

FPGA alapú rendszerek fejlesztése

Gyakorlat útmutató

2023.

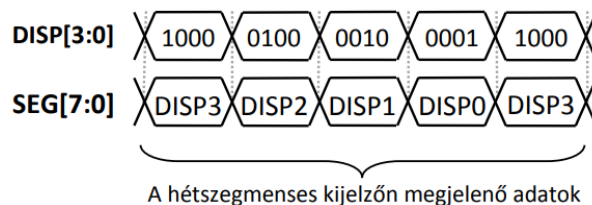
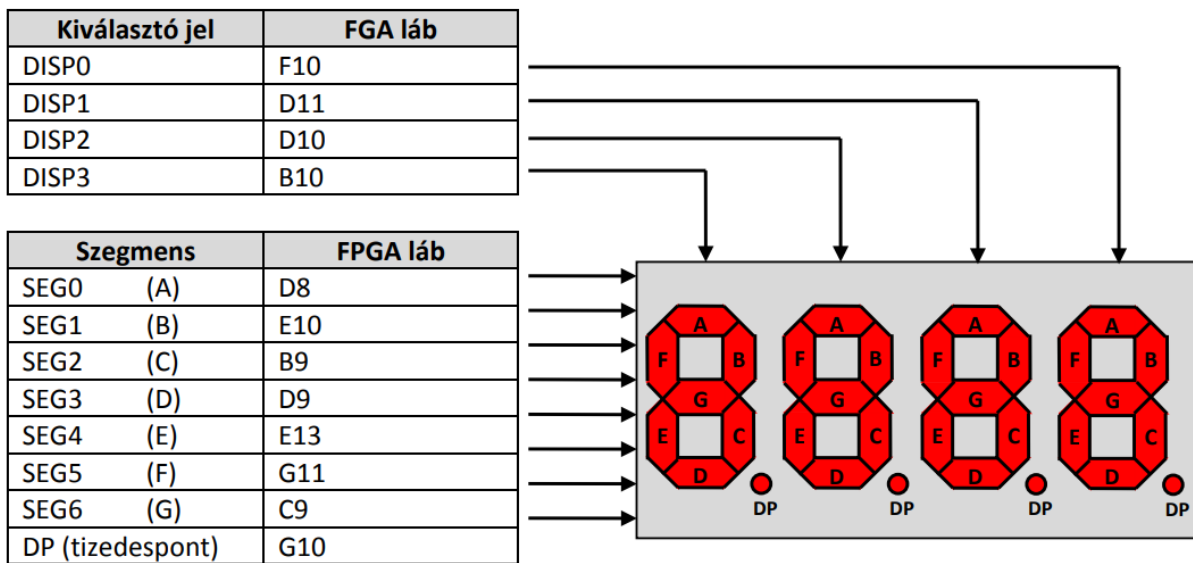
Tartalom

1	Vivado bevezető – 7-segmenses vezérlő	2
2	Audió CODEC illesztése.....	4
3	Audio FIR szűrő.....	11
4	RGB → Y átalakítás + logikai analízátor.....	14
4.1	Videó formátum	14
4.2	RGB → Y átalakítás	14
4.3	Logikai analízátor (ChipScope)	15
5	IP alapú fejlesztés a Vivado-ban.....	18
5.1	MicroBlaze processzoros alarendszer	18
5.2	Egyszerű szoftver alkalmazás készítése.....	23
6	Saját periféria illesztése.....	26

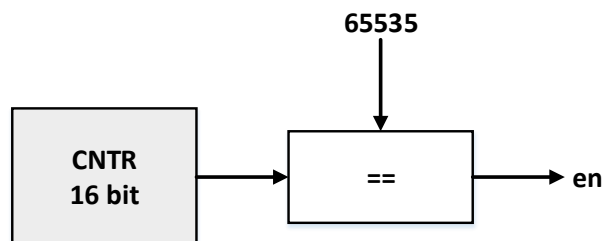
1 Vivado bevezető – 7-szegmenses vezérlő

Vezette mérés, amelyen egy 7-szegmenses kijelző vezérlőjének implementációján keresztül megismerkedünk a Xilinx Vivado fejlesztői környezettel.

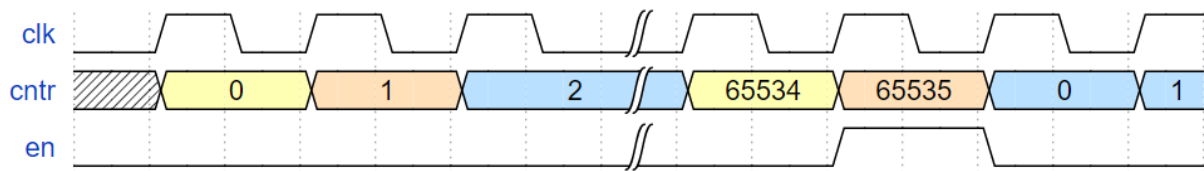
A Logsys Kintex-7 kártyán egy 4-digites, időmultiplexált 7-szegmenses kijelzőt találunk. Ennek vezérléséhez az FPGA és a kijelző között 4 digit engedélyező jelet (DSIP0...DSIP3), valamint egy 8 bites szegmens buszt találunk (SEG0...SEG7, DP). Az időmultiplexálás azt jelenti, hogy a szegmens jelek minden digitre közösek, így adott időpillanatban mindig csak egyetlen digit aktív. A szegmens vonalakra mindig az aktív digiten megjeleníteni kívánt érték szegmens kódjait adjuk. A digitek közötti váltásnak elég gyorsnak kell lennie ahhoz, hogy a szemünk ne érzékelje ezt (>60 Hz), de elég lassúnak ahhoz, hogy a 7-szegmenses vezérlő LED-jei megfelelően működjenek. Megfelelő választás a kHz nagyságrendű váltás.



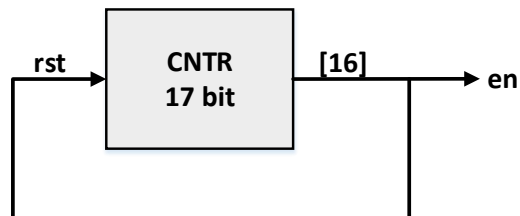
Az FPGA órajel forrása 100 MHz frekvenciájú, ahhoz hogy a megfelelő frekvenciájú jelváltásokat generálni tudjuk, egy ~kHz frekvenciájú engedélyező jelre van szükség, ami az órajelnek 100.000-ed része. Mivel nem kritérium pontosan 1 kHz-es frekvencia előállítása, így az egyszerűség kedvéért a legközelebbi kettő hatvánnyal, 65.536-tal osztunk. Ezt legegyszerűbben egy 16 bites számlálóval tehetjük meg:



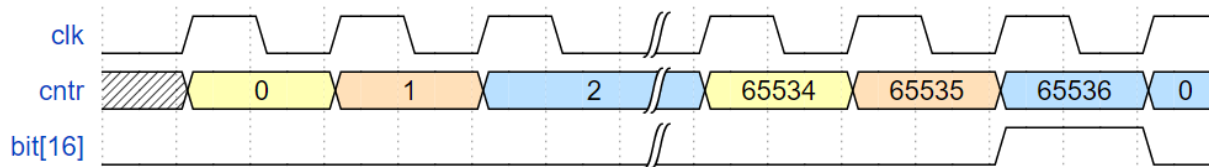
A generált hullámforma:



A fenti blokkvázlatban szerepel egy 16 bites komparátor, ami elhagyható amennyiben a számlálót 17 bitesre egészítjük ki, és a számlálót reset-eljük amikor a legfőbb bitje 1.



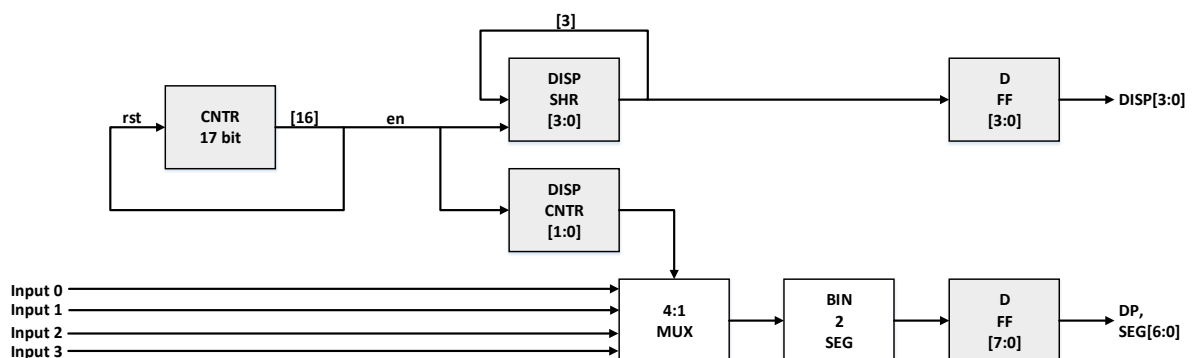
Az így létrejövő hullámforma:



A megfelelő frekvenciájú engedélyező jel generálása mellett az alábbi komponensekre van szükség:

- 4 bites visszacsatolt shift regiszter a DISP[3:0] jel generálásához. Periodikusan a 0001→0010→0100→1000→0001... értékeket veszi fel.
- 2 bites számláló, amely a DISP shift regiszterrel szinkronban jár, mindig azt mutatja, hogy hányadik digit van kiválasztva.
- 4 bites 4:1 multiplexer, amely a 4 bemeneti adatból kiválasztja az aktív digitnek megfelelőt.
- Bináris → szegmens enkóder, amely a 4 bites bináris értékből előállítja a szegmens kódot, azaz megadja, hogy melyik szegmenseknek kell világítania.

A teljes blokkvázlat tehát:



2 Audió CODEC illesztése

A gyakorlat során egy sztereó audió CODEC (coder-decoder) illesztünk az FPGA-hoz. A megtervezett modul célja, hogy a CODEC-kel történő „alacsony szintű” kommunikációt elrejtse az azt használó tervező mérnök elől, számára egy egyszerű, könnyen használható interfészt biztosítson, amin keresztül a CODEC-ből érkező, illetve a CODEC felé továbbított audió adatok egyszerűen kezelhetők.

Jelen gyakorlat során a CODEC-ből az ADC-vel mintavételezett és kvantált adatokat az FPGA-ban egy regiszteren keresztül visszacsatoljuk és a CODEC DAC-jának bemenetére továbbítjuk (későbbi gyakorlaton a direkt visszacsatolás helyett FIR szűrőt valósítunk meg az FPGA-ban).

A Kintex-7 kártyán található CODEC típusa Cirrus Logic CS4270.

(Adatlap: https://d3uzseaevmutz1.cloudfront.net/pubs/proDatasheet/CS4270_F1.pdf). Beállítástól függetlenül igaz, hogy a CODEC audió interfésze az alábbi jeleket tartalmazza:

- MCLK: CODEC master clock.
- SCLK: bit clock. A soros adatinterfész időzítő jele.
- LRCK: left-right clock. Jobb/bal csatorna kiválasztó jele. Frekvenciája megegyezik a mintavételi frekvenciával.
- SDOUT: Az ADC soros adatkimenete.
- SDIN: A DAC soros adatbemenete.

A CODEC konfigurációjára az alábbi lehetőségeink vannak:

- Stand-alone mód: a konfigurációs lábak megfelelő logikai értékre történő állítása.
- Szoftver mód: SPI vagy I2C interfészen keresztül. A CODEC akkor kerül szoftver módba, ha a nRST bemenet 1-be állítását követően 1.045 mintavételi időn belül érvényes SPI vagy I2C tranzakcióval a „power down” regiszter bitet beállítjuk.

Az egyszerűség kedvéért mi most az első megoldással élünk. A konfiguráció során a következő paramétereket kell beállítanunk.

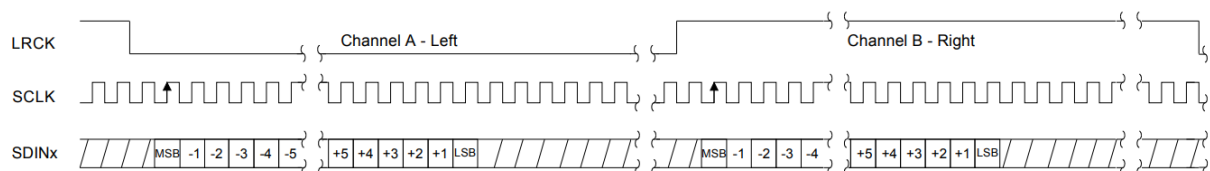
- Slave vagy master mód.
 - Slave módban minden órajel (MCLK, SCLK, LRCK) bemenet a CODEC számára.
 - Master módban az MCLK bemenet, a többi órajelet a CODEC szolgáltatja.
 - Az órajelek elvárt frekvencia-viszonyait az alábbi táblázat mutatja.

Master Mode					
	MCLK/LRCK	SCLK/LRCK	LRCK	MDIV2	MDIV1
Single-Speed	256	64	Fs	0	0
	384 (Note 22)	64	Fs	0	1
	512	64	Fs	1	0
	1,024	64	Fs	1	1
Double-Speed	128	64	Fs	0	0
	192 (Note 22)	64	Fs	0	1
	256	64	Fs	1	0
	512	64	Fs	1	1
Quad-Speed	64	64	Fs	0	0
	96 (Note 22)	64	Fs	0	1
	128	64	Fs	1	0
	256	64	Fs	1	1
Slave Mode					
	MCLK/LRCK	SCLK/LRCK	LRCK	MDIV2	MDIV1
Single-Speed	256	32, 48, 64, 128	Fs	0	0
	384 (Note 22)	32, 48, 64, 96	Fs	0	1
	512	32, 48, 64, 128	Fs	1	0
	1,024	32, 48, 64, 96	Fs	1	1
Double-Speed	128	32, 48, 64	Fs	0	0
	192 (Note 22)	32, 48, 64	Fs	0	1
	256	32, 48, 64	Fs	1	0
	512	32, 48, 64	Fs	1	1
Quad-Speed	64	32, 48, 64	Fs	0	0
	96 (Note 22)	32, 48, 64	Fs	0	1
	128	32, 48, 64	Fs	1	0
	256	32, 48, 64	Fs	1	1

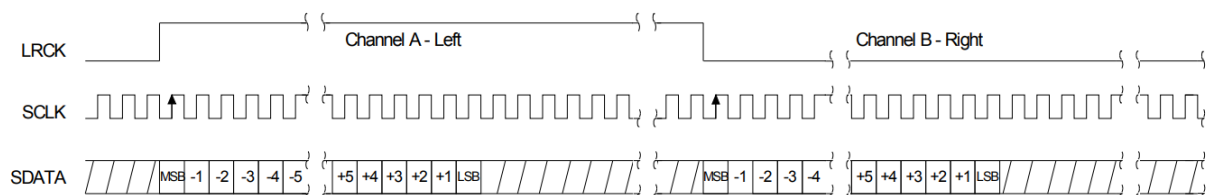
- Single-speed, double-speed vagy quad-speed üzemmód. A beállítandó üzemmódot egyértelműen meghatározza a mintavételi frekvencia.

Mode	Sampling Frequency
Single-Speed	4-54 kHz
Double-Speed	50-108 kHz
Quad-Speed	100-216 kHz

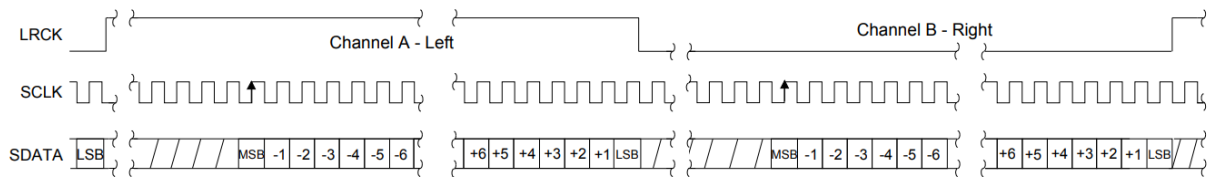
- Audió interfész üzemmódja: I2S, Right-Justified vagy Left-Justified.
 - I2S üzemmód



- Left-Justified üzemmód



- Right-Justified üzemmód (Stand-alone módban nem érhető el!!)



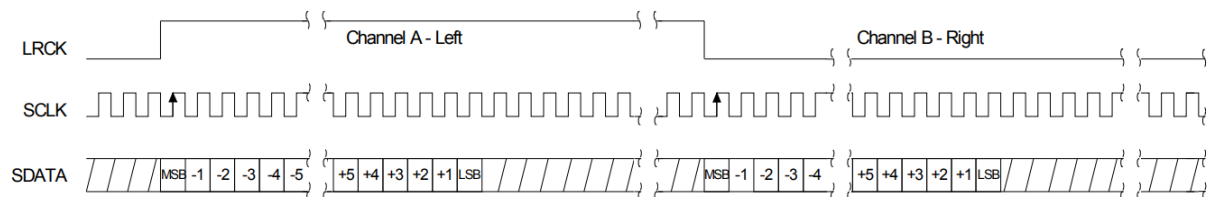
A gyakorlat során az alábbi beállításokkal fogjuk használni a CODEC-t:

- 192 kHz mintavételi frekvencia → Quad mode.
- MCLK/LRCK=256.
- SCLK = 64*FS.
- Stand-alone mód: konfiguráció lábak segítségével.
- Slave mód, azaz minden órajelet az FPGA szolgáltat.
- Left-Justified audió interfész.

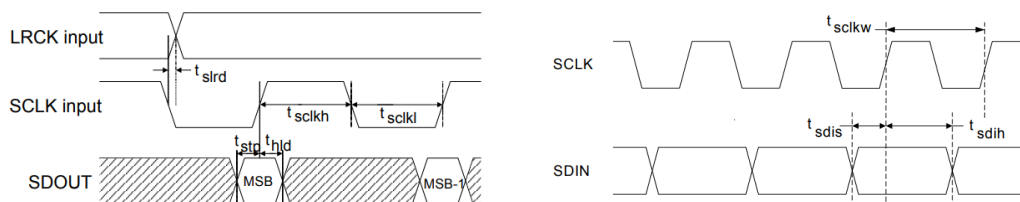
Ehhez az alábbi konfigurációs láb beállítások szükségesek:

- Quad mode: {M1, M0} = 2'b11.
- MCLK/LRCK: {MDIV2, MDIV1} = 2'b11.
- Slave_mód: Az SDOUT lábat le kell húzni (a lehúzó ellenállás megtalálható a NYÁK-on).
- Left-Justified: I2S/LJ lábat 0-ba kell húzni.

A Left-Justified üzemmód időzítési diagramja:



A soros interfész időzítési adatai:



Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Sample Rate	Single-Speed Mode	Fs	4	-	54 kHz
	Double-Speed Mode	Fs	50	-	108 kHz
	Quad-Speed Mode	Fs	100	-	216 kHz
MCLK Specifications					
MCLK Frequency (Note 15)	Stand-Alone Mode	fmclk	1.024	-	55.296 MHz
	Serial Control Port Mode	fmclk	1.024	-	55.296 MHz
MCLK Duty Cycle			40	50	60 ns
Slave Mode					
LRCK Duty Cycle			40	50	60 %
SCLK Period (Note 15)	Single-Speed Mode	t _{sclkw}	$\frac{1}{(128)Fs}$	-	s
	Double-Speed Mode				
	Quad-Speed Mode	t _{sclkw}	$\frac{1}{(64)Fs}$	-	s
		t _{sclkw}	$\frac{1}{(64)Fs}$	-	s
SCLK Duty Cycle			45	50	55 ns
SCLK falling to LRCK edge		t _{slrd}	-20	-	20 ns
SDOUT valid before SCLK rising		t _{stp}	10	-	- ns
SDOUT valid after SCLK rising		t _{hld}	5	-	- ns
SDIN valid to SCLK rising setup time		t _{sdis}	16	-	- ns
SCLK rising to SDIN hold time		t _{sdiH}	20	-	- ns

Megfontolásaink:

- A modul használó tervező mérnök felé egyszerű interfész:
 - CODEC ADC → FPGA irány:
 - A CODEC által küldött párhuzamos adat
 - Mindkét csatornára 1-1 adat érvényes jel, amely 1 rendszer órajel hosszúságú impulzussal jelzi az adat érvényességét.
 - FPGA → CODEC DAC
 - A CODEC felé küldendő párhuzamos adat, illetve az ennek érvényességét jelző bit
 - „Acknowledge” jel, amely jelzi, hogy a modul a felhasználó által szolgáltatott adatot felhasználta.
- A gyakorlaton kb. 192 kHz-es mintavételi frekvencia elérése a cél, az MCLK = 256 * fs beállítást fogjuk használni, azaz MCLK = 256 * 192 kHz = 49,152 MHz.
- A kiszámolt MCLK kétszerese 98,304 MHz, ami igen közel esik a Kintex-7 kártya oszcillátornak 100 MHz-es frekvenciájához. Amennyiben ezt használjuk rendszerórajelként, úgy 195,3125 kHz-es mintavételi frekvencia adódik. Ez ugyan nem szabványos audió frekvencia, de a CODEC szempontjából még megfelelő, így ezt a megoldást fogjuk használni. Ebben az esetben az MCLK a rendszerórajel fele.
- Egy csatorna érvényes adata 24 bit, egy LRCK fél-periódus alatt 32 bit kerül átvitelre. Left-Justified módban az LRCK élt követő első 24 bit az érvényes adat. A teljes LRCK periódus alatt 64 SCLK van, azaz SCLK = 64 * LRCK.
- Összegezve:
 - MCLK = CLK / 2.
 - LRCK = MCLK / 256 = CLK / (256*2)
 - SCLK = LRCK * 64 = CLK / 8
- Az LRCK jel váltása az SCLK váltásával együtt történhet (-20...20 ns tűréssel egybe esnek).

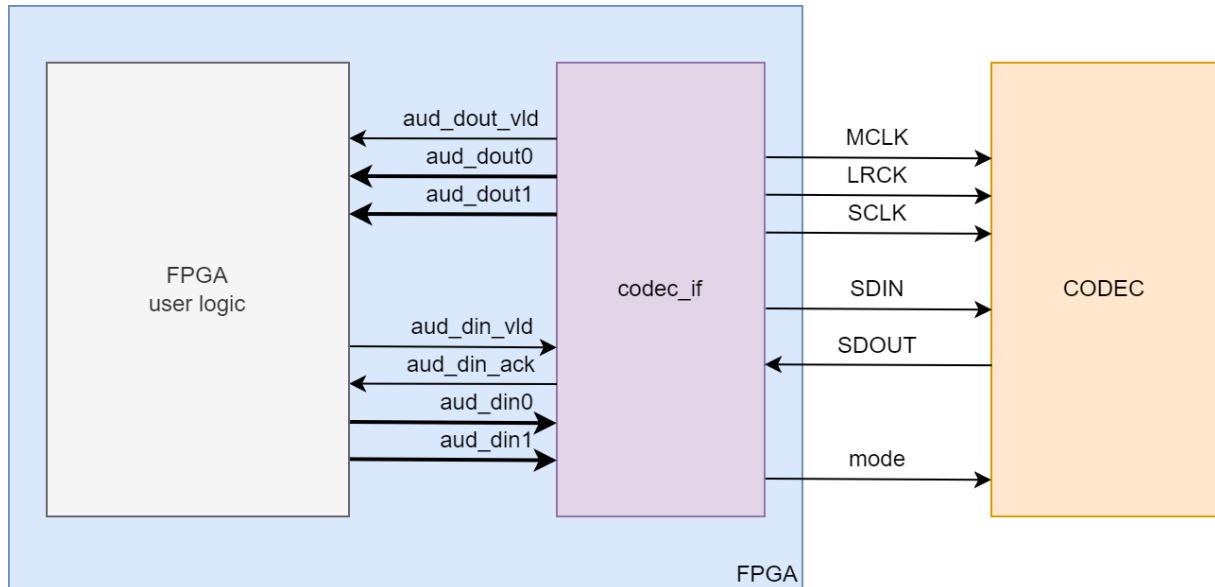
- A DAC az SCLK felfutó élére mintavételezi a bemeneti soros adatot, ezt legalább ezen él előtt 16 ns-mal ki kell adni (setup time), illetve 20 ns-ig még ott kell tartani (hold time). Az SCLK periódusidejének fele ennél jóval nagyobb, így SCLK lefutó éle megfelelő időpont az adatkiadásra.
- A CODEC adatkimenete az SCLK előtt legalább 10 ns-mal már érvényes, utána pedig 5 ns-ig még biztosan érvényes marad, így az SCLK felfutó élére mintavételezhető.
- Észrevehető, hogy minden, a CODEC számára előállított órajel (ezek az FPGA szempontjából NEM órajelek, hanem egyszerű kimeneti jelek) a rendszerórajel (CLK) 2 hatványad része, így ezek egyetlen számláló megfelelő biteinek kivezetésével generálhatók. Konkrétan:
 - $LRCK = CLK / 512 \rightarrow \text{bit}[8]$
 - $SCLK = CLK / 8 \rightarrow \text{bit}[2]$
 - $MCLK = CLK / 2 \rightarrow \text{bit}[0]$
- A bemeneti soros \rightarrow párhuzamos, illetve a kimeneti párhuzamos \rightarrow soros átalakítás megoldható 1-1 shift regiszterrel.
- Szükséges még a két csatornára 1-1 „shift regiszter érvényes” jel (egy rendszer órajel hosszúságú pulzus).
 - Ezek generálhatók az ütemező számláló azon részéből, ami bit számlálóként értelmezhető (0...31 között számol), tehát olyan, mintha a generált SCLK-ra számolna $\rightarrow \text{bit}[7:3]$.
 - Az így generált jel 1 SCLK hosszúságú, ahhoz, hogy ez egyetlen CLK idejű legyen, szükséges feltétel még a SCLK felfutó élét jelző impulzus.
 - Azt, hogy a bemeneti shiftregiszter melyik csatorna adatát tartalmazza, a generált LRCK jelből lehet eldönteni.
- A kimeneti shiftregiszter töltését engedélyező jelet hasonló megfontolások alapján lehet generálni.
- Az FPGA konfigurációja, illetve a globális reset után reset jelet generálunk a CODEC-nek, majd várunk legalább 1.045 mintavételi időt, hogy a CODEC biztosan stand-alone módban legyen és érvényes kimenetet generáljon.

A modul portjai:

- clk: Bemenet; rendszerórajel.
- rst: Bemenet; globális reset, aktív magas.
- codec_m0: Kimenet; CODEC konfigurációs láb.
- codec_m1: Kimenet; CODEC konfigurációs láb.
- codec_i2s: Kimenet; CODEC konfigurációs láb.
- codec_mdiv1: Kimenet; CODEC konfigurációs láb.
- codec_mdiv2: Kimenet; CODEC konfigurációs láb.
- codec_rstn: Kimenet; a CODEC aktív alacsony reset jele.
- codec_mclk: Kimenet; a CODEC MCLK órajele.
- codec_lrclk: Kimenet; a CODEC LRCK órajele.
- codec_sclk: Kimenet; a CODEC SCLK órajele.
- codec_sdin: Kimenet; a CODEC soros adatbemenete.
- codec_sdout: Bemenet; a CODEC soros adatkimenete.
- aud_dout_vld: 2 bites kimenet; a CODEC-től fogadott párhuzamos adat érvényes (mindkét csatornára 1-1 bit), 1 rendszerórajel hosszúságú impulzus
- aud_dout0: 24 bites kimenet; a CODEC-től fogadott párhuzamos adat. Értéke akkor érvényes, ha aud_dout_vld[0] jel 1 értékű.

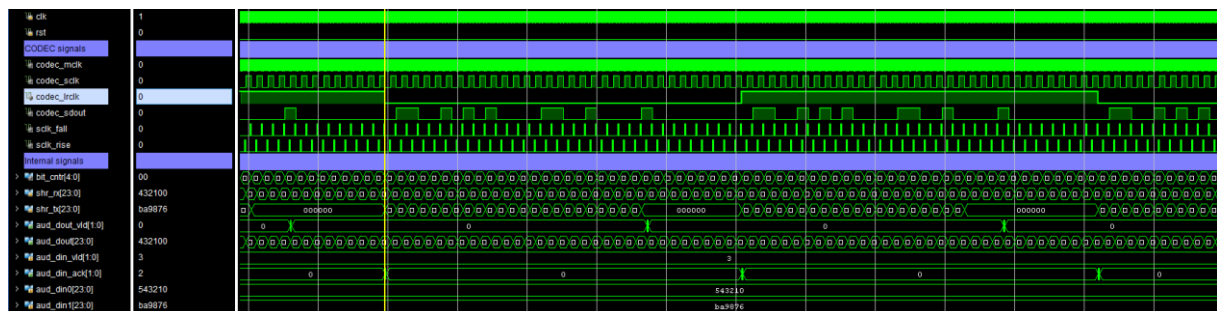
- aud_dout1: 24 bites kimenet; a CODEC-től fogadott párhuzamos adat. Értéke akkor érvényes, ha aud_dout_vld[1] jel értékű.
- aud_din_vld: 2 bites bemenet; DAC bemeneti adat (aud_din0, illetve aud_din1) érvényes.
- aud_din_ack: 2 bites kimenet; azt jelzi, hogy az I2S interfész a megfelelő (0. vagy 1. csatorna) adatot beolvasta.
- aud_din0: 24 bites bemenet; a DAC 0. csatorna párhuzamos adata.
- aud_din1: 24 bites bemenet; a DAC 1. csatorna párhuzamos adata.

A CODEC – FPGA összeköttetés és az FPGA-ban megvalósított interfész (codec_if) blokkvázlata:

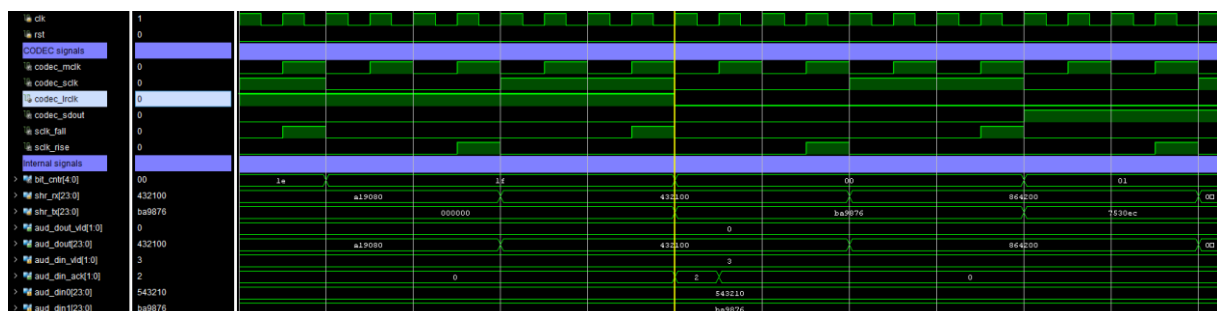


Hullámformák:

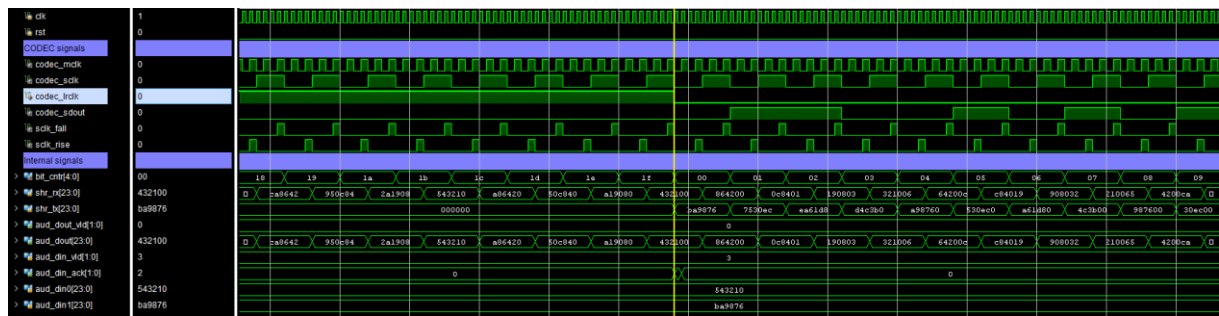
Egy teljes LRC periódus:



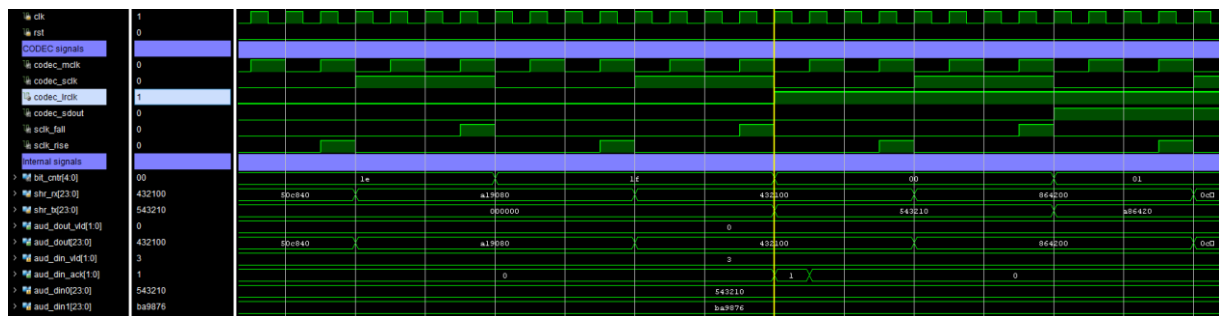
LRC lefutó éle:



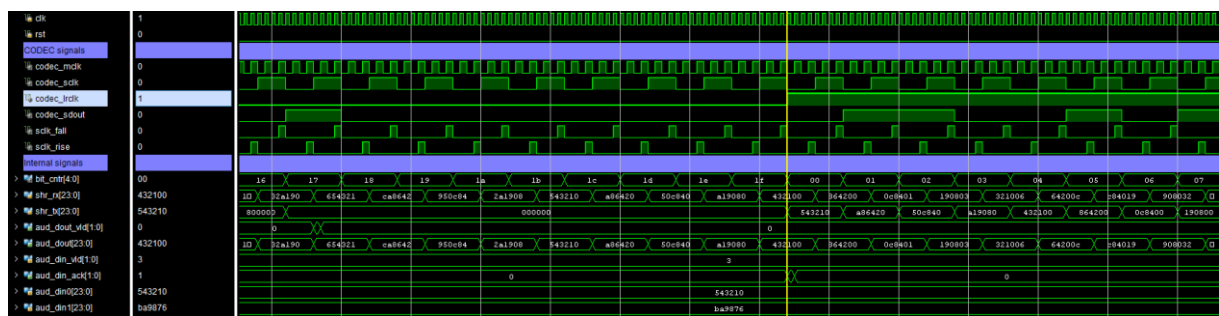
Ugyanez kissé messzebről nézve:



LRC felfutó éle:



És messzebről:

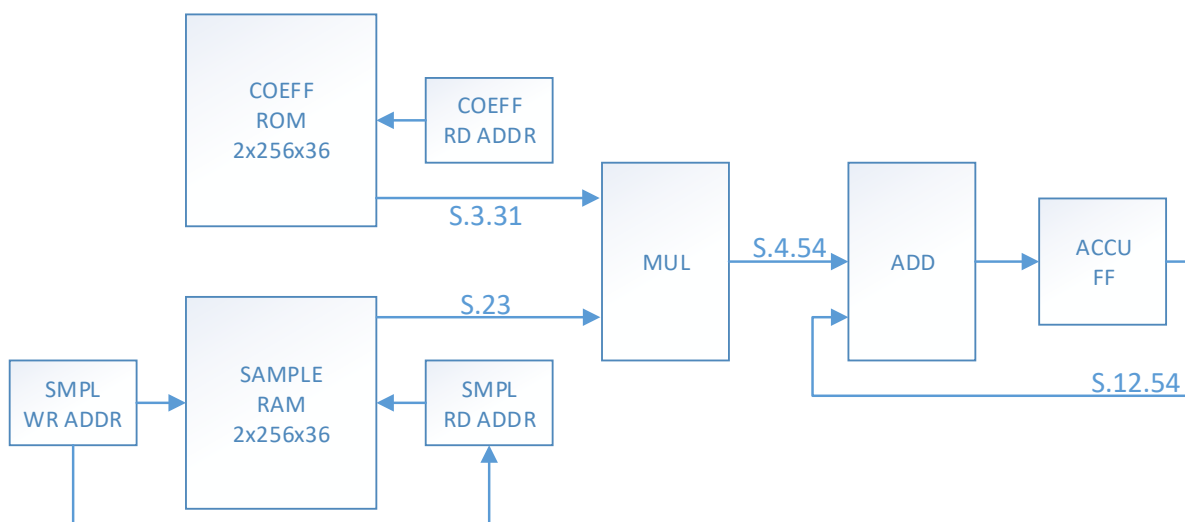


3 Audio FIR szűrő

A 4. gyakorlaton a 3. gyakorlaton megvalósított, loopback módban működött CODEC interfészt egészítjük ki egy FIR szűrővel, azaz az ADC által digitalizált adatokat szűrjük, majd a DAC felé továbbítjuk.

A FIR szűrés egy N pontos konvolúció: $y_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_{k-i} * c_{N-i-1}$, ahol y a kimeneti minta, x a bemeneti minták sorozata, c pedig az együtthatókat tartalmazó tömb. Azaz szemléletesen: az utolsó N darab mintát páronként szorozzuk egy N elemű együttható tömb elemeivel, majd a részszorzatokat összegezzük. A k-adik kimeneti minta előállításához a [k-N+1] k] indexű mintákat használjuk, míg a (k+1)-ik kimenethez a [k-N+2 k+1] indexűeket, azaz a legrégebbi mintát eldobjuk, az új mintát pedig behelyezzük a mintákat tároló tömbbe. Ez láthatóan egy N elemű shift regiszter tömb, aminek minden eleme 1-1 minta. Erőforrás takarékoság szempontjából sok esetben hatékonyabb a mintatárat memóriában megvalósítani – ennek optimális megoldása az N elemű cirkuláris buffer, amelyet folyamatosan (inkrementálisan) címezve írunk. Amennyiben a cím eléri az (N-1)-t, következő értéke 0 lesz. Ha N kettő hatvány, akkor ez FPGA realizációnál automatikusan megoldódik megfelelő szélességű címszámlálót használva. Adott időpillanatban, amikor az írási cím A, akkor ezen a címen a legújabb adat van, az A-1 címen az egyel régebbi, és így tovább; az A+1 címen a legrégebbi adat található. Ha a legújabb mintától kezdve a legrégebbig haladva szeretnénk összeszorozni a minta-együttható párokat, akkor az együttható tárcímzése minden kimeneti minta előállításánál $N-1 \rightarrow 0$ értékeket jár be, míg a mintatár címzését az aktuális minta címétől kell kezdeni és dekrementálni. Tehát [A, A-1, 0, N-1 ... A+1] a címzés.

A megvalósítandó szűrő párhuzamossági fokát a jel mintavételi frekvenciája (f_s) és a működési frekvencia (f_{clk}) határozza meg. Egy csatorna feldolgozásakor két bemeneti minta között $\frac{f_{clk}}{f_s}$ órajel telik el, tehát órajelben számolva ennyi idő van a feladat elvégzésére. Az előző gyakorlathoz képest az FPGA működési frekvenciáját megnöveljük 200 MHz-re (f_s marad ~195 kHz), így a jelenlegi rendszerben: $\frac{f_{clk}}{f_s} = 1024$. Mivel két csatornát kell feldolgozni, így egy csatornára 512 órajel jut. A szűrőnk fokszáma 256, így ahhoz, hogy 512 órajel alatt kiszámítsunk 256 részszorzatot egyetlen szorzó hardver is bőven elegendő, azaz a feldolgozás szekvenciális. (Amennyiben pl. a mintavételi frekvencia megegyezne a működési frekvenciával, teljesen párhuzamos rendszerre lenne szükség, azaz csatornánként 256 szorzót használnánk). Egyszerűsített blokkvázlat a fentiek alapján:



Adatformátumok:

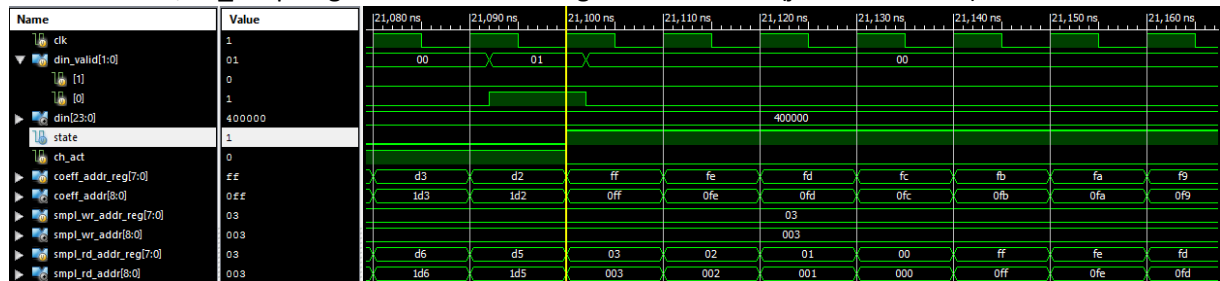
- A bemeneti minták 24 bites előjeles adatok, ezeket előjeles, csak törtrészt tartalmazó fixpontos számokként értelmezzük: azaz 23 bitnyi törtrész van, a formátum tehát s.23
- Az együtthatók (1-es DC erősítést feltételezve) jóval kisebbek, mint 1, így alapvetően ezeket is fixpontosként ábrázoljuk. Részben önkényesen, részben az FPGA tulajdonságait figyelembe véve 35 bites, s.3.31 formátumú értékeket használunk.
- A minta és az együttható szorzata: $s.23 * s.3.31 \rightarrow s.4.54$
- Annak érdekében, hogy a 256 szorzat akkumulálásánál ne léphessen fel túlcordulás az összeadónak $\log_2 256 = 8$ bittel szélesebbnek kell lennie, így formátuma s.12.54.
- A kimeneti minták a bemenethez hasonlóan s.23 formátumúak, ezt az akku formátumából a törtrészek tekintetében csonkolással, az egész rész tekintetében szaturációval állítjuk elő.

Egyéb megfontolások:

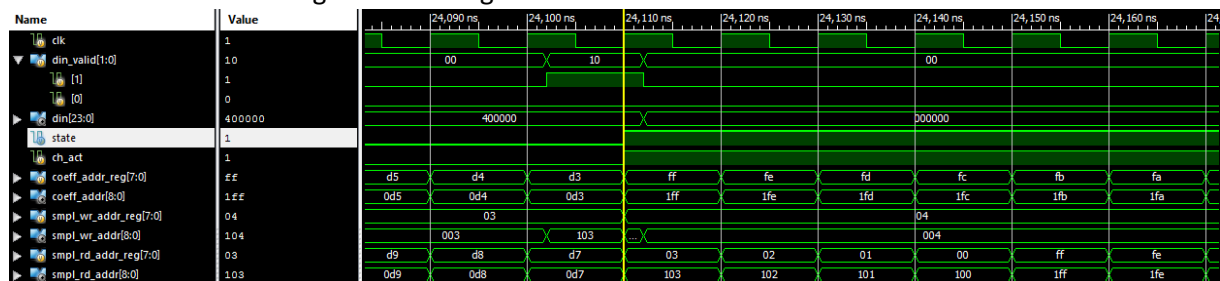
- Mind az együttható, mind pedig a mintatár két csatorna adatát tárolja. Az első 256 (0....255) cím tartozik a 0. csatornához, a második 256 (256....511) pedig az 1. csatornához.
- A minták írását az ADC interfésztől kapott `adc_valid` jel bitjeinek vagy kapcsolata engedélyezi.
- Az írási címszámláló növelését mintavételi periódusonként egyszer kell elvégezni (a két csatorna adott bemeneti mintáját a saját memória területen belül ugyanarra a címre kell írni), azaz ezt `adc_valid[1]` engedélyezi. A csatornához tartozó 256 elem címzéséhez 8 bites címszámlálóra van szükség, a teljes 512 elemű memória címzéséhez szükséges plusz egy MSB bitet `adc_valid[1]`, szolgáltatja (azaz a 0. csatorna „alulra”, az 1. csatorna „felülre” íródik).
- Az új minta beírásakor az aktuális írási cím átmásolódik az olvasási címszámlálóba, majd ezután 256 ütemeig ez dekrementálódik. Ugyanekkor az együttható olvasási címszámlálója 255-re inicializálódik, majd lefele számol.
- A memóriák olvasási címe a minta beírást követő 256 órajelben érvényes, így egy „cím érvényes” jel generálható úgy, hogy a mintatár írásakor 1-be állítunk egy FF-t, majd ha az együttható címszámláló elérte a 0-t, akkor 0-ba állítjuk.
- A minta írás megkezdésekor el kell tárolni, hogy melyik csatorna adatát dolgozzuk fel, ez a bit lesz az olvasási címek MSB bitje.
- A memóriaolvasásnak 1 órajel késleltetése van, valamint az alkalmazott 35x35 bites szorzó is rendelkezik viszonylag nagy késleltetéssel (adott bemenethez tartozó kimenet ennyi órajel múlva jelenik meg), ez utóbbi a HDL kód alapján meghatározható.
- Az akkumulátort akkor kell engedélyezni, amikor a szorzó kimenete érvényes – ehhez a „cím érvényes” jel megfelelő órajellel késleltetett verziója megfelelő (\rightarrow shift regiszter).
- Az akkumulátort minden egyes konvolúció megkezdése előtt reset-elni kell. Erre minden olyan időpont megfelelő, ami megelőzi az első érvényes részsorzat megjelenését, de később van, mint az előző konvolúció befejezése. Ilyen pl. a bemeneti memória írásának engedélyezése. Még jobb – nem jár órajel veszteséggel – az a megoldás, hogy az első érvényes akkumulátor bemenet órajelében „resetel-jük” az akkumulátort; de nem 0-ba állítjuk, hanem akkumulálás nélkül beleírjuk a bemeneti értéket.
- Az akkumulátor az engedélyező jelének 0-ba váltásakor érvényes adatot tartalmaz, így ezen jel lefutó élének detektálásával generálható a kimeneti valid jel (ez is csatornánként 1 bit). Amennyiben a szaturáció plusz egy pipeline szintet jelent, úgy ezt a jelet is késleltetni kell még egy órajellel.

Hullámformák

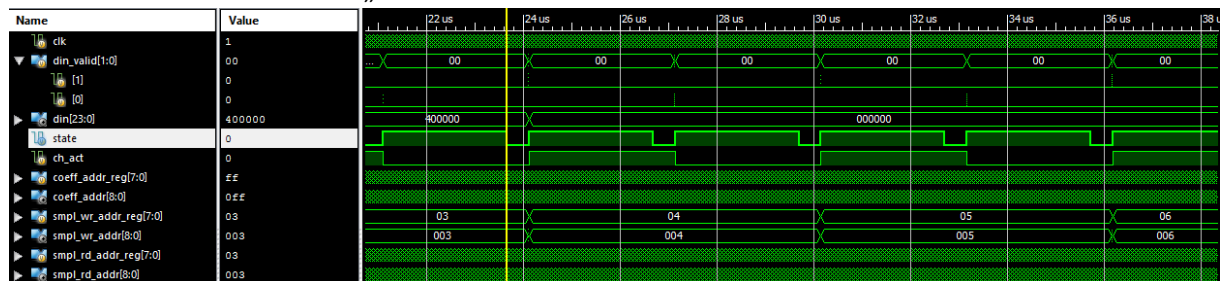
0. csatorna feldolgozásának megkezdése → írási címszámláló (smpl_rd_addr_reg) nem nő; együtttható címszámláló (coeff_addr_reg) 255-ről indul; minta olvasási címszámláló (smpl_rd_addr_reg) az írási címről – 0x3 – indul. state=1 jelenti, hogy érvényesek az olvasási címek, ch_act pedig az aktuálisan feldolgozott csatornát (jelen esetben 0).



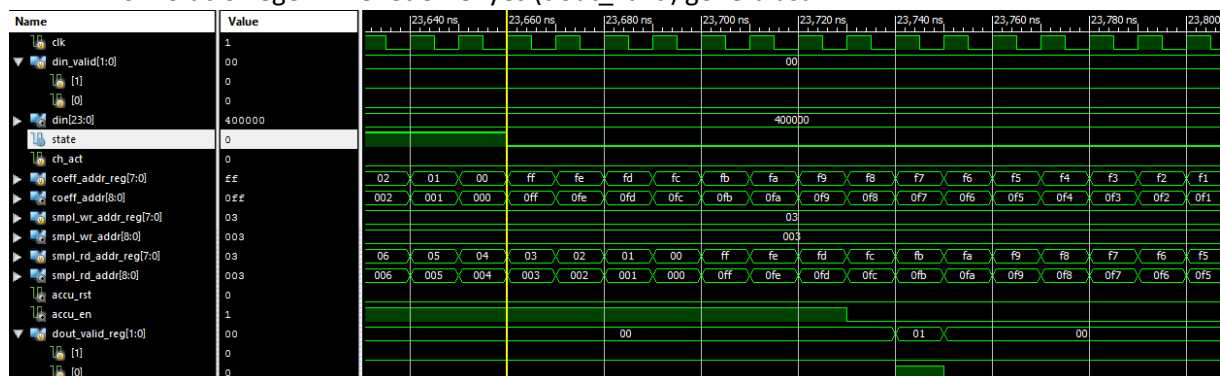
1. csatorna feldolgozásának megkezdése → nő az írási címszámláló



- Működési szekvencia „távolról” nézve



- Konvolúció vége: kimenet érvényes (dout_valid) generálása.

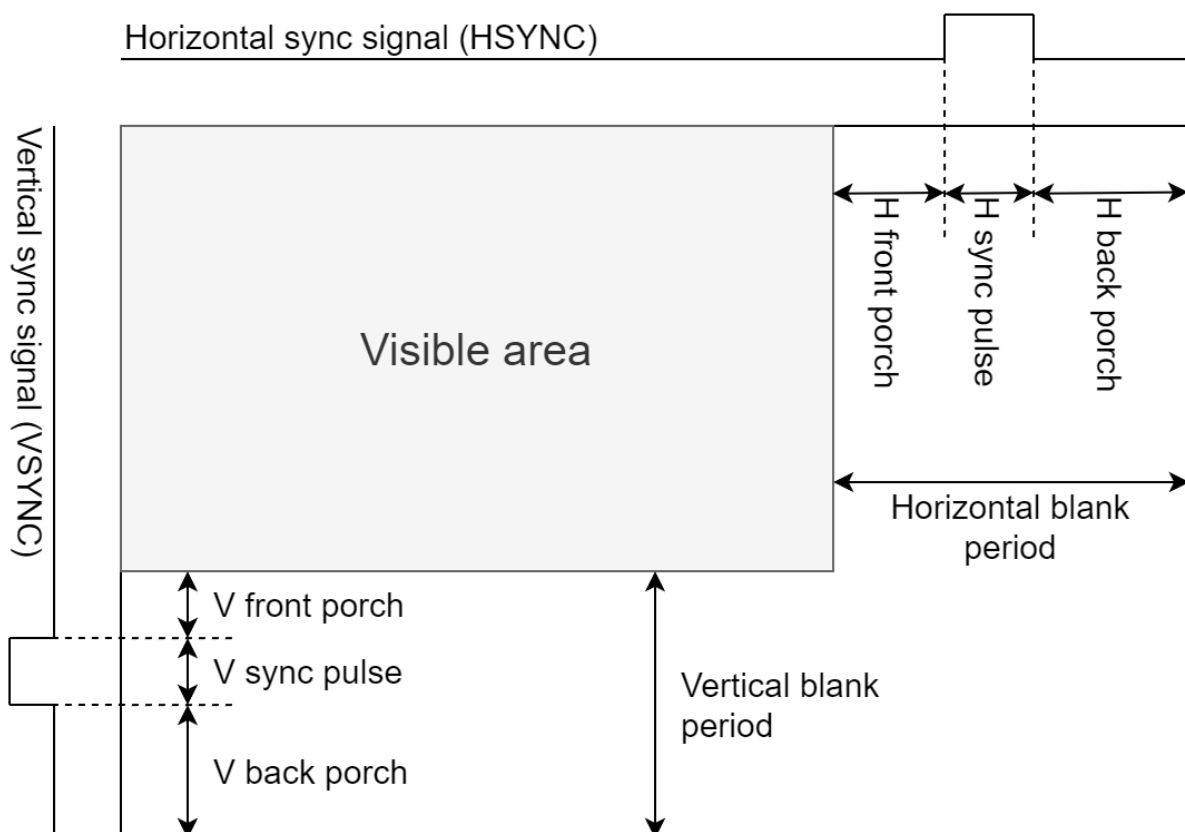


4 RGB → Y átalakítás + logikai analízátor

A gyakorlat során egy (részleges) szintér konvertert valósítunk meg, amely a HDMI bemeneten érkező RGB adatokból világosság (Y) komponenst számol, majd a HDMI kimenetre szürkeárnyaltos képet továbbít, azaz a világosság komponens kerül az R, G és B komponensek helyére. (Színterekről röviden: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_space)

4.1 Videó formátum

A HDMI vevő minden órajelben egy pixel értékét, valamint a 3 vezérlőjelet szolgáltat, melyek megegyeznek a VGA interfész jeleivel. A teljes továbbított kép mind horizontális, mind pedig vertikális irányban látható tartományból és kioltási (blank) intervallumokból áll. A horizontális kioltási idő alatt (azaz minden egyes sorban) található a horizontális szinkron pulzus (HSYNC), míg a vertikális kéпкиoltási idő alatt (tehát képenként egyszer) a vertikális szinkron pulzus. A pulzusok polaritása felbontástól függően lehet ponált vagy negált, az alábbi ábra ponált esetet mutat.



A HDMI vevő által szolgáltatott jelek:

- rx_red, rx_green, rx_blue: a 3 színkomponens 8-8 biten
- rx_hsync: horizontális szinkronjel
- rx_vsync: vertikális szinkronjel
- rx_dv: a látható pixelek alatt 1, a blank periódusok alatt 0

4.2 RGB → Y átalakítás

Az RGB → YCbCr/YUV átalakításra számos szabvány létezik, amelyek más-más együtthatót használnak, a világosság komponens számításának általános képlete:

$$Y = K_R * R + (1 - K_R - K_B) * G + K_B * B$$

A gyakorlat során a HD televíziózásban használt, az ITU-R BT.709-6 szabványban rögzített együtthatókat fogjuk használni (https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-1!!PDF-E.pdf):

$$Y = 0,2126 * R - 0,7152 * G - 0,0722 * B$$

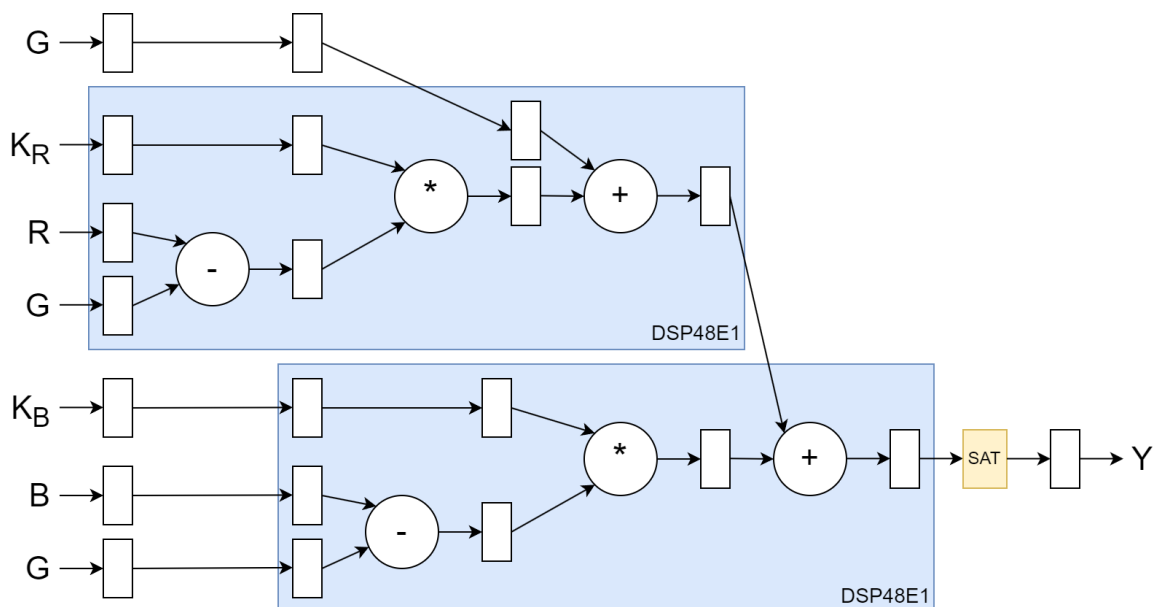
A 3 szorzás és összeadás triviálisan megvalósítható 3 DSP blokkal:

- A 25 bites bemeneteket használva az együtthatókra, ezek fix pontos számként igen pontosan ábrázolhatók (ez a pontosság már felesleges, hiszen a kimenetünk 8 bites).
- A 18 bites bemenetekre a 8 bites R, G, B értékek kerülnek.

Megspórolhatunk egy DSP blokkot, ha átrendezzük az általános képletet és felhasználjuk a DSP48E1 elő-összeadóját:

$$Y = K_R * (R - G) + K_B * (B - G) + G$$

Ebben az esetben az RGB értékek kerülnek a 25 bites bemenetekre, az együtthatók pedig a 18 bites bemenetekre. Az így adódó blokkvázlat:

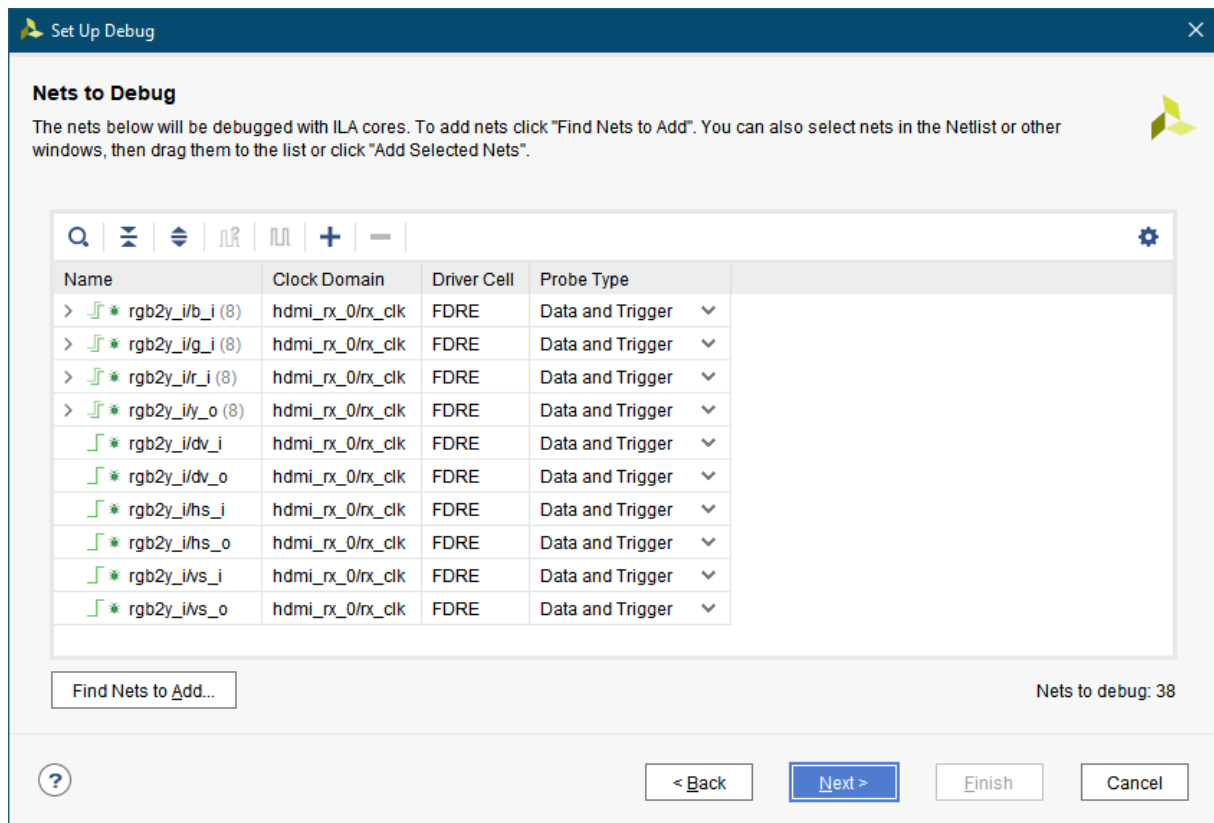


Mivel az együtthatók 1-nél kisebb számok, a 18 bites előjeles bemenet esetén 17 törtész bitet használunk. Az együtthatók összege 1, az R/G/B komponensek pedig előjel nélküli 8 bites értékek, így túlszordulás nem fordulhat elő. Ugyanakkor az eredmény lehet negatív, amit szaturációval kezelni kell.

Annak érdekében, hogy a kimeneti pixel értékek (Y) és a vezérlőjelek (valid, hsync, vsync) szinkronban maradjanak, a vezérlőjeleket ugyanannyival kell késleltetni, mint amennyi az adatút késleltetése – ez jelen esetben – a szaturációt is beleszámítva – 6 órajel.

4.3 Logikai analízátor (ChipScope)

Az FPGA-ban megvalósított logikai analízátor az FPGA belső BRAM-jait használja mintatárként, a megfigyelt jelek számát és a mintatár nagyságát az elérhető BRAM-ok száma limitálja. HDL kód vizsgálatának legegyszerűbb módja, hogy a vizsgálni kívánt jelek deklarációját kiegészítjük a MARK_DEBUG szintézis direktívával. Ezen jeleket az analízátor konfigurációjakor a Vivado automatikusan hozzáadja a megfigyelt jelekhez. Minden jelre megadhatjuk, hogy azt csak trigger jelként szeretnénk használni; csak a hullámformáját szeretnénk megnézni; vagy mindkét opcióra igényt tartunk (Trigger/Data/Data and Trigger).



A konfiguráció során ezen kívül megadhatjuk:

- A mintatár mélysége. A memória igény a megfigyelt jelek (bitek) száma szorozva a mintatár mélységével.
- Capture control. Lehetővé teszi, hogy a bemeneti jelek alapján megfogalmazott feltétellel engedélyezzük a mintavételt. Amennyiben nem használjuk, úgy az analizátor minden órajelben mintát vesz a megfigyelt jelekből).
- Advanced trigger. Bonyolultabb trigger feltételek megfogalmazását teszi lehetővé kb HDL szintaxissal. Használata nélkül is lehetőségünk van több trigger esemény logikai kapcsolatát vizsgálni, de például trigger szekvenciák beállításához már szükség van az opcióra.

A működési idejű analízishez az analizátor felületén a következő beállítási lehetőségeink vannak:

- Trigger mode. Egyszerű vagy összetett trigger mód.
- Capture Mode Settings
 - o Always: Minden órajelben mintát vesz.
 - o Basic: Csak a Capture Setup-ban megadott feltétel teljesülésekor vesz mintát.
- Number of windows. A teljes mintatárat hány darab független részre szeretnénk osztani. Az egyes ablakok egymás utáni trigger események környezetét mutatják.
- Window data depth. Egy minta-ablak mérete. A teljes mintatár mérete = ablakok száma * ablak méret.
- Trigger position. A trigger esemény helye a mintatárban.
- Trigger Setup. A trigger feltétel beállítása. Több feltétel megadása esetén az egyes feltételek egyszerű logikai kapcsolatba hozhatók.
- Capture Setup. A mintavételt engedélyező feltétel megadása.

hw_ila_1

Waveform - hw_ila_1

ILA Status: Idle

Name	Value
> rgb2y_i/g_i[7:0]	14
> rgb2y_i/y_o[7:0]	14
> rgb2y_i/r_i[7:0]	14
> rgb2y_i/b_i[7:0]	14
rgb2y_i/dv_i	1
rgb2y_i/dv_o	1
rgb2y_i/bc_i	0

Updated at: 2023-Apr-12 16:50:53

Settings - hw_ila_1

Trigger Mode settings

Trigger mode: BASIC_ONLY

Capture Mode Settings

Capture mode: ALWAYS

Number of windows: 1 [1 - 4096]

Window data depth: 4096 [1 - 4096]

Trigger position in window: 2,048 [0 - 4095]

Trigger Setup - hw_ila_1

Name	Operator	Radix	Value	Port
rgb2y_i/dv_i	==	[B]	R	probe4

Capture Setup - hw_ila_1

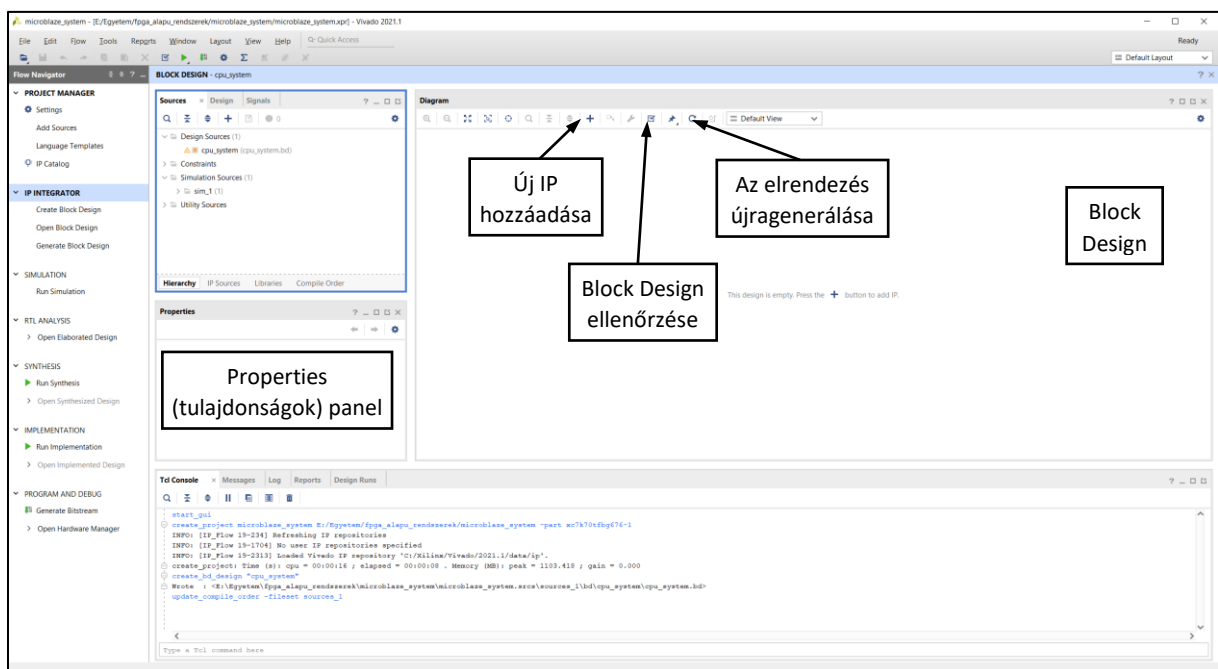
5 IP alapú fejlesztés a Vivado-ban

A gyakorlat célja, hogy megismerkedjünk a Xilinx Vivado fejlesztői környezet által biztosított block design (IP) alapú fejlesztéssel. Egy MicroBlaze processzort tartalmazó alaprendszert hozunk létre és készítünk hozzá egyszerű szoftver alkalmazást a C nyelvű hardverközeli programozás megismeréséhez. A következő gyakorlaton ehhez a processzoros rendszerhez illesztünk majd saját perifériát.

5.1 MicroBlaze processzoros alaprendszer

Indítsuk el a Vivado fejlesztői környezetet és hozzunk létre egy új RTL projektet, melyhez a forrásfájlokat majd később adjuk hozzá. A felhasznált FPGA eszköznek a Logys Kintex-7 FPGA kártyán lévő eszközt adjuk meg (xc7k70tftp676-1).

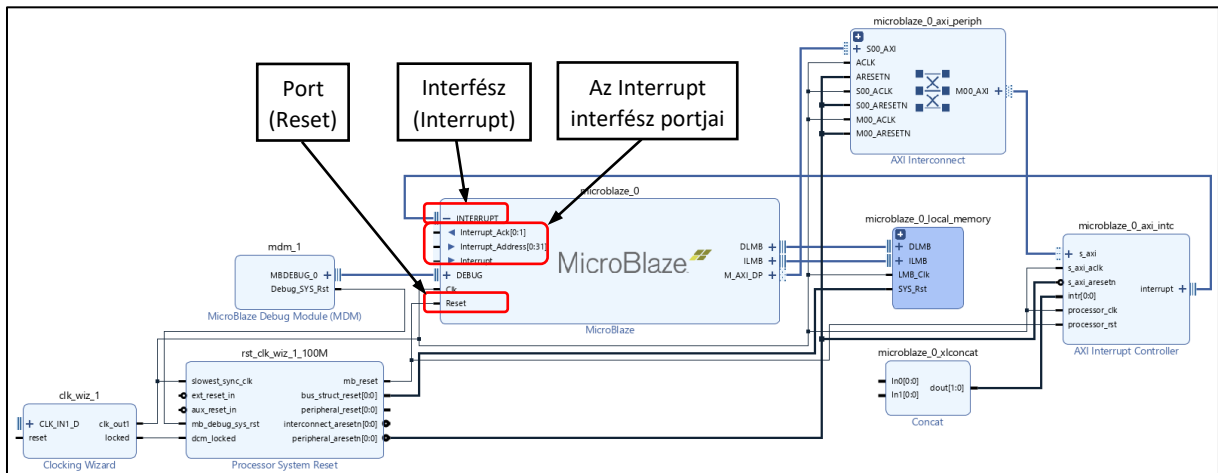
Hozunk létre egy új block design-t a felhasználói felület bal oldalán lévő Flow Navigator panelen a Create Block Design gombra kattintva és nevezzük el cpu_system-nek.



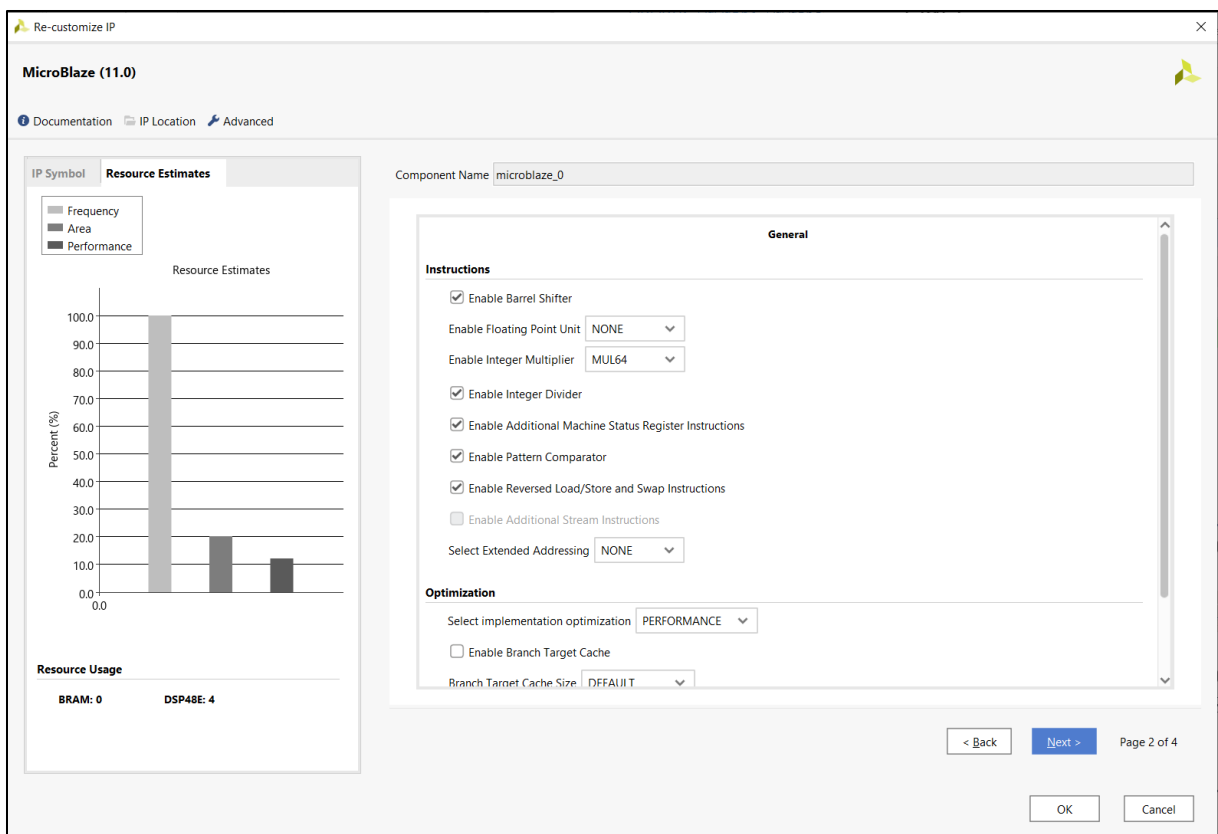
A block design segítségével a fejlesztői környezetben megtalálható gyári, illetve saját IP-kból építhetjük fel a kívánt rendszert. Az üres block design-hoz az IP listából adjunk hozzá egy MicroBlaze processzort. A többi építőelemet vagy ily módon adhatjuk hozzá a rendszerhez vagy pedig használhatjuk a zöld sávban megjelenő Run Block Automation segítséget. Ez utóbbit használjuk most, amely előre meghatározott beállítások alapján elvégzi a kiegészítést a működéshez szükséges IP modulokkal. A felugró ablakban az alábbi beállításokat adjuk meg, majd az OK gombra kattintva megtörténik a rendszer kiegészítése.

- Preset: None
- Local Memory: 64KB
- Local Memory ECC: None
- Cache Configuration: None
- Debug Module: Debug Only
- Peripheral AXI Port: Enabled
- Interrupt Controller: kiválasztva
- Clock Connection: New Clocking Wizard

A kiegészítés után a block design az alábbi ábrához hasonlóan néz ki. Az IP-k portokon és interfészeken keresztül kapcsolódnak egymáshoz és a „külvilághoz”. Az interfész egy adott funkció megvalósításához szükséges portokat tartalmazza.



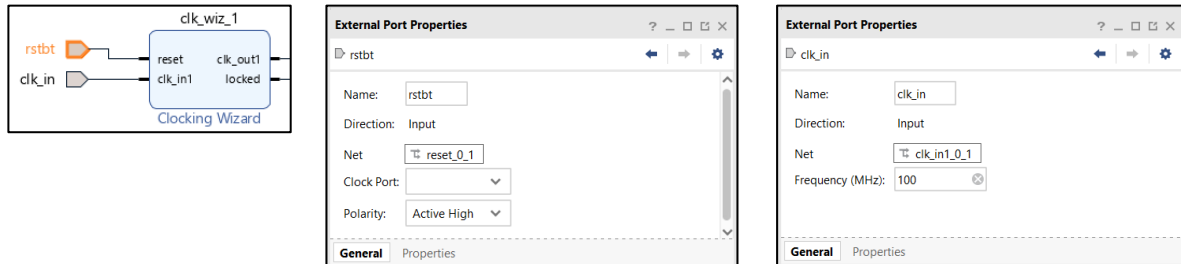
Egy IP konfigurációs beállításai a rá történő dupla kattintással jeleníthetők meg. A MicroBlaze processzor utasításkészletét konfiguráljuk az ábrán látható módon (ez a beállítás csoport a konfigurációs ablak 2. oldalán található), a többi beállításon nem szükséges módosítani.



A rendszer számára a 100 MHz órajelet előállító Clocking Wizard bemenete differenciális, viszont a Logsys Kintex-7 FPGA kártya single ended kimenetű oszcillátorral rendelkezik. A reset gomb polaritása aktív magas. A Clocking Wizard beállításait ennek megfelelően módosítjuk.

- Clocking Options fül → Input Clock Information → Source: Single ended clock capable pin
- Output Clocks fül → Reset Type: Active High

A Clocking Wizard reset és clk_in1 portjait vezessük ki külső portként. Ehhez válasszuk ki az IP adott portját, kattintsunk rá jobb gombbal és a felugró menüből válasszuk a Make External lehetőséget. A block design-ban kijelölt elem tulajdonságai (pl. elnevezés) a Properties panelen jelennek meg. A reset port neve legyen rstbt, polaritása pedig aktív magas. Az órajel bemenet neve legyen clk_in, frekvenciája pedig 100 MHz.



A Processor System Reset IP végzi el a reset bemeneteknek a rendszerórajelhez történő szinkronizálását és előállítja a rendszer számára szükséges reset jeleket. Az ext_reset_in portját kössük be az rstbt külső reset bemenetre. Ez az IP a külső port beállításából automatikusan átveszi a reset bemenet polaritását (ez az ábrán a block design ellenőrzése után fog csak frissülni).

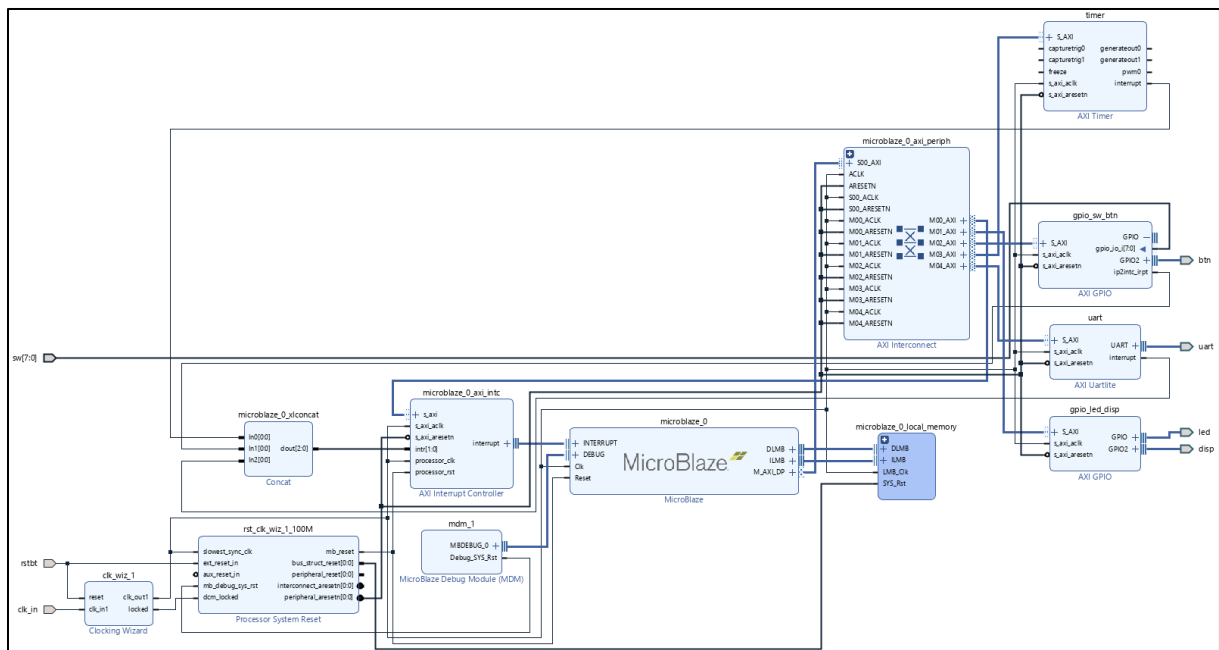
A processzoros rendszerhez adjuk hozzá az alábbi táblázatban szereplő IP-eket és a leírt módon konfiguráljuk őket, valamint kössük be az interfészeiket és portjaikat.

IP	Név	Beállítások	Bekötés (IP interfész/port → külső interfész/port név)
AXI GPIO	gpio_led_disp	GPIO (LED-ek) <ul style="list-style-type: none"> All Outputs: kiválasztva GPIO Width: 24 Enable Dual Channel: kiválasztva GPIO 2 (hétszégmenses kijelző) <ul style="list-style-type: none"> All Outputs: kiválasztva GPIO Width: 12 	GPIO interfész → led GPIO 2 interfész → disp
AXI GPIO	gpio_sw_btn	GPIO (kapcsolók) <ul style="list-style-type: none"> All Inputs: kiválasztva GPIO Width: 8 Enable Dual Channel: kiválasztva GPIO 2 (nyomógombok) <ul style="list-style-type: none"> All Inputs: kiválasztva GPIO Width: 4 Enable Interrupt: kiválasztva	GPIO gpio_io_i port → sw GPIO 2 interfész → btn
AXI Uartlite	uart	Baud Rate: 115200 Data Bits: 8 No Parity: kiválasztva	UART interfész → uart
AXI Timer	timer	Alapértelmezett beállítások	Nincs külső kapcsolat

Az újonnan hozzáadott IP-eket eddig csak a „külvilággal” kötöttük össze, nem kapcsolódnak még a MicroBlaze processzor AXI4-Lite periféria interfészeihez. Az AXI interfészre kapcsolódó master és slave egységeket az AXI Interconnect köti össze és végzi el az arbitrációt (több master egység esetén), valamint a címdekódolást. A fenti perifériák AXI interfészeinek bekötése legegyszerűbben a zöld sávban megjelenő Run Connection Automation segítségével tehető meg. Kattintsunk rá és a megjelenő ablakban a bal oldalon jelöljük ki a perifériák AXI interfészeit (S_AXI). Az alapértelmezett beállítások megfelelőek, nem kell ezeken módosítani. Az OK gombra kattintva a fejlesztői környezet létrehozza a szükséges összeköttetéseket.

A perifériák megszakításkérő kimeneteinek (GPIO: ip2intc_irpt, Timer: interrupt, UART: interrupt) bekötése még hiányzik. Az AXI Interrupt Controller IP-hez kapcsolódó Concat IP bemeneteit növeljük meg 3-ra és ezekhez kössünk be egy-egy periféria megszakításkérő vonalat. Az In0 bemenetnek van a legnagyobb prioritása, de a bekötési sorrend számunkra most nem lényeges.

A kész processzoros rendszer az elrendezés újragenerálása után az alábbi ábrán látható módon néz ki.



A perifériák címkiosztása az Address Editor fülön tekinthető meg, illetve itt módosítható a báziscím és a címtartomány mérete. Az alapértelmezett beállítások számunkra megfelelőek.

Diagram x Address Editor x Address Map x						
<input checked="" type="checkbox"/> Assigned (7) <input checked="" type="checkbox"/> Unassigned (0) <input checked="" type="checkbox"/> Excluded (0) <input type="button" value="Hide All"/>						
Name	Interface	Slave Segment	Master Base Address	Range	Master High Address	
Network 0						
/microblaze_0						
/microblaze_0/Data (32 address bits : 4G)						
/gpio_led_disp/S_AXI	S_AXI	Reg	0x4000_0000	64K	0x4000_FFFF	
/gpio_sw_btn/S_AXI	S_AXI	Reg	0x4001_0000	64K	0x4001_FFFF	
/microblaze_0_axi_intc/S_AXI	s_axi	Reg	0x4120_0000	64K	0x4120_FFFF	
/microblaze_0_local_memory/dlmb_bram_if_cntlr/SLMB	SLMB	Mem	0x0000_0000	64K	0x0000_FFFF	
/timer/S_AXI	S_AXI	Reg	0x41C0_0000	64K	0x41C0_FFFF	
/uart/S_AXI	S_AXI	Reg	0x4060_0000	64K	0x4060_FFFF	
Network 1						
/microblaze_0						
/microblaze_0/Instruction (32 address bits : 4G)						
/microblaze_0_local_memory/ilmb_bram_if_cntlr/SLMB	SLMB	Mem	0x0000_0000	64K	0x0000_FFFF	

Ellenőrizzük a létrehozott block design-t a Validate Design gombra kattintva. Az ellenőrzés során nem szabad hibákat, illetve kritikus figyelmeztetéseket kapnunk. Ha mégis jelez ilyet a fejlesztői környezet, akkor ezeket javítsuk ki.

A block design nem lehet top-level modulja a rendszernek, ezért létre kell hozni hozzá egy HDL wrappert-t (Sources fül → jobb kattintás a block design elemen → Create HDL Wrapper). Az opciók közül válasszuk a másodikat, azaz a Vivado általi menedzselést és automatikus frissítést.

Futtassuk le a szintézist és ha ez befejeződött, akkor nyissuk meg a szintetizált rendszert. A top-level modul portok FPGA lábakhoz történő hozzárendelését még nem adtuk meg. Ezeket, illetve az egyéb felhasználói megkötéseket az XDC fájlok tartalmazzák. Ezek kézzel is szerkeszthetők, de kényelmesebb, ha az I/O ports ablakot (Window menü → I/O Ports) használjuk a fejlesztői környezetben.

Minden port esetén az I/O szabvány legyen LVCMOS33. A LED-ek esetén a piros szín a GPIO port alsó 8 bitjéhez, a zöld szín a középső 8 bithez, a kék szín pedig a felső 8 bithez legyen hozzárendelve. A hétszegmenses kijelző esetén a GPIO port alsó 8 bitjéhez legyenek hozzárendelve a szegmensvezérlő jelek, a felső 4 bithez pedig a digit kiválasztó jelek. Az FPGA lábak bekötését a kártya felhasználói útmutatója tartalmazza, amely megtalálható a <http://logsys.mit.bme.hu/document> oldalon.

I/O Ports											
Name	Direction	Neg Diff Pair	Package Pin	Fixed	Bank	I/O Std	Vcco	Vref	Drive Strength	Slew Type	Pull Type
▼ All ports (52)											
▼ CLK_CLK_IN_48355 (1)	IN			<input checked="" type="checkbox"/>	14	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
▼ Scalar ports (1)											
clk_in	IN		D23	<input checked="" type="checkbox"/>	14	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
▼ GPIO2_35933 (4)	IN			<input checked="" type="checkbox"/>	(Multi	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
▼ btn_tri_i (4)	IN			<input checked="" type="checkbox"/>	(Multi	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
btn_tri_i[3]	IN		A18	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
btn_tri_i[2]	IN		A19	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
btn_tri_i[1]	IN		A17	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
btn_tri_i[0]	IN		A10	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
Scalar ports (0)											
▼ GPIO2_58290 (12)	OUT			<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
▼ disp_tri_o (12)	OUT			<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
disp_tri_o[11]	OUT		B10	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
disp_tri_o[10]	OUT		D10	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
disp_tri_o[9]	OUT		D11	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
disp_tri_o[8]	OUT		F10	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
disp_tri_o[7]	OUT		G10	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
disp_tri_o[6]	OUT		C9	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
disp_tri_o[5]	OUT		G11	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
disp_tri_o[4]	OUT		E13	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
disp_tri_o[3]	OUT		D9	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
disp_tri_o[2]	OUT		B9	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
disp_tri_o[1]	OUT		E10	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
disp_tri_o[0]	OUT		D8	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
Scalar ports (0)											

I/O Ports											
Name	Direction	Neg Diff Pair	Package Pin	Fixed	Bank	I/O Std	Vcco	Vref	Drive Strength	Slew Type	Pull Type
▼ GPIO_35933 (8)	IN			<input checked="" type="checkbox"/>	(Multi	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
▼ sw (8)	IN			<input checked="" type="checkbox"/>	(Multi	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
sw[7]	IN		B12	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
sw[6]	IN		C12	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
sw[5]	IN		C11	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
sw[4]	IN		B11	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
sw[3]	IN		G14	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
sw[2]	IN		E15	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
sw[1]	IN		E12	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
sw[0]	IN		E11	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300				NONE ▼
Scalar ports (0)											
▼ GPIO_58290 (24)	OUT			<input checked="" type="checkbox"/>	(Multi	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
▼ led_tri_o (24)	OUT			<input checked="" type="checkbox"/>	(Multi	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
led_tri_o[23]	OUT		D20	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
led_tri_o[22]	OUT		B19	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
led_tri_o[21]	OUT		B17	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
led_tri_o[20]	OUT		B16	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
led_tri_o[19]	OUT		B15	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
led_tri_o[18]	OUT		F20	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
led_tri_o[17]	OUT		F18	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼
led_tri_o[16]	OUT		F17	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCMOS33*	3.300	12	▼	▼	NONE ▼

I/O Ports												
Name	Direction	Neg Diff Pair	Package Pin	Fixed	Bank	I/O Std	Vcco	Vref	Drive Strength	Slew Type	Pull Type	
led_tri_o[15]	OUT		C19	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[14]	OUT		D19	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[13]	OUT		C17	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[12]	OUT		D16	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[11]	OUT		D14	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[10]	OUT		G19	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[9]	OUT		E18	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[8]	OUT		G17	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[7]	OUT		C18	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[6]	OUT		D18	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[5]	OUT		C16	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[4]	OUT		D15	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[3]	OUT		C14	<input checked="" type="checkbox"/>	16	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[2]	OUT		F19	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[1]	OUT		E17	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
led_tri_o[0]	OUT		E16	<input checked="" type="checkbox"/>	15	LVCN0533*	3.300		12		NONE	
Scalar ports (0)												
RST.RSTBT_48355 (1)	IN			<input checked="" type="checkbox"/>	14	LVCN0533*	3.300				NONE	
Scalar ports (1)												
rstbt	IN		L23	<input checked="" type="checkbox"/>	14	LVCN0533*	3.300				NONE	
UART_54618 (2)												
uart_rx	(Multiple)			<input checked="" type="checkbox"/>	13	LVCN0533*	3.300				NONE	
Scalar ports (2)												
uart_tx	IN		N21	<input checked="" type="checkbox"/>	13	LVCN0533*	3.300				NONE	
uart_tx	OUT		M21	<input checked="" type="checkbox"/>	13	LVCN0533*	3.300		12		NONE	

Miután végeztünk az FPGA lábak megadásával, mentsük el az XDC fájlt például pinout.xdc néven, majd indítsuk el a konfigurációs bitfolyam generálását. A BIT fájl elkészülte után töltsük azt le az FPGA-ba a Hardware Manager-ben.

5.2 Egyszerű szoftver alkalmazás készítése

A szoftverfejlesztés elkezdése előtt először exportálni kell a processzoros rendszerrel kapcsolatos információkat (XSA fájl) a Vitis IDE számára (File menü → Export → Export Hardware). Ez kétféle módon tehető meg:

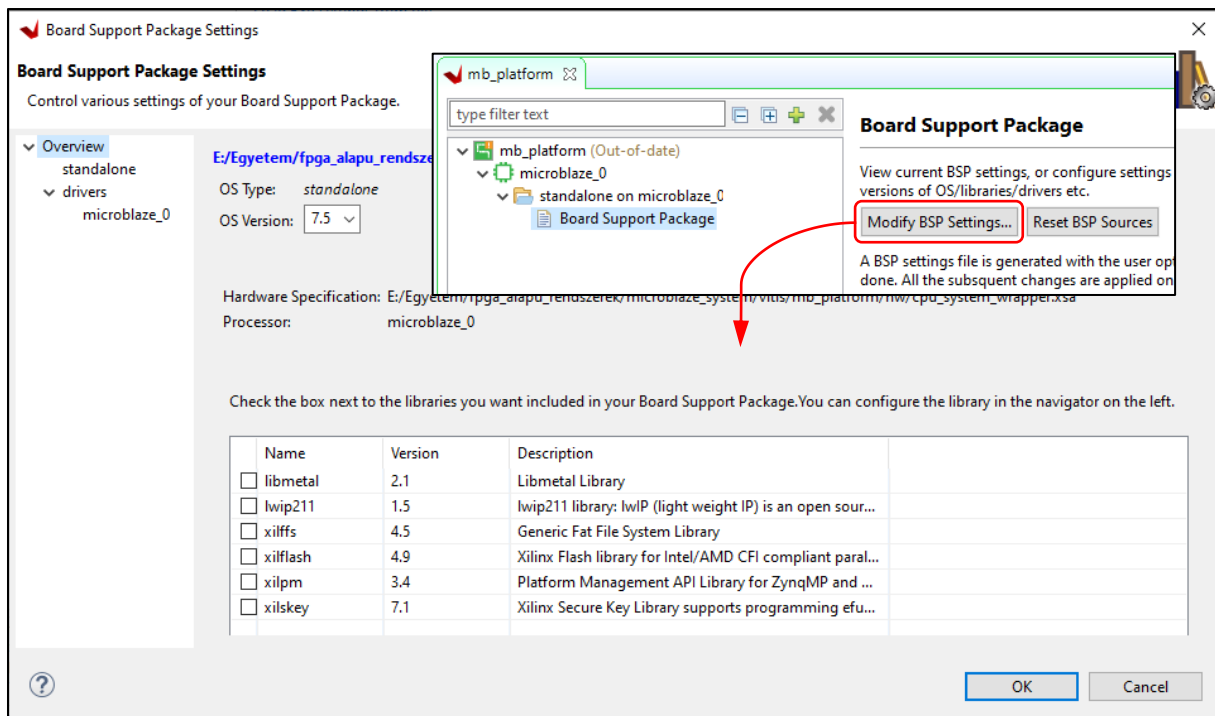
- Szintézis előtt, a konfigurációs bitfolyam nélkül: ez esetben csak a Generate Block Design futtatása szükséges a Flow Navigator-ban. A Vitis IDE-ből nem fogjuk tudni felkonfigurálni az FPGA eszközt.
- A konfigurációs bitfolyammal együtt: ez esetben a teljes implementációs folyamatot le kell futtatni (ami hosszú időt is igényelhet). A Vitis IDE-ből fel tudjuk konfigurálni az FPGA eszközt.

A hardver platform információk exportálása után indítsuk el a Vitis IDE-t a Tools menüből. A Vivado projekt könyvtárban belül hozzunk létre egy vitis nevű könyvtárat és ezt adjuk meg workspace-nek.

A szoftverfejlesztés első lépése a Platform Project létrehozása, amely standalone (operációs rendszer nélküli) esetben tartalmazza a perifériákhoz tartozó eszközmeghajtó programokat és az egyéb kiválasztott szoftver könyvtárakat:

- Nevezzük el a platform projektet mb_platform néven.
- Adjuk meg a korábban exportált XSA fájlt.
- Az operációs rendszer legyen standalone (nincs OS).
- A processzor pedig a microblaze_0 (csak ez az egy processzor van a rendszerben).

A platform projekt beállításoknál a „Modify BSP Settings...” gombra kattintva érhetők el a választható szoftver könyvtárak és az operációs rendszerrel, valamint az eszközmeghajtó programokkal kapcsolatos beállítások. Most ezt nem kell módosítanunk.



Fordítsuk le a platform projektet (jobb klikk → Build Project). A szoftver alkalmazás elkészítésénél fontos lesz majd a BSP xparameters.h nevű fájlja, amely a hardver platformmal kapcsolatos konfigurációs paramétereket tartalmazza. Keressük meg ezt a fájlt (mb_platform projekt → microblaze_0/standalone_domain/bsp/microblaze_0/include) és nézzük meg a tartalmát.

A platform projekt létrehozása után létrehozhatjuk az alkalmazás projektet:

- Válasszuk ki az mb_platform-ot.
- Nevezzük el az alkalmazás projektet sw_led-nek.
- Válasszuk ki a „standalone on microblaze_0” domain-t.
- Az alkalmazás sablonok közül válasszuk ki az „Empty Application (C)” lehetőséget.

A létrejött alkalmazás projekt src mappája csak a linker szkriptet és a readme.txt fájlt tartalmazza. Hozzunk létre ide egy új, main.c nevű forrásfájlt.

Az elkészítendő szoftver alkalmazásnak a kapcsolók állapotát kell megjelenítenie a LED-eken piros színben. Az alkalmazást háromféle módon valósítjuk meg:

- A GPIO periféria regisztereinek közvetlen elérésével és saját memória írási/olvasási makró használatával. Ez esetben ismernünk kell a periféria regiszterkészletét, melyről információt találunk:
 - Az AXI GPIO periféria adatlapjában: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/pg144-axi-gpio>
 - A hardver platformot tartalmazó XSA fájl (mb_platform projekt → hw) megnyitása után megjelenő felületen a periféria melletti Registers feliratra kattintva.
- A GPIO perifériához tartozó alacsony szintű eszközmeghajtó használatával. Ez esetben a perifériák kiválasztása a báziscímük megadásával történik. Nézzük meg, hogy ez a meghajtó milyen funkciókat biztosít a hozzá tartozó header fájl alapján (xgpio_l.h).
- A GPIO perifériához tartozó magasszintű eszközmeghajtó használatával. Ez esetben a perifériák megadása egy leíró struktúra segítségével történik, amelyet először inicializálnunk kell. Nézzük meg, hogy ez a meghajtó milyen funkciókat biztosít a hozzá tartozó header fájl alapján (xgpio.h).

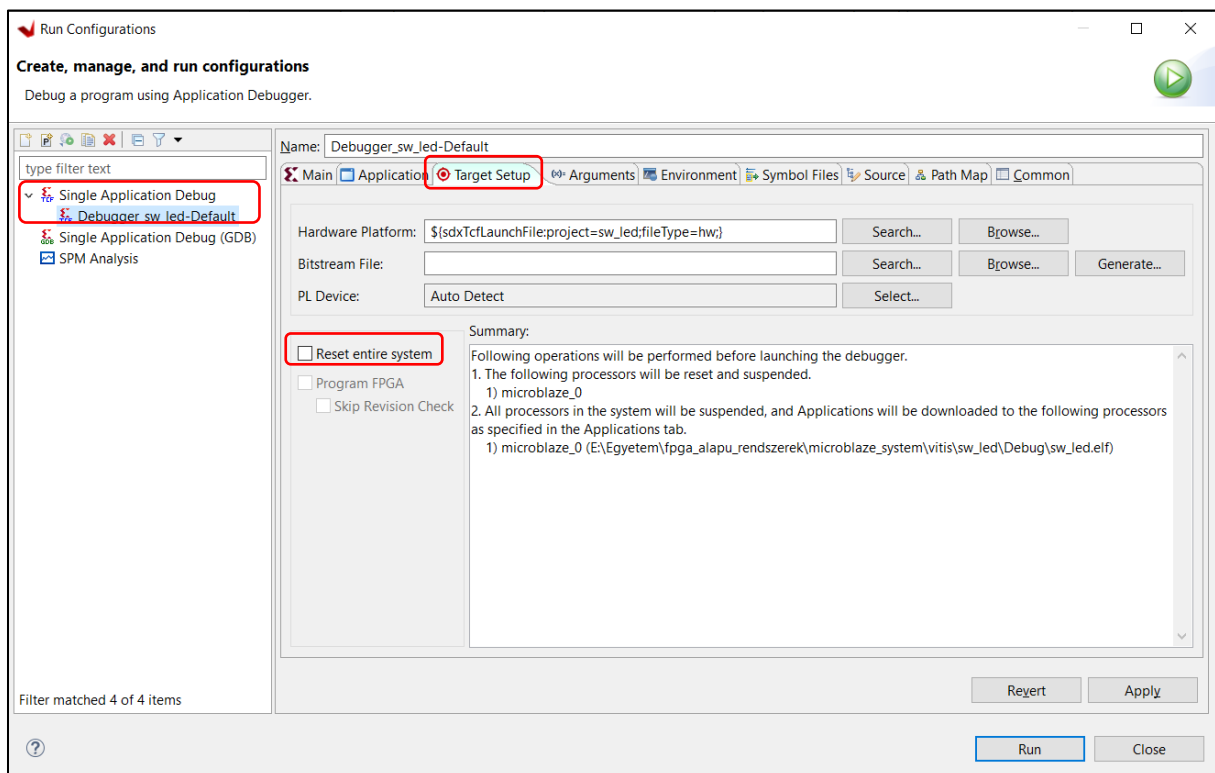
Az elkészült alkalmazást fordítsuk le (jobb klikk az alkalmazás projekten → Build Project). A fordítási konfigurációk közül az Assistant panelen választhatjuk ki az aktívat (jobb klikk → Set Active).

- Release: A debug információk generálása ki van kapcsolva, a kód optimalizálása engedélyezett.
- Debug: A debug információk generálása be van kapcsolva, a kód nincs optimalizálva. Ha az alkalmazást debuggolni szeretnénk, akkor ezt a konfigurációt kell választanunk.

Az alkalmazást a célrendszeren futtatni, illetve debuggolni a következőképpen lehet:

- Futtatás: jobb klikk a projekten → Run As → Launch Hardware (Single Application Debug)
- Debug: jobb klikk a projekten → Debug As → Launch Hardware (Single Application Debug)

A legelső futtatás előtt a célrendszer beállításoknál kapcsoljuk ki a teljes rendszer alapállapotba állítása opciót (Reset entire system). Ehhez először nyissuk meg a Run Configurations ablakot (jobb klikk a projekten → Run As → Run Configurations...) és a bal oldalon válasszuk ki a Single Application Debug alatt a szerkeszteni kívánt konfigurációt. Ha itt még nem található egyetlen futtatási konfiguráció sem, akkor újat létrehozni a Single Application Debug elemre történő dupla kattintással lehet.



6 Saját periféria illesztése

A gyakorlaton egy egyedi, AXI4-Lite interfésszel rendelkező perifériát készítünk és illesztjük azt az előző gyakorlaton létrehozott processzoros rendszerhez. Töltsük le az előző gyakorlat megoldását (gyak06_megoldas.zip), ez lesz a kiindulási projektünk. Ezután töltsük le és csomagoljuk ki a mai gyakorlathoz tartozó forráskód vázat (gyak07_periferia_illesztes.zip) a projekt könyvtárba.

Az elkészítendő periféria részletes bemutatása, valamint a periféria illesztési feladattal és az AXI4-Lite buszra történő illesztéssel kapcsolatos tudnivalók a gyak07_periferia_illesztes.pdf dokumentumban találhatóak meg.

Egy folyadékszint jelző perifériát készítünk, amely 8 szenzor alapján (a kártyán ezeket a DIP kapcsolók fogják helyettesíteni) meghatározza a tartályban lévő folyadék szintjét és jelzi a szenzor hibát, azaz ha a legnagyobb helyiértékű aktív szenzor bemenetnél kisebb helyiértékű bemeneten alacsony szint van. A periféria megszakítást tud generálni a „tartály éppen megtelt”, a „tartály éppen kiürült” vagy a „hiba keletkezett” esemény bekövetkezése esetén.

Nyissuk meg a Vivado projektet és adjuk hozzá a gyak07_src könyvtárban lévő új forrásfájlokat. A forrásfájlok részletes megjegyzéseket tartalmaznak, melyek segítik a hiányzó részekkel történő kiegészítést.

Saját IP kétféleképpen készíthető:

- Az IP Packager segítségével (Tools menü → Create and Package New IP...). Ebben az esetben rendelkezésre áll az összes IP-vel kapcsolatos beállítás és elkészíthető az IP-hez tartozó IP-XACT leíró fájl.
- HDL attribútumokkal megadjuk az IP portjainak interfészekhez történő rendelését és az egyéb tulajdonságokat (példák: Language Templates → Verilog/VHDL → IP Integrator HDL). Ez esetben a megadott adatok alapján a Vivado fejlesztői környezet fogja elkészíteni az az IP leíró fájlt. Ezt a lehetőséget fogjuk most használni.

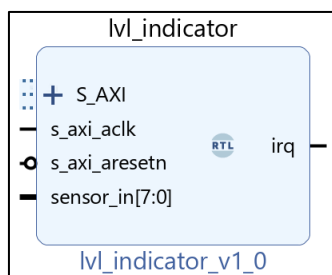
A perifériánk top-level modulját az lvl_indicator.v forrásfájl tartalmazza. Nyissuk meg és nézzük meg benne a portoknál megadott Verilog attribútumokat.

Az axi4_lite_if.v forrásfájl tartalmazza a busz interfész logikát. A megbeszéltek, valamint a forrásfájlban lévő megjegyzések alapján egészítsük ezt ki.

A fluid_level_indicator.v forrásfájl tartalmazza a perifériát megvalósító logikát. A megbeszéltek, valamint a forrásfájlban lévő megjegyzések alapján egészítsük ezt ki.

Miután elkészültünk a forrásfájlok kiegészítésével, adjuk hozzá a block design-hoz a periféria top-level modulját. Ez kétféleképpen tehető meg:

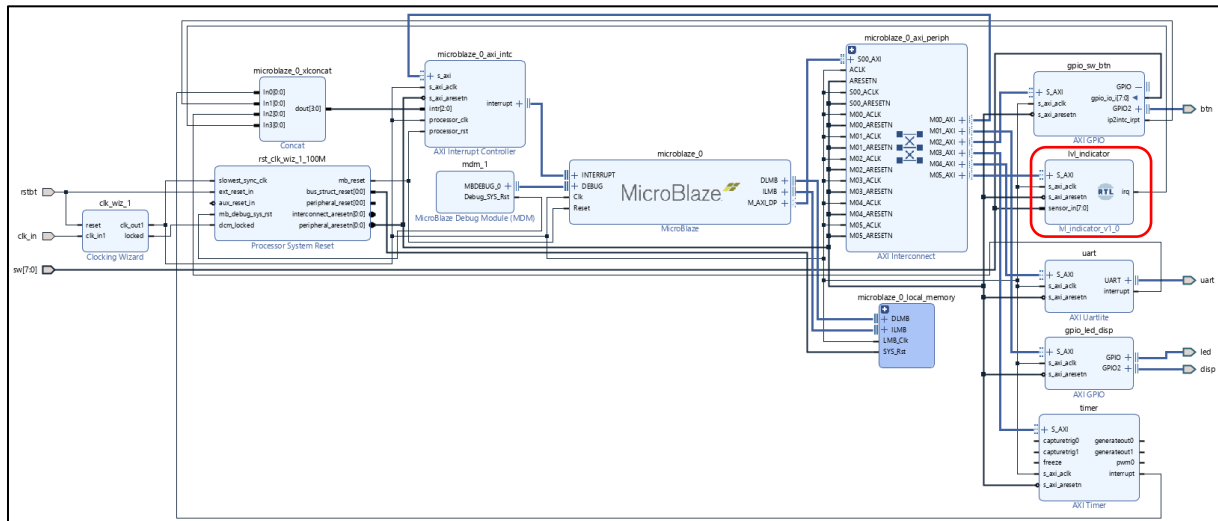
- Behúzzuk a megfelelő forrásfájlt a Sources panelból a block design-ba
- Jobb klikk a block design-ban → Add Module...



Az IP-hez tartozó blokkon láthatóak az lv1_indicator.v fájlban megadott portok és interfészek. Kössük be ezeket az alábbi módon:

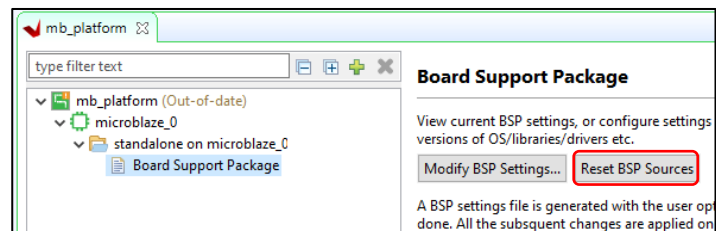
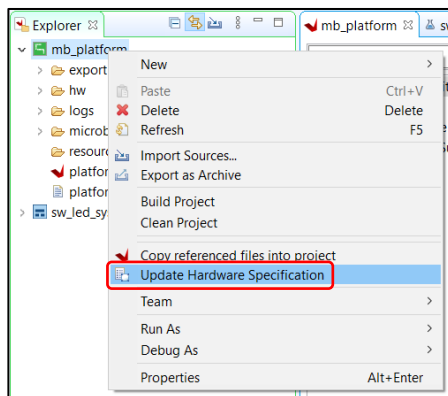
- A sensor_in bemenetet kössük rá a block design sw (DIP kapcsoló bemenet) portjára.
- Adjunk a megszakításkérő vonalakat összefogó Concat modulhoz egy újabb portot és ebbe kössük be a perifériánk irq kimenetét.
- Az AXI interfész bekötéséhez használjuk a Run Connection Automation segítségét.

A folyadéksztint jelző periféria bekötése után a rendszer blokkvázlata az alábbi ábrán látható.



Generáljuk a block design-t és exportáljuk a módosított hardverrel kapcsolatos információkat a Vitis IDE számára. Így a szintézis, az implementáció és a konfigurációs bitfolyam generálása alatt lesz időnk egy egyszerű teszt alkalmazás elkészítésére.

Mivel megváltozott a hardver, így az ide kapcsolódó információkat a Vitis IDE-n belül a platform projektben is frissíteni kell. Kattintsunk jobb gombbal a platform projekten és a menüből válasszuk ki az Update Hardware Specification lehetőséget, majd adjuk meg az új XSA fájlt. A platform projekt beállításoknál állítsuk alapállapotba a Board Support Package forráskódját (Reset BSP sources gomb). Ezután ha lefordítjuk a platform projektet, akkor a BSP már tartalmazni fogja a saját perifériáinkkal kapcsolatos információkat is, például az xparameters.h fájlban benne lesz a perifériához tartozó báziscím.



Hozzunk létre egy új alkalmazás projektet `lvl_test` néven és készítsünk egy egyszerű szoftver alkalmazást, amely megjeleníti az aktuális folyadékszintet az alsó 4 LED-en (LD0-LD3), valamint a hibajelzést az LD7 LED-en. A GPIO periféria kezeléséhez használjuk az alacsonyszintű eszközmeghajtót. Töltsük le az FPGA-ra a konfigurációs bitfolyamot és a szoftvert. Nézzük meg a megfelelő működést.

Szorgalmi feladatok:

- A gyakorlaton megvalósított AXI4-Lite busz interfész logika szemléletes, könnyen érthető, de nem a legegyszerűbb. Keressünk egyszerűbb, kevesebb erőforrást igénylő megvalósítási lehetőséget ehhez!
- A folyadékszint jelző perifériát AXI4-Lite helyett APB interfészen keresztül illesszük a processzorhoz, amely az előbbinél jóval egyszerűbben kezelhető. Ehhez a Vivado fejlesztői környezetben rendelkezésre áll az AXI APB Bridge IP.
- Jelenítsük meg az aktuális folyadékszintet a hétszegmenses kijelző DIG0 digitjén, hiba esetén egy E betű jelenjen meg. A kártyán egy 4 digitos kijelző található. Kell-e időmultiplexelt vezérlést alkalmazni? Hogy célszerű megvalósítani a szoftverben a hétszegmenses dekódert?