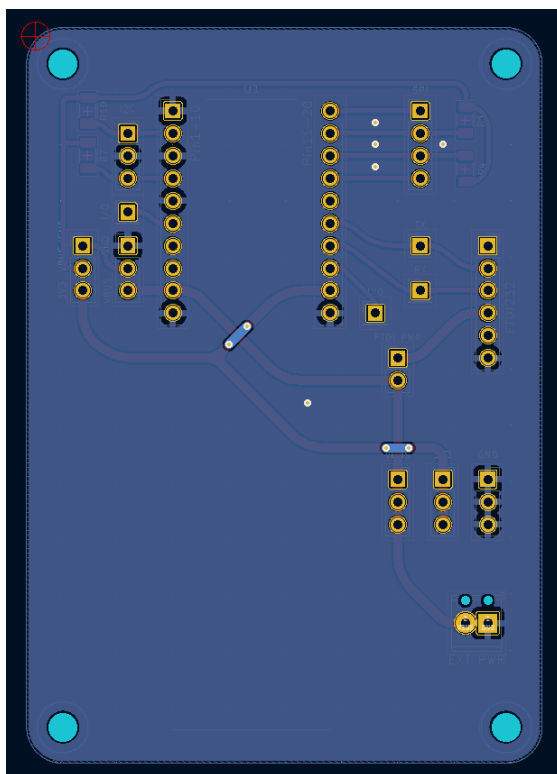
Tervezés előtt érdemes beállítani azokat a limiteket, amiket a NYÁK gyártó cég képes gyártani. Ha tudjuk, hogy melyik céget akarjuk használni, akkor a weboldalukon megtalálhatjuk az értékeket. A limiteket a Board Setup funkcióval lehet megadni. Ha jól meg vannak adva az értékek akkor a KiCad nem enged olyan nyákot tervezni, amit nem tud a NYÁK gyártó cég legyártani. Az én esetemben:



3.11. ábra. KiCad limit beállítások

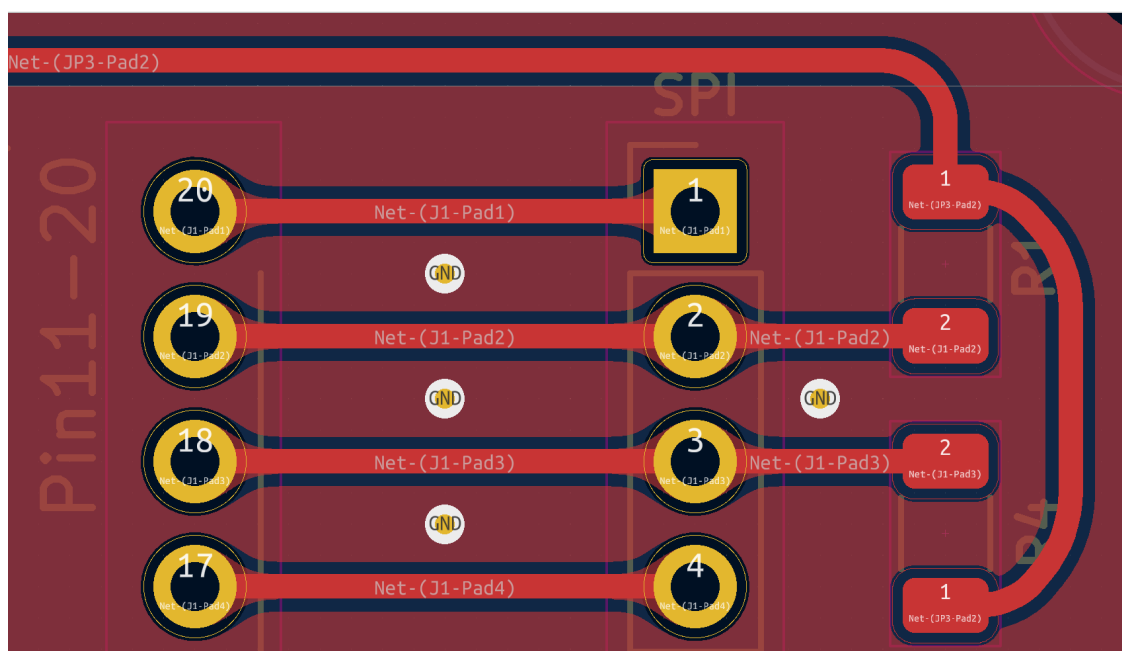
A NYÁK alsó rétege

A hátsó réteg itt egyszerű. Az egész egy GND réteg, minél kevesebb megszakítással, hogy minimalizálva legyenek az áram visszaútviai, ez ezáltal az áram hurkok területe is.



3.12. ábra. A NYÁK alsó rétege

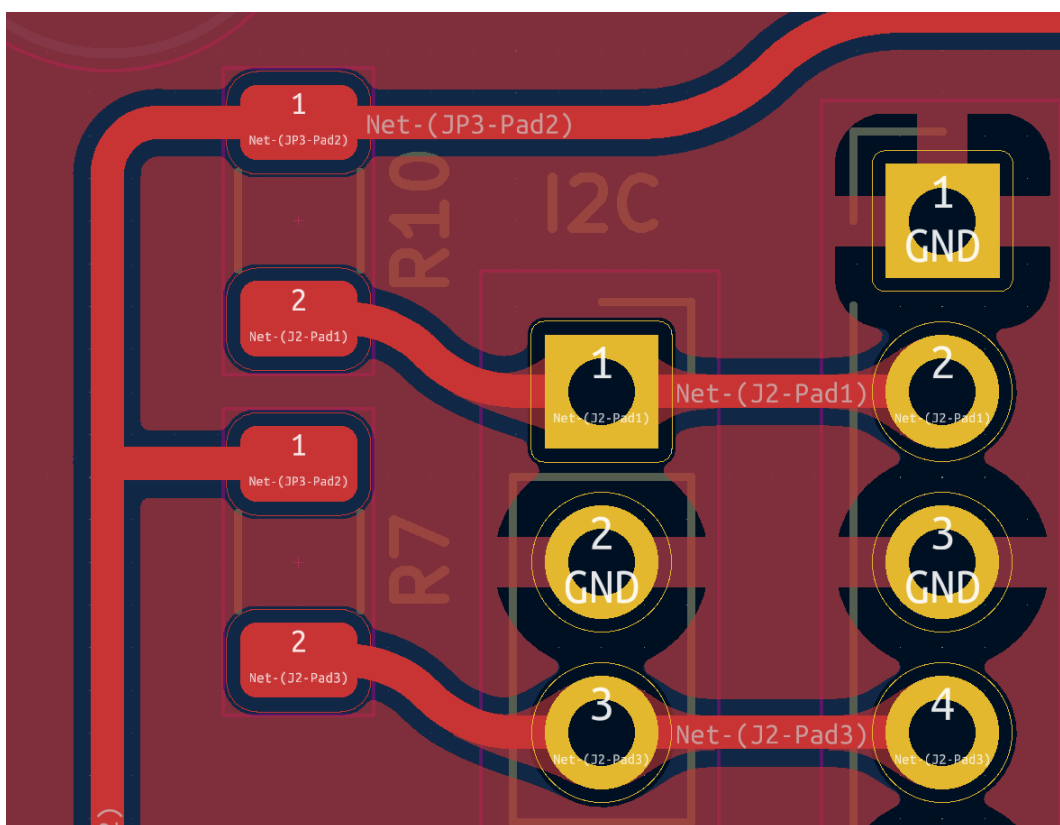
Az SPI csatlakozó



3.13. ábra. SPI kimenet

Kissé túl van tervezve az SPI csatlakozó, hiszen nem óriási frekvenciákon használom. De a túl tervezés ebben az esetben nem árt. A chip select, MISO, MOSI, és CLK vonalak mind ugyan olyan hosszúak. Ezt „length matching” nek hívjuk. Akkor fontos, ha akkora az adatátviteli alap frekvencia, hogy két vonal hossz különbségéből származó kettő közötti fázistolás gondot okoz a mintavételezésnél. A vonalak egymástól GND-vel le vannak árnyékolva, ez segíti, hogy a vonalak elektromágneses zaja kevésbé befolyásolják egymást.

Az I2C csatlakozó

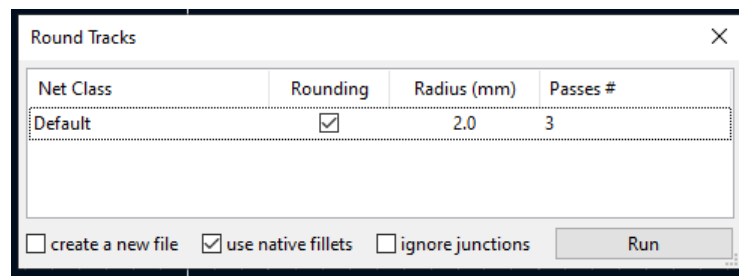


3.14. ábra. I2C kimenet

Itt is inkább túl terveztem a kimenetet, mint alul. Itt is a SCL és SDA vonal „length match”-elve van. Illetve az árnyékolást még a csatlakozókra is kiterjed. Így egészen a FPGA pin-ekhez az árnyékolást végig lehet vinni ha a SCL és SCL-hez tartozó lábak közötti lábat logikai '0'-ra alítom.

Plugin-ek

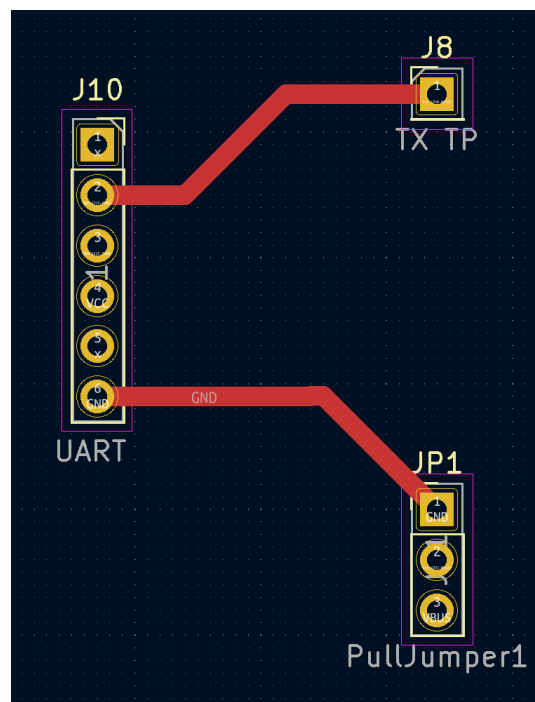
Én két plug-in-t használtam. Az egyik a rounded tracks plug-in. Ami igazából csak esztétikai változásokat kreál a nyákon. A plugin-t nagyon egyszerű használni. A következő kép a UI-ja.



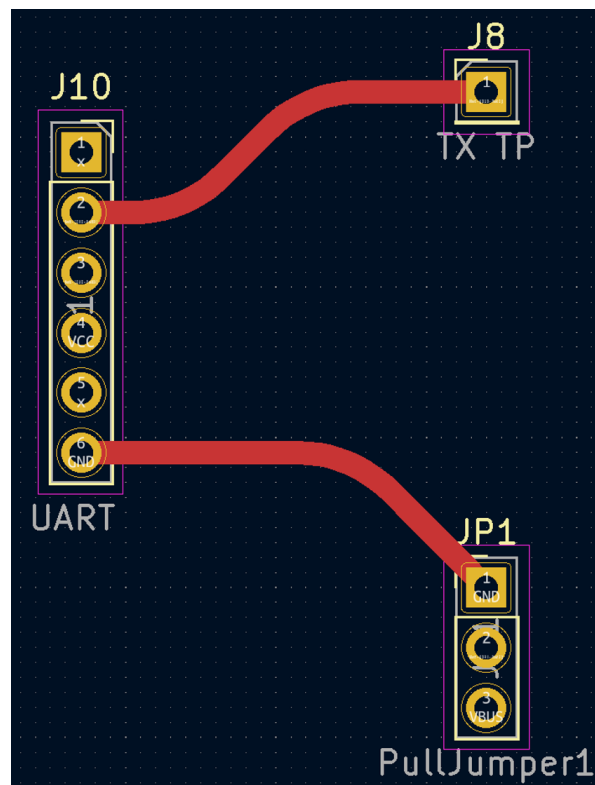
3.15. ábra. A rounded tracks plugin UI-ja

A UI egyszerű. Netlista ként ki lehet választani, hogy kerekítse a plugin a netlistához tartozó trace-eket vagy nem. Ki lehet választani célzott rádiuszt, illetve, hogy hányszor fusson a program. A Run gombbal kell elindítani.

Ezek pedig arról képek hogy hogyan néz ki egy trace a plugin használata előtt és utána Előtte:

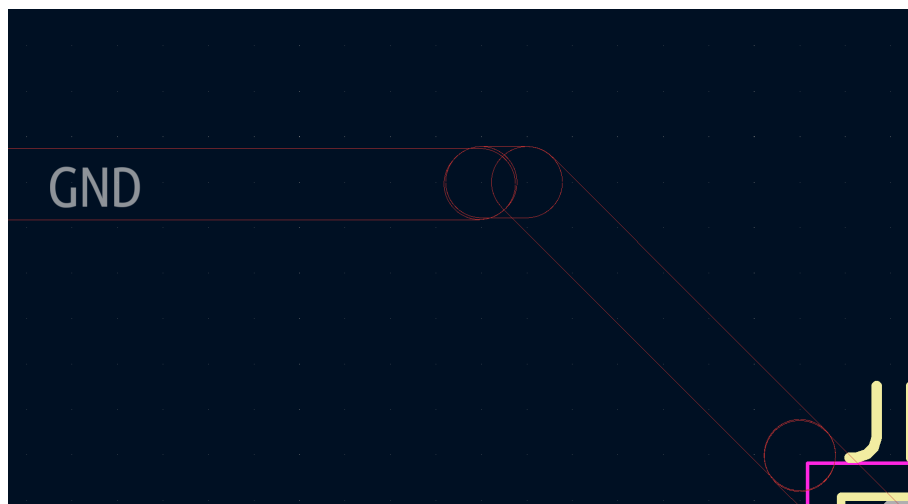


3.16. ábra. Egy trace a plugin használata előtt



3.17. ábra. Egy trace a plugin használata után

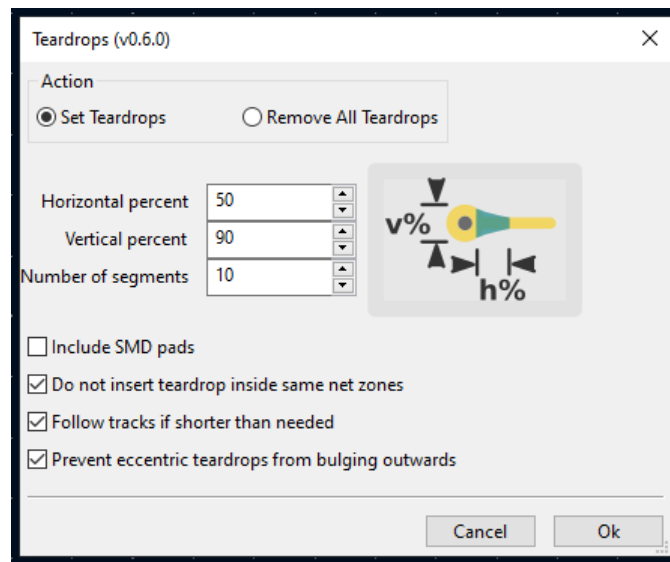
Fontos hogy a plugin használata előtt nézzük át a tarce-einket. A plugin nem működik jól, ha túl sok elemre bontott csúnyán tervezett trace-et akarunk kerekíteni.



3.18. ábra. Példa egy csúnyán tervezett trace-re

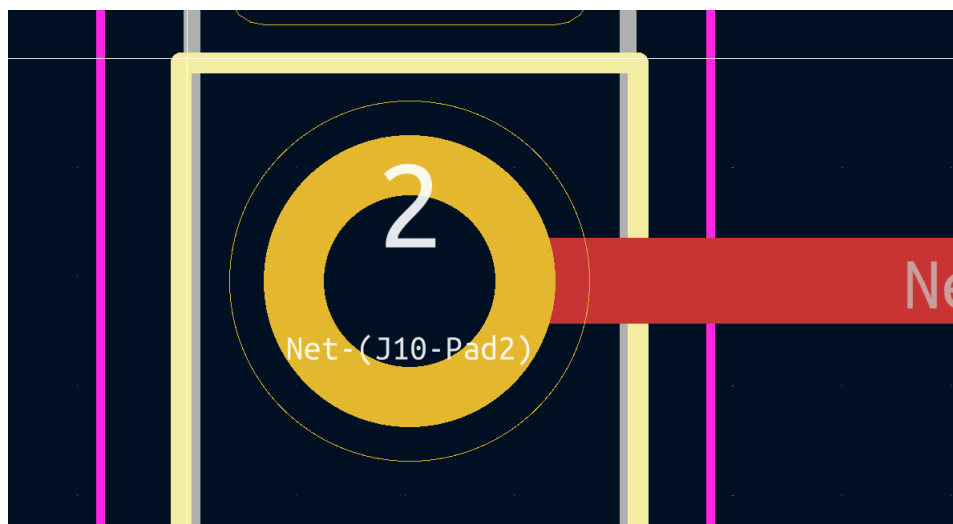
A másik plug-in pedig a Teardrop vias plug in. Ez is egy egyszerű plug-in ami rész-

ben Esztétikailag szépíti a nyák tervet, de fontos, hogy az éles sarkokat minimalizálja is. Hiszen az éles sarkok savcsapdákat okozhatnak, ahol a maratáshoz használt savak egy része megmarad, és az éles sarkoknál tovább korrodálja a rezet. A következő kép a UI-ja.

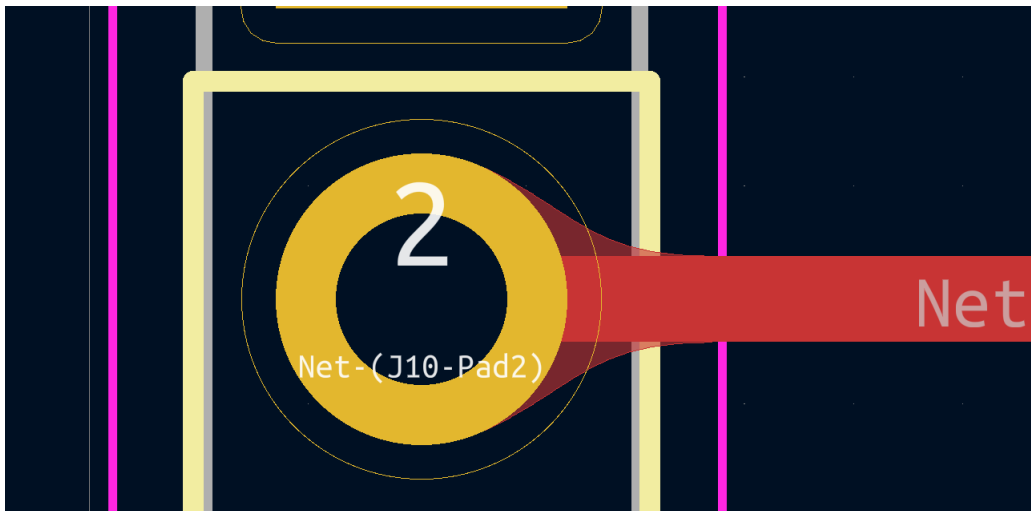


3.19. ábra. Teardrop vias UI

Ez pedig arról kép hogy hogyan néz ki egy via a plugin használata előtt és utána.



3.20. ábra. Teardrop plugin használata előtt



3.21. ábra. Teardrop plugin használata után

3.3. A Programozó entitásai

A következőkben bemutatom az al-entitásokat, amiket használtam a programozóban. Mindet én terveztem és írtam meg, kivéve az Int_Osc entitást, amit az FPGA-m gyártója által adott módon írtam meg.

3.3.1. A Int_Osc entitás

Az Int_Osc egy belső oszcillátor modult valósít meg, amely egy órajelet generál a rendszer számára. Ez a modul a MachXO2 FPGA belső oszcillátorát használja, amely egy konfigurálható frekvenciájú órajelet biztosít.

Az Int_Osc entitás két portot tartalmaz:

- StdBy (in std_logic): Ez a bemeneti jel az oszcillátor készenléti (standby) állapotát vezérli. Ha a jel aktív, az oszcillátor leáll, és nem generál órajelet. Ha inaktív, az oszcillátor működik és órajelet generál.
- Clk (out std_logic): Ez a kimeneti jel az oszcillátor által generált órajelet biztosítja a rendszer többi részének.

Az architektúra az FPGA belső oszcillátorát (OSCH komponens) használja. Az OSCH komponens a következőket tartalmazza:

- **NOM_FREQ** (generikus paraméter): Az oszcillátor névleges frekvenciáját határozza meg. Az alapértelmezett érték itt "9.17", ami 9,17 MHz-es órajelet jelent.
- **STDBY** (bemenet): Az oszcillátor készenléti állapotát vezérli.
- **OSC** (kimenet): Az oszcillátor által generált órajel.
- **SEDSTDBY** (kimenet): Egy diagnosztikai jel, amely az oszcillátor készenléti állapotát jelzi (ebben az implementációban nem használják).

Az architektúra a következőképpen működik:

1. Az OSCH komponens egy példányát (OSCInst0) hozza létre.
2. A **NOM_FREQ** generikus paraméter értéke "9.17", amely meghatározza az oszcillátor frekvenciáját. Ez választhatóan módosítható a tervező által.
3. A **STDBY** bemenet az Int_Osc entitás StdBy portjához van kötve.
4. Az **OSC** kimenet az Int_Osc entitás Clk portjához van kötve.

Az Int_Osc modul a rendszer órajelének biztosítására szolgál. Az óra jelet a rendszer összes része használja a szinkron működéshez.

Az órajel sebességének választása

A FPGA belső órajel sebességét adott értékekből lehet választani. Az FPGA termékcsalád adatlapja szerint ezek a sebességek közül lehet:

MCLK (MHz, Nominal)	MCLK (MHz, Nominal)	MCLK (MHz, Nominal)
2.08 (default)	9.17	33.25
2.46	10.23	38
3.17	13.3	44.33
4.29	14.78	53.2
5.54	20.46	66.5
7	26.6	88.67
8.31	29.56	133

3.22. ábra. Elérhető CLK-frekvenciák az FPGA adatlapja alapján [1]

Az óra jelet úgy kell választani, hogy elég gyors legyen, hogy a design megoldja a feladatot amire tervezve lett. Gyorsabbra nem érdemes, mert az felesleges slack problémákhoz vezethet.

A programozóban az órajelnek legalább 4-szer gyorsabbnak kell lennie, mint a célzott I2C órajel sebessége, mert az I2C órajelenként 4 műveletet végzik a I2C entitás. És 2 szer gyorsabbnak, mint a célzott SPI órajel, mert az SPI órajelenként 2 műveletet végzik a SPI entitás. Az én célzott I2C órajelsebességem 500kHz és 1MHz között van, mert a legtöbb modern EEPROM képes 1MHz órajelsebességre, és ki szeretném használni ezt a sebességet. Az SPI célsebesség pedig 5MHz körül van, hasonló okok miatt.

A programozóm UART-ot is használ, amint előbb volt tárgyalva, egy aszinkron kommunikációs protokoll. Ez azt jelenti, hogy a belső óra jelet úgy kell választani, hogy jól leosztható legyen a megcélzott baud rátához. Tegyük fel, hogy a célzott baud ráta 23040. Ha a belső órajel 2.46MHz akkor az órajelosztó számlálónak 11-ig kell számolnia, mivel $230400\text{baud}/2.46\text{MHz} = 10.68$. Egy órajel számláló csak egész számokkal tud számolni. így minden egyes periódus alatt fél óra jelet késne a belső UART számláló a tényleges 230400 baud-hoz. Úgy kellett választanom az óra jelet, hogy minimális kerekítéssel le lehessen osztania és ez a késés minimális legyen. A célzott AURT sebesség 576000 baud.

Ezek miatt választottam a 9.17MHz-t belső órajelnek. Így a UART osztó hiba 0.08 órajel per baud periódus. A I2C maximum sebessége 2.29MHz. Az SPI Max sebessége 4.59MHz.

3.3.2. A write8bit entitás

A write8bit e8 bites adat írására szolgál az SPI vonalokon. Az entitás bemeneti és kimeneti portjai a következők:

Portok:

- iCS: Bemeneti vezérlőjel, amely az írási folyamat indítását jelzi ('0' értékkel aktiválódik).
- cs: Kimeneti vezérlőjel, amely az írási folyamat állapotát jelzi ('1' az alapértelmezett érték).
- Clk: Órajel bemenet, amely az állapotgép működését vezérli.
- Done: Kimeneti jel, amely az írási folyamat befejezését jelzi ('1' az alapértelmezett érték).
- bit8SCL: Órajel kimenet a soros kommunikációhoz ('1' az alapértelmezett érték).
- nReset: Reset bemenet, amely az állapotgépet alaphelyzetbe állítja ('0' értékkel aktiválódik).
- bit8SDA: Adat kimenet a soros kommunikációhoz ('1' az alapértelmezett érték).
- SDA_data: 8 bites adat bemenet, amelyet a modul sorosan továbbít.

A write8bit entitás egy állapotgépet tartalmaz, amely három állapotból áll:

1. Idle: Alapértelmezett állapot, ahol az órajel (bit8SCL) és az adatvonal (bit8SDA) magas szinten van, és a Done jel aktív ('1'). Ha az iCS bemenet alacsony szintre kerül ('0'), az állapotgép a write8 állapotba lép.
2. write8: Az adat írásának állapota. Az adatot a SDA_data bemenetről bitenként továbbítja a bit8SDA kimenetre. Az írási folyamatot a BitIndex számláló vezérli, amely 0-tól 7-ig számol. Ha az összes bitet elküldte, az állapotgép a stop állapotba lép.

3. stop: Az írási folyamat lezárása. A cs jel visszaáll magas szintre ('1'), és az állapotgép visszatér az Idle állapotba.

Az állapotgép működését az órajel (Clk) vezérli, és az nReset bemenet bármikor alaphelyzetbe állíthatja. A Main entitásban ez az entitás felelős az egyszerű csupán 8 bites egyirányú (MOSI) SPI kommunikációkért.

3.3.3. UART_TX entitás

A UART_TX az UART protokoll szerinti adatküldést valósítja meg. Ez a modul soros adatátvitelre szolgál, ahol a bemeneti adatokat bitenként továbbítja egy kimeneti vonalon

Portok:

- TXData: 8 bites bemeneti adat, amelyet a modul sorosan továbbít.
- Clk: Órajel bemenet, amely az állapotgép működését vezérli.
- SendTX: Bemeneti vezérlőjel, amely az adatküldés indítását jelzi ('1' értékkel aktiválódik).
- TXDone: Kimeneti jel, amely az adatküldés befejezését jelzi ('1' az alapértelmezett érték).
- nReset: Reset bemenet, amely az állapotgépet alaphelyzetbe állítja ('0' értékkel aktiválódik).
- TXOut: Kimeneti adatvonal, amelyen a soros adatátvitel történik.
- TXActive: Kimeneti jel, amely az adatküldés aktív állapotát jelzi ('1', ha a modul éppen adatot küld).

Generikus paraméter:

- ClkRatio: Az órajel osztására szolgáló paraméter, amely meghatározza az UART adatátviteli sebességét (baud rate).

A UART_TX entitás egy állapotgépet tartalmaz, amely az UART adatküldési folyamatát valósítja meg. Az állapotgép az alábbi állapotokból áll:

1. Idle: Alapértelmezett állapot, ahol a modul várakozik a SendTX jel aktiválására. Az órajel számláló (ClkCount) nullázódik, és a kimeneti vonal (TXOut) magas szinten van ('1').
2. StartBit: Az adatküldés kezdő bitje ('0') kerül a kimeneti vonalra. Az órajel számláló növekszik, és ha eléri a ClkRatio értéket, az állapotgép a DataBits állapotba lép.
3. DataBits: Az adatbitek soros továbbítása történik. A TXData bemenet bitjeit a BitIndex számláló segítségével küldi ki a modul. Ha az összes bit elküldésre került, az állapotgép a StopBit állapotba lép.
4. StopBit: Az adatküldés záró bitje ('1') kerül a kimeneti vonalra. Az órajel számláló növekszik, és ha eléri a ClkRatio értéket, az állapotgép a FrameEnd állapotba lép.
5. FrameEnd: Az adatküldés befejeződik, a TXActive jel inaktívvá válik ('0'), és a TXDone jel aktívvá válik ('1'). Az állapotgép visszatér az Idle állapotba.

Az állapotgép működését az órajel (Clk) vezérli, és az nReset bemenet bármikor alaphelyzetbe állíthatja.

3.3.4. A UART_RX entitás

A UART_RX entitás a protokoll szerinti adatfogadást valósítja meg. Ez a modul soros adatokat fogad egy bemeneti vonalon, és azokat párhuzamos formátumba alakítja.

- Clk: Órajel bemenet, amely az állapotgép működését vezérli.
- RXIn: Soros adat bemenet, amelyen keresztül az UART adatokat fogadja.
- Ack: Bemeneti vezérlőjel, amely az adatfogadás befejezésének visszaigazolására szolgál.

- RXData: 8 bites kimeneti adat, amely a fogadott adatot tartalmazza.
- RXDataReady: Kimeneti jel, amely az adatfogadás befejezését jelzi ('1' értékkel aktiválódik).
- nReset: Reset bemenet, amely az állapotgépet alaphelyzetbe állítja ('0' értékkel aktiválódik).
- RXActive: Kimeneti jel, amely az adatfogadás aktív állapotát jelzi.

Generikus paraméterek:

- ClkRatio: Az órajel osztására szolgáló paraméter, amely meghatározza az UART adatátviteli sebességét (baud rate).
- CRHalf: Az órajel osztásának felezett értéke, amely a bitközép detektálására szolgál.

A UART_RX entitás egy állapotgépet tartalmaz, amely az UART adatfogadási folyamatát valósítja meg. Az állapotgép az alábbi állapotokból áll:

1. Idle: Alapértelmezett állapot, ahol a modul várakozik az adatfogadás kezdetére. Ha a RXIn jel alacsony szintre kerül ('0'), az állapotgép a StartBit állapotba lép.
2. StartBit: Az adatfogadás kezdő bitjének ('0') detektálása történik. Az órajel számláló (ClkCount) növekszik, és ha eléri a ClkRatio értéket, az állapotgép a DataBits állapotba lép.
3. DataBits: Az adatbitek fogadása történik. A RXIn bemenet bitjeit a SData regiszterbe menti a modul, a BitIndex számláló segítségével. Ha az összes bitet fogadta, az állapotgép a StopBit állapotba lép.
4. StopBit: Az adatfogadás záró bitjének ('1') detektálása történik. A RXDataReady jel aktívvá válik ('1'), jelezve, hogy az adat fogadása befejeződött. Ha az Ack jel aktív ('1'), az állapotgép visszatér az Idle állapotba.

Az állapotgép működését az órajel (Clk) vezérli, és az nReset bemenet bármikor alaphelyzetbe állíthatja.

3.3.5. A writePage entitás

A writePage entitás a komplexebb SPI kommunikációkat kezeli. A neve writepage maradt, mert eredetileg a tervem az volt, hogy két entitást csinállok. Egy entitást, ami az SPI írásért felelős, egy pedig ami az olvasásért felelős. De végül egyszerűbb volt egy entításban megvalósítani mind két funkciót. Ez az entitás azért is komplexebb mert, eltérően a write8bi-től képes a kommunikációs protokoll kerete hosszán alítani.

Portok:

- iCS: Bemeneti vezérlőjel, amely az adatátviteli folyamat indítását jelzi ('0' értékkel aktiválódik).
- RW: Bemeneti jel, amely az írási ('0') vagy olvasási ('1') műveletet határozza meg.
- Rdy: Kimeneti jel, amely az adatátviteli folyamat készenlétét jelzi ('1' az alapértelmezett érték).
- cs: Kimeneti vezérlőjel, amely az adatátvitel állapotát jelzi ('1' az alapértelmezett érték).
- from_SDO: Bemeneti adatvonal, amelyen keresztül az olvasott adat érkezik.
- Done: Kimeneti jel, amely az adatátviteli folyamat befejezését jelzi ('1' az alapértelmezett érték).
- toSCL: Órajel kimenet a soros kommunikációhoz ('1' az alapértelmezett érték).
- nReset: Reset bemenet, amely az állapotgépet alaphelyzetbe állítja ('0' értékkel aktiválódik).
- toSDA: Adat kimenet a soros kommunikációhoz ('1' az alapértelmezett érték).
- MISO_DR: Kimeneti jel, amely az olvasási művelet befejezését jelzi.
- next8bits: 8 bites bemeneti adat, amelyet a modul írni fog.

- read8bits: 8 bites kimeneti adat, amely az olvasott adatot tartalmazza.
- RW_length: Az SPI művelet teljes hosszát meghatározó bemeneti paraméter (bájtokban).
- RH_length: Az olvasási művelet címző keret hosszát meghatározó bemeneti paraméter (bájtokban).

Az állapotgép működését az órajel (Clk) vezérli, és az nReset bemenet bármikor alap helyzetbe állíthatja. Az állapotgép négy fő állapotot tartalmaz:

With DataFromRX select

```
StateHolder <=  "001" when "01000001", -- (ascii A) SPI configure
                "010" when "01000010", -- (ascii B) SPI read
                "011" when "01000011", -- (ascii C) SPI write
                "100" when "01000100", -- (ascii D) Get settings
                "101" when "01000101", -- (ascii E) I2C read
                "110" when "01000110", -- (ascii F) I2C write
                "000" when others;      -- () base state
```

3.4. First section

3.5. Second section

4. fejezet

Probléma tárgyalása

Lorem ipsum dolor sit amet,

4.1. A Section

Quisque tristique.

4.1.1. A Subsection

A Subsection

Donec urna leo,

4.2. Another Section

Phasellus nisi quam,

4.3. Alfejezet

Kezdődik a tényleges szöveg.. És íme, egy képlet

$$Q = \frac{r^4 \cdot \pi \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot L} \quad (4.1)$$

Kezdődik a tényleges szöveg. Kezdődik a tényleges szöveg, jön a mondanivaló, kifejtése a dolgoknak.... Kezdődik a tényleges szöveg, jön a mondanivaló, kifejtése a dolgoknak....

Ilyen egy felsorolás:

- első sor
- második sor

Kezdődik a tényleges szöveg. Kezdődik a tényleges szöveg, jön a mondanivaló, kifejtése a dolgoknak.... Kezdődik a tényleges szöveg, jön a mondanivaló, kifejtése a dolgoknak....

És íme, még egy képlet

$$Q = \frac{r^4 \cdot \pi \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot L} \quad (4.2)$$

A 4.2. összefüggés az [?] szerzőtől származik.

Összefoglalás

A Melléklet

Irodalomjegyzék

- [1] [A MachXO2 FPGA család adatlapja](#)