

Układy cyfrowe i systemy wbudowane 2

Dokumentacja projektu

Oscyloskop cyfrowy

Uczestnicy	Prowadzący	Termin zajęć
Iwo Bujkiewicz (226203)	Dr inż. Jarosław Sugier	Wtorek parzysty 15:00

1. Wprowadzenie

1. Cel i zakres projektu

Celem projektu było zbudowanie układu cyfrowego realizującego zadanie oscyloskopu cyfrowego. W zakres prac wchodziła implementacja wyświetlania zarejestrowanego cyfrowo z określoną częstotliwością próbkowania przebiegu sygnału analogowego na podłączonym do układu monitorze VGA.

2. Sprzęt

Do realizacji projektu wykorzystano mikroukład FPGA XC3S500E firmy Xilinx, zainstalowany na płycie Spartan-3E. Zestaw ten wyposażony był [1] w wyjście obrazu w standardzie VGA, przetwornik analogowo-cyfrowy z przedwzmacniaczem, a także zestaw przełączników i przycisków, które również wykorzystano.

Zewnętrznie do zestawu podłączano monitor VGA, obsługujący tryb 800x600@72Hz, oraz potencjometr, służący jako źródło sygnału analogowego do próbkowania.

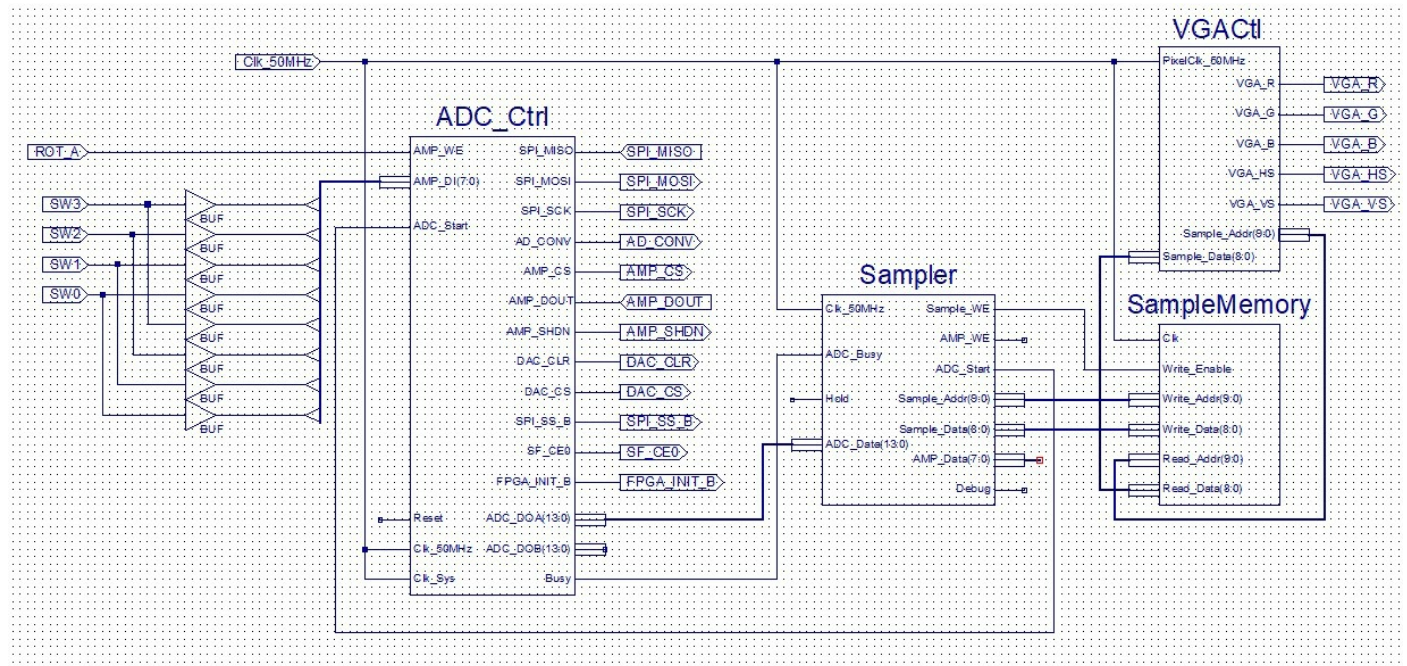
3. Zagadnienia teoretyczne

Zaprojektowany układ używa opisanych w [2] protokołów sterowania interfejsem VGA oraz przetwornikiem analogowo-cyfrowym (ADC) z przedwzmacniaczem, dostępnymi na płycie Spartan-3E. W celu ułatwienia korzystania z ADC, układ wykorzystuje moduł `ADC_Ctrl` zaczerpnięty z [3]. Dodatkowo, podczas implementacji wyświetlania obrazu przez interfejs VGA, skorzystano z opisu synchronizacji sygnałów dla trybu VGA 800x600@72Hz, dostępnego w [4]. Przy tworzeniu kodu VHDL modułów projektu korzystano również w celach referencyjnych z [5] oraz [6].

2. Projekt

1. Hierarchia

Głównym elementem projektu jest schemat połączeń logicznych.



Ryc. 2.1. Główny schemat układu

Na schemat składa się szereg modułów, odpowiadających za poszczególne funkcje podsystemowe:

- **ADC_Ctrl1** - Moduł autorstwa dra Sugiera, ułatwiający sterowanie przetwornikiem analogowo-cyfrowym
- **Sampler** - Moduł odpowiedzialny za pobieranie cyfrowych próbek sygnału z **ADC_Ctrl1** z odpowiednią częstotliwością i wpisywanie ich do pamięci
- **SampleMemory** - Pamięć dwuportowa przechowująca próbki
- **VGAct1** - Kontroler interfejsu VGA, pobierający próbki z pamięci i generujący na ich podstawie punkty na ekranie

W ogólnym ujęciu praca układu wygląda następująco:

- **Sampler** pobiera próbki cyfrowe z **ADC_Ctrl1**
- **SampleMemory** przechowuje próbki i umożliwia ich odczyt i zapis
- **VGAct1** prezentuje próbki na wyświetlaczu przez interfejs VGA

2. Moduły

Sampler

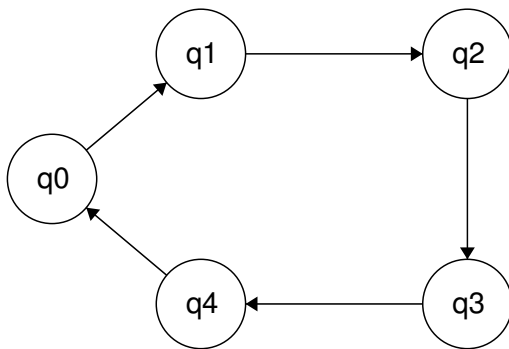
Zasada działania

Zadaniem **Sampler** a jest pobieranie próbek sygnału wejściowego, skonwertowanych na postać cyfrową przez ADC, i zapisywanie ich w pamięci układu.

1. **Sampler** wysyła do **ADC_Ctrl1** impuls **ADC_Start** i oczekuje na wyłączenie sygnału **ADC_Busy**
2. Po odebraniu na wejściu **ADC_Data** 14-bitowej próbki **Sampler** wybiera z niej 9 najstarszych bitów i zamienia reprezentowaną przez nie liczbę na przeciwną
3. **Sampler** wysyła 9-bitową próbkę do pamięci poprzez port **Sample_Data** i wpisuje ją pod odpowiedni adres ustawiony na porcie **Sample_Addr**, wysyłając do **SampleMemory** impuls **Sample_WE**

Maszyna stanów

Cały stan modułu byłby trudny do przedstawienia na grafie automatu, jednak wyróżnić można maszynę stanów służącą do pobierania próbek z ADC.



Ryc. 2.2. Sampler - Maszyna stanów

- **q0** - **Idle** - stan bezczynności
- **q1** - **StartSent** - stan tuż po wysłaniu impulsu **ADC_Start**
- **q2** - **AwaitingSample** - stan oczekiwania na otrzymanie próbki od ADC
- **q3** - **SampleAcquired** - próbka została odczytana, przygotowywanie do zapisu w pamięci
- **q4** - **WriteEnableSent** - stan tuż po wysłaniu impulsu **Sample_WE** do zapisu próbki

Definicje wejść i wyjść

```
entity Sampler is
  Port ( Clk_50MHz : in  STD_LOGIC;
        ADC_Busy : in  STD_LOGIC;
        ADC_Data : in  STD_LOGIC_VECTOR (13 downto 0);
        Hold : in  STD_LOGIC;
        Sample_WE : out  STD_LOGIC := '0';
        Sample_Addr : out  STD_LOGIC_VECTOR (9 downto 0) := "0000000000";
        Sample_Data : out  STD_LOGIC_VECTOR (8 downto 0) := "0000000000";
        AMP_WE : out  STD_LOGIC := '0';
        AMP_Data : out  STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0) := "00000000";
        ADC_Start : out  STD_LOGIC := '0';
        Debug : out  STD_LOGIC := '0');
end Sampler;
```

Wyjście **Debug** było potrzebne do rozwiązywania problemów z modułem i nie jest już wykorzystywane.

Sygnały wewnętrzne

```
architecture Behavioral of Sampler is
  Type SamplerState is (Ready);
  Type ScanState is (Idle, StartSent, AwaitingSample, SampleAcquired,
WriteEnableSent);

  Signal state : SamplerState := Ready;
  Signal scan_state : ScanState := Idle;

  Signal clock_counter : INTEGER := 0;
  Signal sample_counter : INTEGER := 0;
  Signal pixel_counter : INTEGER := 0;
```

W swoich wewnętrznych sygnałach **Sampler** przechowuje aktualny stan modułu (w aktualnej wersji zawsze **Ready**, gdyż nie zajmuje się inicjalizacją przedwzmacniacza ADC, jak zakładano na początku) oraz aktualny stan operacji uzyskiwania próbek. Oprócz tego, moduł posiada trzy wewnętrzne liczniki:

- `clock_counter` - przechowuje liczbę cykli zegara, które upłynęły od ostatniego rozpoczęcia pobierania próbek; służy to pobieraniu próbek w równych odstępach, ustalonych według częstotliwości próbkowania;
- `sample_counter` - przechowuje numer aktualnie pobieranej próbki; służy do określenia, pod jaki adres w pamięci należy zapisać próbkę;
- `pixel_counter` - służy odmierzaniu odstępów czasowych między kolejnymi odświeżeniami pionowymi VGA, aby zapobiec nadpisywaniu próbek aktualnie rysowanych na wyświetlaczu.

Procesy

```
Sample_scan : process ( Clk_50MHz ) is
begin
    if (rising_edge(Clk_50MHz) and state = Ready) then
        if (scan_state = Idle and clock_counter = 0 and Hold = '0') then
            ADC_Start <= '1';
            scan_state <= StartSent;
        elsif (scan_state = StartSent) then
            if (ADC_Busy = '1') then
                ADC_Start <= '0';
                scan_state <= AwaitingSample;
            end if;
        elsif (scan_state = AwaitingSample) then
            if (ADC_Busy = '0') then
                Sample_Data <= ADC_Data(13) & (not ADC_Data(12 downto 5));
                Sample_Addr <= std_logic_vector(to_unsigned(sample_counter, 10));
                scan_state <= SampleAcquired;
            end if;
        elsif (scan_state = SampleAcquired) then
            Sample_WE <= '1';
            scan_state <= WriteEnableSent;
        elsif (scan_state = WriteEnableSent) then
            Sample_WE <= '0';
            scan_state <= Idle;
        end if;
    end if;
end process;
```

Proces `Sample_scan` implementuje maszynę stanów, realizującą pobieranie próbek z ADC i zapisywanie ich do `SampleMemory`.

```
Sample_ct : process ( Clk_50MHz ) is
begin
    if (rising_edge(Clk_50MHz) and state = Ready) then
        if (clock_counter = 0 and Hold = '0') then
            sample_counter <= sample_counter + 1;
            if (sample_counter >= 800 and pixel_counter >= 692640) then
                sample_counter <= 0;
            end if;
        end if;
    end if;
end process;
```

`Sample_ct` zlicza pobierane próbki, aby określić dla każdej z nich adres w pamięci.

```

Sampling_rate_ct : process ( Clk_50MHz, clock_counter ) is
begin
    if (falling_edge(Clk_50MHz)) then
        if (clock_counter < 500000) then
            clock_counter <= clock_counter + 1;
        else
            clock_counter <= 0;
        end if;
    end if;
end process;

```

Sampling_rate_ct odmierza równe odstępy między możliwymi włączeniami impulsu **ADC_Start**, aby próbki pobierane były zgodnie z ustaloną częstotliwością próbkowania. Proces ten odmierza 500 tysięcy cykli zegara, zatem częstotliwość próbkowania wynosi 100 Hz (\pm odchylenie taktu zegara).

```

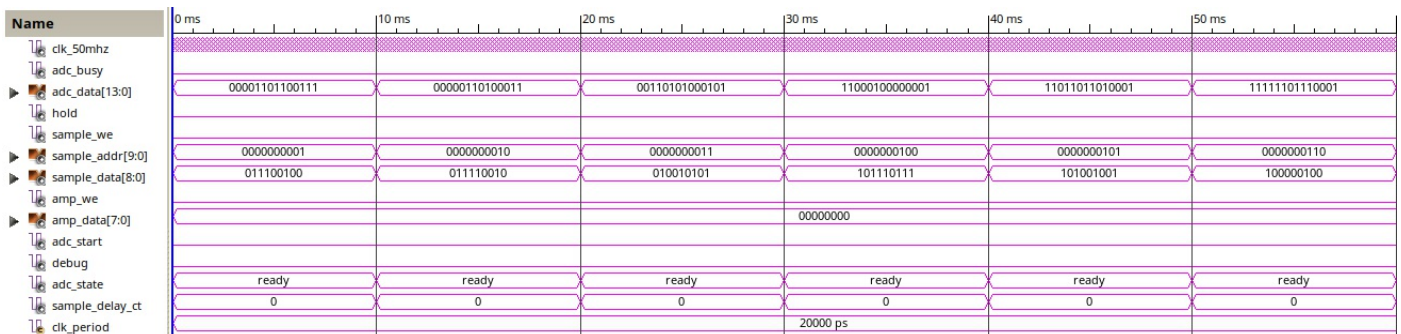
Pixel_ct : process ( Clk_50MHz, pixel_counter ) is
begin
    if (falling_edge(Clk_50MHz)) then
        if (pixel_counter < 692640) then
            pixel_counter <= pixel_counter + 1;
        else
            pixel_counter <= 0;
        end if;
    end if;
end process;

```

Pixel_ct odmierza czas odświeżenia pojedynczej klatki obrazu na wyświetlaczu, aby próbki mogły być zapisywane do pamięci tylko raz na odświeżenie.

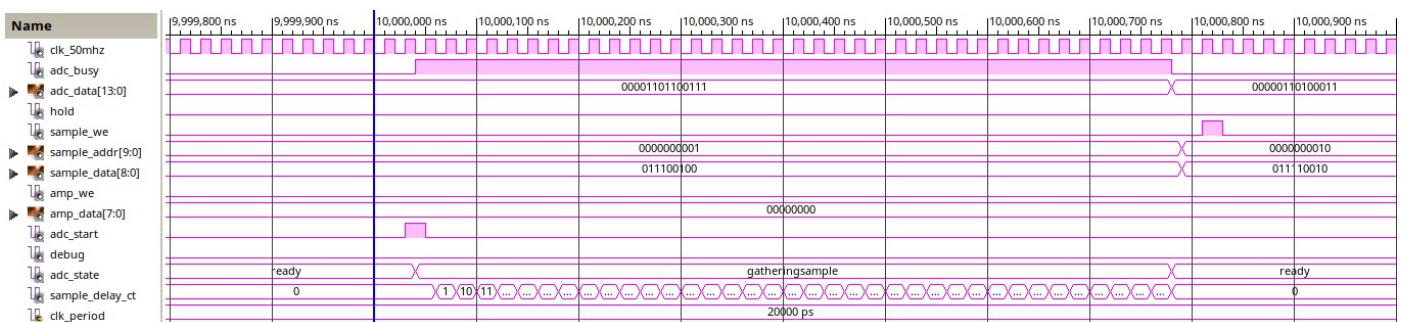
Symulacja

W symulacji użyto dodatkowych sygnałów **adc_state** oraz **sample_delay_ct**, niebędących częścią modułu.



Ryc. 2.3. Sampler - Symulacja

Wycinek symulacji modułu widoczny na Ryc. 2.3. przedstawia pobieranie próbek co 10 ms, czyli 100 razy na sekundę, zgodnie z częstotliwością próbkowania. Adres do zapisu próbki w pamięci jest za każdym razem inkrementowany, a zapisywana wartość jest poprawnie ustawiana na 9 najstarszych bitów liczby otrzymanej od ADC.



Ryc. 2.4. Sampler - Symulacja

Na Ryc. 2.4. widać w większym szczególe proces pobrania pojedynczej próbki. `sample_delay_ct` odmierza 36 cykli zegara, podczas których sygnał `ADC_Busy` jest włączony, a `Sampler` oczekuje na próbkę. Gdy ją otrzyma, ustawia wartość do niej przeciwną oraz jej numer odpowiednio na wyjścia `Sample_Data` i `Sample_Addr`, a następnie wysyła impuls `Sample_WE`.

SampleMemory

Zasada działania

`SampleMemory` implementuje dwuportowy RAM do przechowywania zebranych z ADC próbek.

1. Gdy wejście `Write_Enable` jest wysokie, pod adres w pamięci określony sygnałem `Write_Addr` zapisywana jest pojedyncza próbka o wartości określonej sygnałem `Write_Data`
2. Na wyjście `Read_Data` zawsze podawana jest wartość próbki przechowywanej pod adresem określonym przez `Read_Addr`

Definicje wejść i wyjść

```
entity SampleMemory is
  Port ( Clk : in  STD_LOGIC;
        Write_Enable : in  STD_LOGIC;
        Write_Addr : in  STD_LOGIC_VECTOR (9 downto 0);
        Write_Data : in  STD_LOGIC_VECTOR (8 downto 0);
        Read_Addr : in  STD_LOGIC_VECTOR (9 downto 0);
        Read_Data : out STD_LOGIC_VECTOR (8 downto 0));
end SampleMemory;
```

Sygnały wewnętrzne

```
architecture Behavioral of SampleMemory is
  Type storage_type is array (0 to 799) of std_logic_vector (8 downto 0);
  Signal samples : storage_type := ("000000000", "000000000", "000000000",
  "000000000", "000000000", "000000000", "000000000", "000000000",
  "000000000", "000000000", "000000000", "000000000", "000000000",
  "000000000", "000000000", "000000000", "000000000", "000000000",
  (...)
```

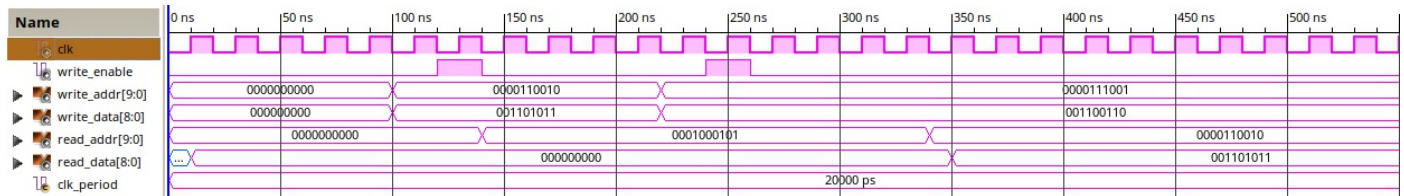
Jedynym stanem wewnętrznym `SampleMemory` są zapisane próbki. Przechowywane są one w tablicy 800 elementów typu `STD_LOGIC_VECTOR`, których początkowe wartości (zera) zdefiniowane są na stałe w deklaracji sygnału.

Procesy

```
Read_write : process (Clk)
begin
  if ( rising_edge(Clk) ) then
    if (Write_Enable = '1') then
      samples(to_integer(unsigned((Write_Addr)))) <= Write_Data;
    end if;
    Read_Data <= samples(to_integer(unsigned((Read_Addr))));
  end if;
end process;
```

Jedyny proces tego modułu jest odpowiedzialny za realizację całej jego funkcjonalności - zapisywania próbek przy wysokim `Write_Enable` oraz odczytywania próbek na podstawie `Read_Addr`.

Symulacja



Ryc. 2.5. SampleMemory - Symulacja

Wykres symulacji ilustruje działanie modułu. Można zauważyć odczyt próbki **001101011** spod adresu **0000110010**, która została tam uprzednio zapisana.

VGACT1

Zasada działania

VGACT1 służy do wyświetlania zapisanych próbek na zewnętrznym wyświetlaczu VGA.

- VGACT1** wylicza, na podstawie wewnętrznych liczników, adres próbki do pobrania z pamięci i ustawia go na wyjściu **Sample_Addr**.
- Od **SampleMemory** odbierana jest wartość próbki na wejściu **Sample_Data**.
- Jeśli **VGACT1** odświeża aktualnie pixel (**Sample_Addr** , **Sample_Data**), to rysuje na wyświetlaczu biały punkt, ustawiając wyjścia **VGA_R** , **VGA_G** oraz **VGA_B** na stan wysoki; w przeciwnym przypadku używa koloru czarnego, czyli stanu niskiego na wspomnianych wyjściach.
- VGACT1** synchronizuje wyświetlacz z układem za pomocą sygnałów vertical sync (**VGA_VS**) i horizontal sync (**VGA_HS**), sterowanych na podstawie wewnętrznych liczników, w taki sposób, aby wyświetlacz pracował w trybie 800x600@72Hz

Definicje wejść i wyjść

```
entity VGACT1 is
    Port ( PixelClk_50MHz : in  STD_LOGIC;
          Sample_Data : in  STD_LOGIC_VECTOR (8 downto 0);
          Sample_Addr : out  STD_LOGIC_VECTOR (9 downto 0) := "0000000000";
          VGA_R : out  STD_LOGIC := '0';
          VGA_G : out  STD_LOGIC := '0';
          VGA_B : out  STD_LOGIC := '0';
          VGA_HS : out  STD_LOGIC := '0';
          VGA_VS : out  STD_LOGIC := '0');
end VGACT1;
```

Sygnały wewnętrzne

```
architecture Behavioral of VGACT1 is
    Signal vs_counter : INTEGER := 0;
    Signal hs_counter : INTEGER := 0;
```

VGACT1 przechowuje w dwóch licznikach aktualną pionową i poziomą pozycję na powierzchni wyświetlacza, aby wiedzieć, który pixel jest aktualnie rysowany oraz kiedy należy wysłać niskie impulsy synchronizujące VGA.

Procesy

```
Horizontal_sync : process ( PixelClk_50MHz, hs_counter ) is
begin
    if (rising_edge(PixelClk_50MHz)) then
        if (hs_counter < -64) then
            VGA_HS <= '0';
        else
            VGA_HS <= '1';
        end if;
    end if;
end process;
```

Proces `Horizontal_sync` odpowiada za wysłanie w odpowiednim momencie synchronizacji poziomej niskiego impulsu na wyjściu `VGA_HS`, aby wyświetlacz rozpocząć odświeżanie kolejnej linii.

```
Vertical_sync : process ( PixelClk_50MHz, vs_counter ) is
begin
    if (rising_edge(PixelClk_50MHz)) then
        if (vs_counter < -23) then
            VGA_VS <= '0';
        else
            VGA_VS <= '1';
        end if;
    end if;
end process;
```

`Vertical_sync` wypełnia to samo zadanie w synchronizacji pionowej, aby wyświetlacz mógł rozpocząć odświeżanie kolejnej klatki obrazu.

```
Pixel_counters : process ( PixelClk_50MHz, hs_counter ) is
begin
    if (falling_edge(PixelClk_50MHz)) then
        if (hs_counter = 855) then
            hs_counter <= -184;
            if (vs_counter = 636) then
                vs_counter <= -29;
            else
                vs_counter <= vs_counter + 1;
            end if;
        else
            hs_counter <= hs_counter + 1;
        end if;
    end if;
end process;
```

Proces `Pixel_counters` aktualizuje liczniki `vs_counter` oraz `hs_counter`, zliczając linie obrazu i pixele w liniach, uwzględniając także zakresy startowe i końcowe dla każdej klatki i linii, znajdujące się poza wyświetlanym obrazem.

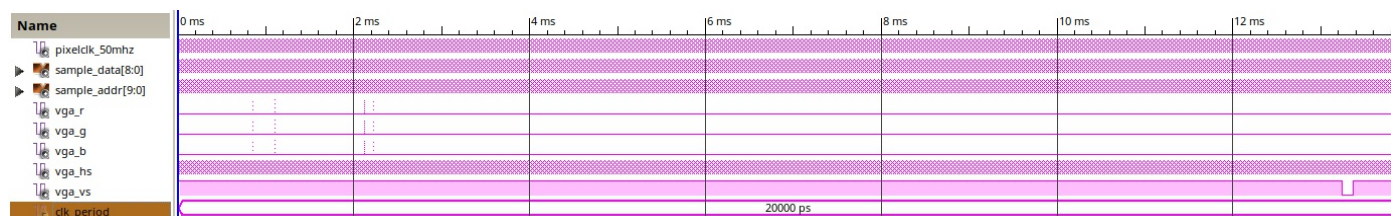

```

Pixel_search : process ( vs_counter, hs_counter ) is
begin
  if (hs_counter >= 0 and hs_counter < 800) then
    Sample_Addr <= std_logic_vector(to_unsigned(hs_counter, 10));
    if (vs_counter = to_integer(unsigned(Sample_Data))) then
      VGA_R <= '1';
      VGA_G <= '1';
      VGA_B <= '1';
    else
      VGA_R <= '0';
      VGA_G <= '0';
      VGA_B <= '0';
    end if;
  else
    VGA_R <= '0';
    VGA_G <= '0';
    VGA_B <= '0';
  end if;
end process;

```

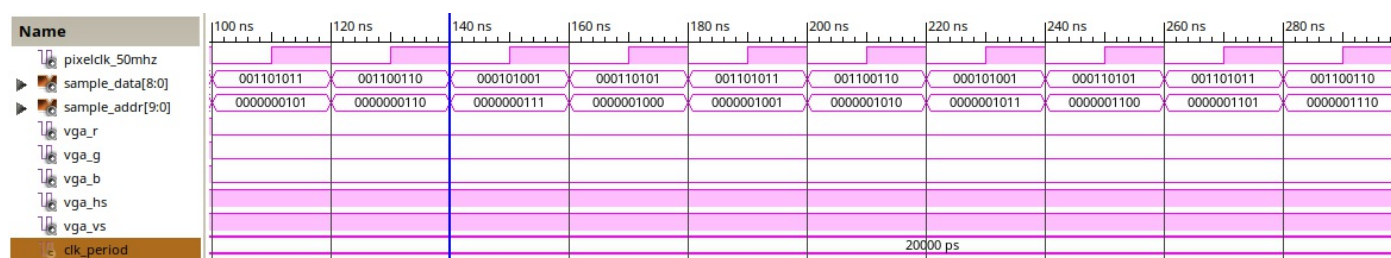
`Pixel_search` odczytuje próbki z `SampleMemory` i porównuje ich wartości ze współrzędną aktualnie odświeżanej linii obrazu. Jeśli się zgadzają, ustawia na wyjściu koloru VGA kolor biały, w przeciwnym wypadku kolor czarny.

Symulacja



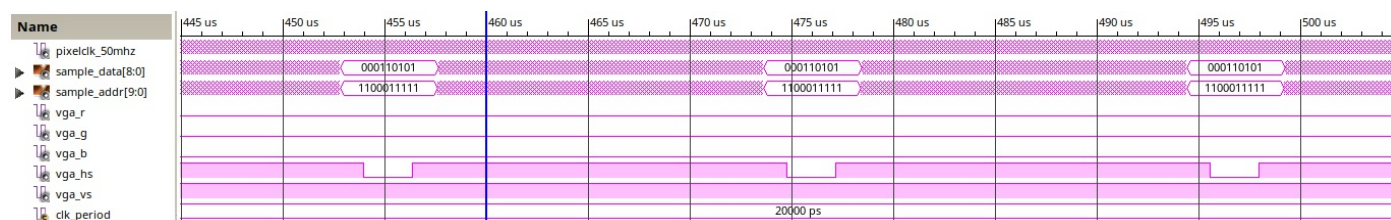
Ryc. 2.6. VGActl - Symulacja

Ryc. 2.6. przedstawia okres czasu odpowiadający odświeżeniu jednej klatki obrazu. Można zaobserwować niski impuls na wyjściu `VGA_VS` podczas przejścia do kolejnej klatki, a także zmiany `VGA_R`, `VGA_G` i `VGA_B` podczas rysowania białych punktów reprezentujących próbki.



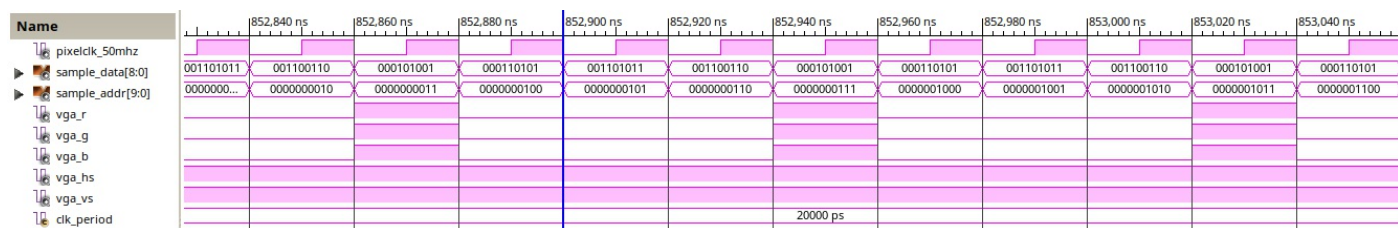
Ryc. 2.7. VGActl - Symulacja

Na Ryc. 2.7. można zaobserwować odczytywanie kolejnych próbek w takt zegara 50 MHz.



Ryc. 2.8. VGActl - Symulacja

Na Ryc. 2.8. widoczne jest odświeżenie dwóch pełnych linii obrazu. Wyróżniają się niskie impulsy na wyjściu `VGA_HS` oraz przerwa w odczycie próbek, gdy liczniki `vs_counter` i `hs_counter` wskazują na pozycje poza obrazem.



Ryc. 2.9. VGACTl - Symulacja

Rozświetlanie pixeli obrazu widoczne jest na Ryc. 2.9.

ADC_Ctrl

Opis modułu można znaleźć w [3].

3. Implementacja

1. Rozmiar układu

Zaprojektowany układ wykorzystuje stosunkowo niewielką część zasobów mikroukładu XC3S500E. Największe wykorzystanie zasobów można zauważyć wśród bloków wejścia/wyjścia, co spowodowane jest użyciem przez moduł **ADC_Ctrl** dużej liczby portów do komunikacji z ADC.

Logic Utilization	Used	Available	Utilization
Total Number Slice Registers	262	9,312	2%
Number used as Flip Flops	252		
Number used as Latches	10		
Number of 4 input LUTs	177	9,312	1%
Number of occupied Slices	223	4,656	4%
Number of Slices containing only related logic	223	223	100%
Number of Slices containing unrelated logic	0	223	0%
Total Number of 4 input LUTs	347	9,312	3%
Number used as logic	176		
Number used as a route-thru	170		
Number used as Shift registers	1		
Number of bonded IOBs	31	232	13%
Number of IDDR2s used	1		
Number of ODDR2s used	2		
Number of RAMB16s	1	20	5%
Number of BUFGMUXs	1	24	4%
Average Fanout of Non-Clock Nets	2.62		

Poniżej widoczne są statystyki użycia różnych elementów logicznych.

- Comparators=9
 - 32-bit comparator equal=1
 - 32-bit comparator greatequal=3
 - 32-bit comparator less=5
- Counters=5
 - 32-bit up counter=5
- Latches=1
 - 10-bit latch=1
- RAMs=1
 - 800x9-bit dual-port block RAM=1
- Registers=28
 - Flip-Flops=28

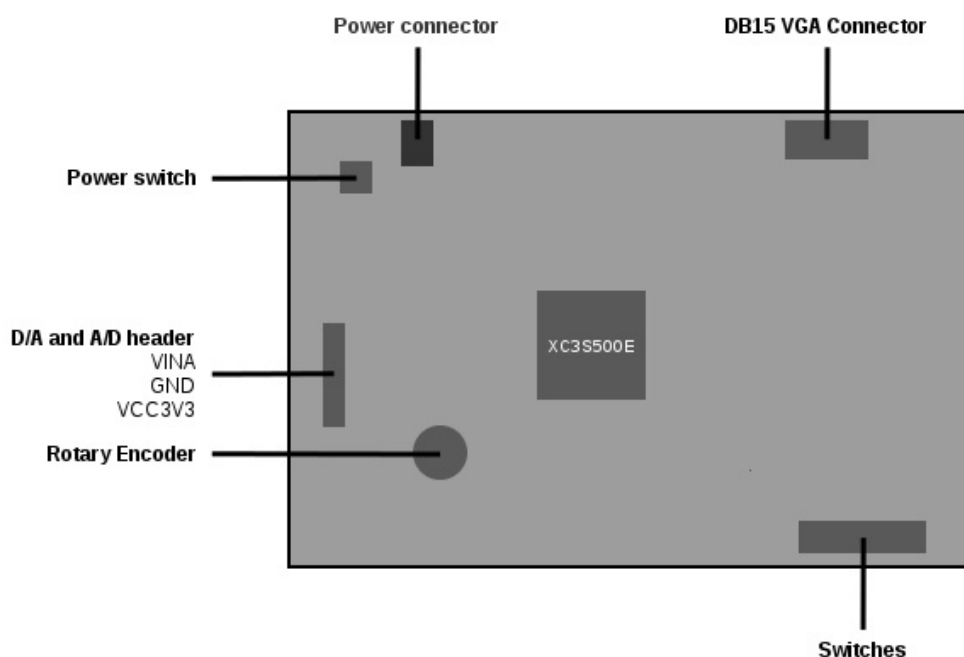
2. Szybkość pracy

Cały układ taktowany jest zegarem 50 MHz, czyli o okresie 20 ns. Ograniczenia synchronizacyjne układu powodują, że faktyczny okres zegara nieznacznie odbiega od idealnego i wynosi 19.944 ns.

	Met	Constraint	Check	Worst Case Slack	Best Case Achievable	Timing Errors	Timing Score
1	Yes	NET "Clk_50MHz_BUFGP/IBUFG" PERIOD = 20 ns HIGH 50%	SETUP HOLD	0.028ns 0.574ns	19.944ns	0 0	0 0

3. Podręcznik obsługi

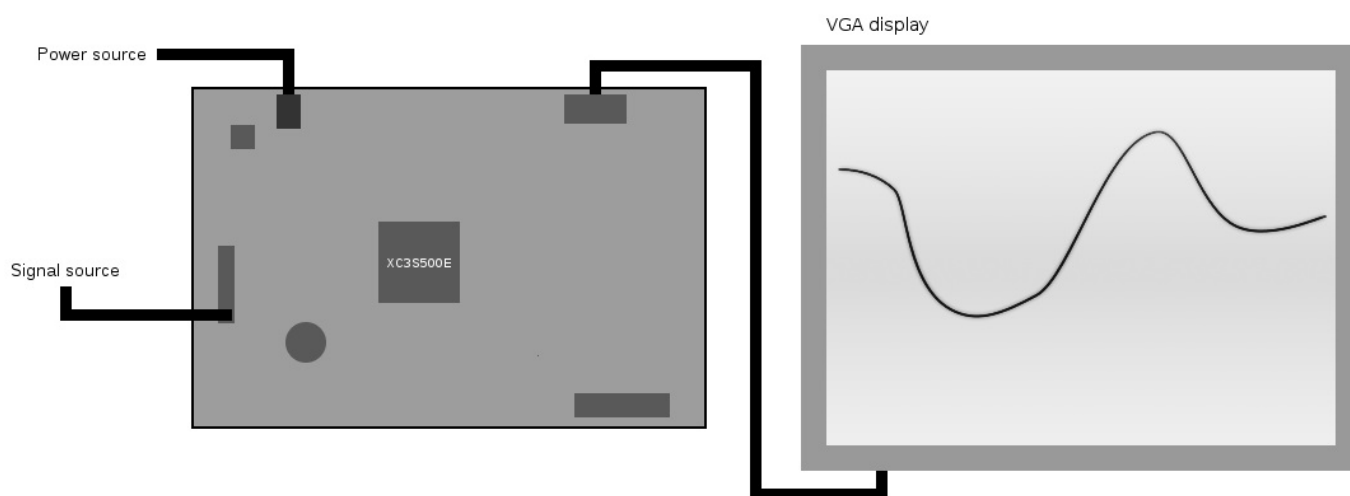
Oscyloskop powinien zostać zaprogramowany na płycie Spartan-3E z mikroukładem FPGA XC3S500E.



Ryc. 3.1. Istotne elementy płyty Spartan-3E

Aby uruchomić oscyloskop, należy wykonać następujące czynności:

1. Podłączyć płytę Spartan-3E do odpowiedniego źródła zasilania
2. Podłączyć do 15-pinowego złącza VGA zewnętrzny wyświetlacz (dowolne urządzenie mogące wyświetlać obraz w rozdzielczości 800x600 z częstotliwością odświeżania pionowego 72 Hz)
3. Podłączyć źródło sygnału analogowego do styku **VINA** w bloku złącz **D/A and A/D header** ; Napięcie sygnału będzie mierzone względem potencjału na styku **GND** w tym samym bloku - można użyć tego styku jako wartość odniesienia dla urządzenia będącego źródłem sygnału. Dostępny jest również styk **VCC3V3** , przenoszący potencjał +3.3 V względem **GND** , który również może być wykorzystany jako wartość odniesienia.
4. Włączyć zasilanie płyty za pomocą przełącznika opisanego jako "Power switch"
5. Ustawić przełączniki, opisane jako "Switches", w pozycjach odpowiadających żadanemu wzmocnieniu sygnału wejściowego przez przedwzmacniacz ADC; Możliwe wartości wzmocnień można znaleźć w [2] (Rozdział 10. "Analog Capture Circuit", sekcja "Programmable Pre-Amplifier", ustęp "Programmable Gain"). Ustawienie przełącznika w pozycji wysokiej (**1**) oznacza przesunięcie go w stronę środka płyty.
6. Przekręcić pokrętkę "Rotary Encoder" w prawo o jeden przeskok
7. Powtórzyć poprzedni krok, jeżeli występuje problem z obserwacją próbkowanego sygnału



Ryc. 3.2. Schemat połączenia urządzeń

4. Podsumowanie

Zaprojektowany układ działa zgodnie z oczekiwaniami, jednak nie jest pozbawiony wad.

Przed wszystkim inicjalizacja przedwzmacniacza ADC realizowana jest ręcznie za pomocą pokrętki na płycie, zamiast automatycznie z poziomu układu, co znacznie utrudnia wygodne korzystanie z urządzenia. Występują też pewne niedoskonałości w kodzie modułów, które nie uniemożliwiają używania oscyloskopu, jednak mogą okazać się problematyczne w pewnych zastosowaniach.

Obecnie częstotliwość próbkowania jest ustalona na stałe wewnątrz kodu modułu **Sampler** . Dużą poprawą użyteczności oscyloskopu byłoby umożliwienie zmiany częstotliwości próbkowania za pomocą pokrętki. Moduł został do takiej zmiany wstępnie przystosowany, jednak nie posiada on odpowiedniej funkcjonalności.

W układzie zaimplementowano tzw. "Hold", czyli wstrzymanie próbkowania sygnału wejściowego w celu łatwiejszej jego analizy na wyświetlaczu. Niestety, ze względu na problemy z inicjalizacją przedwzmacniacza ADC i konieczność wyprowadzenia innych wejść na przełączniki płyty, funkcjonalność "Hold" nie jest dostępna w gotowej implementacji, co dla poprawy użyteczności oscyloskopu powinno zostać poprawione.

Autor projektu doszedł do wniosku, że gdyby od samego początku stosował w kodzie VHDL wzorzec maszyny stanów, tworzenie modułów układu zajęłoby o wiele mniej czasu.

5. Literatura

1. Xilinx, Inc., 2013. *Spartan-3E FPGA Family Data Sheet*
(https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds312.pdf)
2. Xilinx, Inc., 2011. *Spartan-3E FPGA Starter Kit Board User Guide*
(https://www.xilinx.com/support/documentation/boards_and_kits/ug230.pdf)
3. Sugier, J. *Zajęcia projektowe do przedmiotu "Układy cyfrowe i systemy wbudowane": Zestawy Digilent S3E-Starter*
(http://www.zsk.iia.pwr.edu.pl/zsk_ftp/fpga/)
4. *VESA Signal 800 x 600 @ 72 Hz timing* (SECONS Ltd., 2008)
(<http://tinyvga.com/vga-timing/800x600@72Hz>)
5. Zhang, W., 2001. *VHDL Tutorial: Learn by Example* (University of California, Riverside, 2001)
(<http://esd.cs.ucr.edu/labs/tutorial/>)
6. Hilbert, S., 2013. *VHDL Type Conversion* (BitWeenie, LLC, 2013)
(<http://www.bitweenie.com/listings/vhdl-type-conversion/>)