

Mateusz Burniak 218321
Krzysztof Cyran 218405
grupa: śr/11/TP

Urządzenia Cyfrowe i Systemy Wbudowane 2 projekt

Gra w labirynt na VGA
z użyciem drążka sterowego

Prowadzący:
dr inż. Jarosław Sugier

Data oddania projektu:
31 V 17

Spis treści

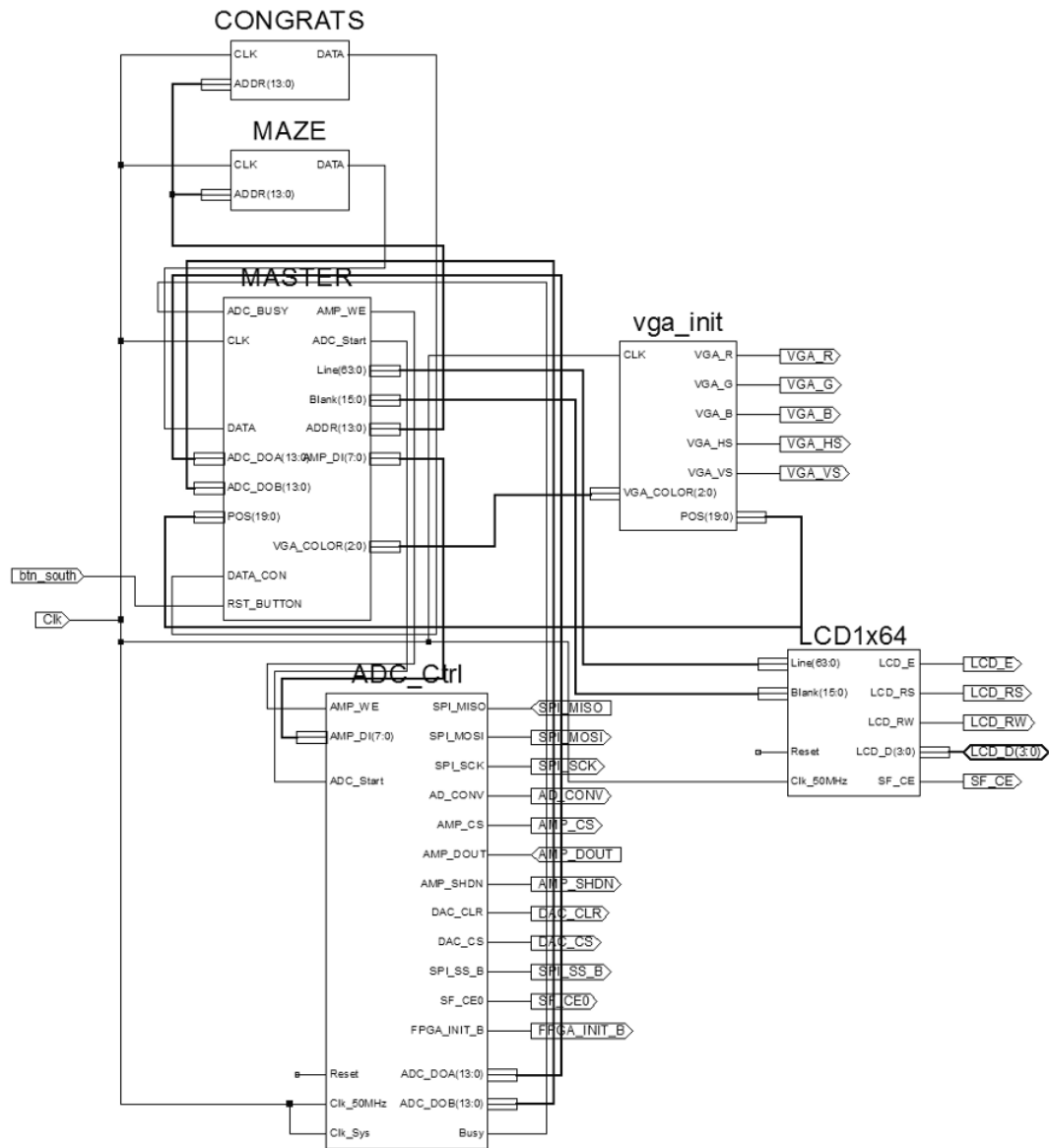
| | | |
|----------|----------------------------------|-----------|
| 1 | WSTĘP | 3 |
| 2 | OPIS | 4 |
| 2.1 | MASTER | 5 |
| 2.2 | vga_init | 9 |
| 2.2.1 | SYMULACJA | 11 |
| 2.3 | ROM | 12 |
| 2.4 | POZOSTAŁE MODUŁY | 13 |
| 3 | IMPLEMENTACJA | 14 |
| 3.1 | WYKORZYSTANIE SPRZĘTU | 14 |
| 3.2 | PODRĘCZNIK UŻYTKOWNIKA | 15 |
| 4 | PODSUMOWANIE | 17 |
| 4.1 | KIERUNKI DALSZYCH PRAC | 18 |
| 5 | SPIS LITERATURY | 19 |

1 WSTĘP

Poniższy dokument jest dokumentacją techniczną projektu wykonanego w ramach zajęć laboratoryjnych z Układów Cyfrowych i Systemów Wbudowanych 2. Jego głównym celem jest przedstawienie wszelkich aspektów wykonania projektu, prezentacja struktury, komentarze dotyczące najważniejszych modułów i kluczowych fragmentów kodu, jak również umożliwienie kontynuacji projektu osobom z nim niezwiązanym. Zadaniem do wykonania było stworzenie prostej gry na układzie FPGA Spartan 3E.

Do realizacji wykorzystano dwa dodatkowe urządzenia peryferyjne - monitor VGA oraz analogowy drążek sterowy. Obsługa urządzeń peryferyjnych okazała się pierwszym i podstawowym zadaniem. W przypadku monitora VGA korzystano z pomocy dokumentacji technicznej firmy Xilinx[1]. Dużym ułatwieniem okazały się także gotowe moduły do obsługi wyświetlacza LCD, czy też przetwornika analogowo-cyfrowego, dostępne na stronie prowadzącego przedmiotu[2]. Wraz z wykonaniem pierwszych zadań wykształcała się idea końcowego projektu. Postawiono na grę, w której gracz poruszając małym kwadratem po ekranie przy pomocy drążka sterowego musi przejść labirynt. Dodano także pomiar czasu wyświetlany na ekranie LCD. Całość projektu zrealizowana została na systemie Windows w środowisku Xilinx ISE stosując język VHDL. Przy pisaniu modułów korzystano głównie z wiedzy nabytej na wykładzie obu semestrów realizowania Układów Cyfrowych i Systemów Wbudowanych[3]. Programowanie płyty Spartan 3E odbywało się przy pomocy aplikacji iMPACT.

2 OPIS

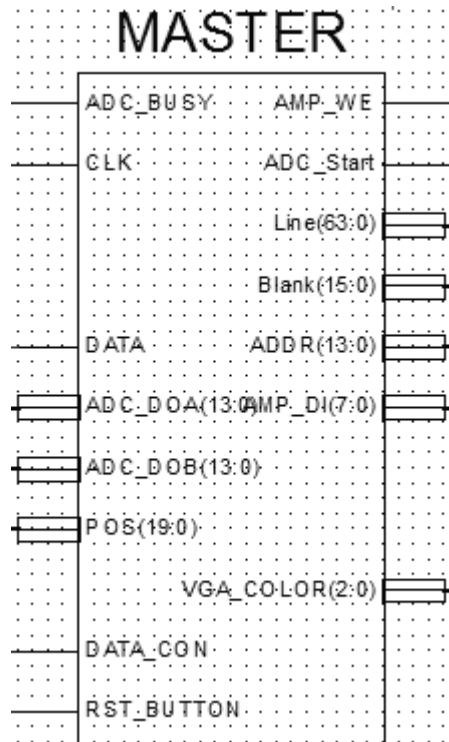


Rysunek 1: Schemat całego projektu

Powyższy rysunek to schemat projektu. Widać na nim wszystkie stworzone moduły.

Projekt ma strukturę gwiazdzistą, gdyż każdy moduł połączony jest z modułem głównym MASTER.

2.1 MASTER



Rysunek 2: Schemat modułu MASTER

Moduł MASTER odpowiada za całą logikę gry. Komunikuje się ze wszystkimi innymi modułami.

Znajdują się w nim sygnały wewnętrzne, które zawierają aktualną pozycję kwadratu i aktualnego piksela, jak również inne, potrzebne do liczenia upływającego czasu.

20-bitowy wektor wejściowy POS dzielony jest po 10 bitów na pozycję w pionie i poziomie do sygnałów wewnętrznych HPOS i VPOS.

Listing 1: Pobranie aktualnego adresu

```
HPOS <= signed('0' & POS(19 downto 10));
VPOS <= signed('0' & POS(9 downto 0));
```

Moduł MASTER steruje również wzmocnieniem odbiornika analogowego, wysyłając impulsy na AMP_WE i ADC_Start w odpowiednich momentach [1].

Listing 2: Sterowanie wzmocnieniem obiornika analogowo-cyfrowego

```
AMP_WE <= '1' when HPOS = 0 and VPOS = 0 else '0';
AMP_DI <= X"22";
ADC_Start <= '1' when HPOS = HMAX and
               VPOS = VMAX else '0';
```

MASTER przesyła dane na wyświetlacz LCD, czyli ustawia które pola wyświetlacza mają być zapalone i jakie znaki mają się wyświetlać. Są to odczyty z wejścia analogowego i aktualny czas gry.

Listing 3: Sterowanie wyświetlaczem LCD

```
Blank <= X"0C30";
Line <= ADC_DOA & "00" & X"00" &
        ADC DOB & "00" & X"00" &
        STD_LOGIC_VECTOR(PLAYTIME);
```

Kolejnym zadaniem, które wykonuje moduł MASTER to przygotowanie adresu do zapytania pamięci ROM z modułu MAZE. Ma to na celu sprawdzenie, czy aktualny piksel należy do labiryntu, czy jest tłem. Po zakończeniu gry wartości pobierane są z pamięci ROM modułu CONGRATS.

Listing 4: Ustawienie adresu w pamięci ROM

```
ADDR <= STD_LOGIC_VECTOR(VPOS(9 downto 3)) &
        STD_LOGIC_VECTOR(HPOS(9 downto 3));
```

Jeśli aktualny piksel jest wewnątrz kwadratu, to MASTER ustawia jego kolor na kolor fuksji. Jeśli jest ścianą labiryntu, to ustawia jego kolor na niebieski. W innym przypadku ustawianym kolorem jest kolor żółty. Po skończonej grze kolory pikseli brane są z moduły CONGRATS.

Listing 5: Sterowanie kolorem

```
VGA_COLOR_INT <= DATA_CON & DATA_CON & not DATA_CON
when TIMER_EN = '0'
else B"101" when HPOS > BOX_HPOS and
```

```

HPOS < BOX_HPOS + SIDE and
VPOS > BOX_VPOS and
VPOS < BOX_VPOS + SIDE
else DATA & DATA & not DATA;

```

W procesie TIMER obliczany jest czas gry z dokładnością do 0.1 sekundy. Jeśli ustawiona jest flaga TOUCHING, to naliczana jest kara czasowa.

Listing 6: Naliczanie kary czasowej

```

if TOUCHING = '1' and TIMER_EN = '1' then
    PLAYTIME <= PLAYTIME + 1;
end if;

```

Ważnym elementem modułu MASTER jest obsługa przycisku RESET, zerującego pomiar czasu gry oraz pozycję poruszanego kwadratu. Przycisk ten działa zarówno w trakcie, jak i po ukończeniu rozgrywki.

Listing 7: Sterowanie restartem

```

process (CLK)
begin
    if rising_edge(CLK) then
        if RST_BUTTON = '1' then
            RESTART <= '1';
        else
            RESTART <= '0';
        end if;
    end if;
end process;

```

Najważniejszym elementem modułu MASTER jest proces BOX. Odpowiada on za aktualizację pozycji sterowanego przez drążek sterowy kwadratu w kolorze fukcji. Do aktualnej pozycji kwadratu dodawane są trzy najstarsze bity otrzymane z kontrolera analogowo-cyfrowego. Zapewnia to płynność ruchu.

Listing 8: Aktualizowanie pozycji kwadratu

```

if HPOS = 0 and VPOS = 0 then
    BOX_HPOS <= BOX_HPOS - signed(ADC_DOA(13 downto 11));
    BOX_VPOS <= BOX_VPOS + signed(ADC_DOB(13 downto 11));
end if;

```

Kwadrat nie ma możliwości wyjść poza planszę lub wejść w ścianę labiryntu.

Listing 9: Zapobieganie wyjścia poza mapę

```
if BOX_HPOS < 0 then
    BOX_HPOS <= to_signed(0, 11);
elsif BOX_HPOS > HMAX - SIDE then
    BOX_HPOS <= HMAX - SIDE;
end if;

if BOX_VPOS < 0 then
    BOX_VPOS <= to_signed(0, 11);
elsif BOX_VPOS > VMAX - SIDE then
    BOX_VPOS <= VMAX - SIDE;
end if;
```

Próba wejścia w ścianę powoduje ustawienie flagi TOUCHING i odjęcie wartości, która została wcześniej dodana.

Listing 10: Przywracanie pozycji kwadratu

```
if TOUCHING = '1' then
    TOUCHING <= '0';
    BOX_HPOS <= BOX_HPOS + signed(ADC_DOA(13 downto 11));
    BOX_VPOS <= BOX_VPOS - signed(ADC_DOB(13 downto 11));
end if;

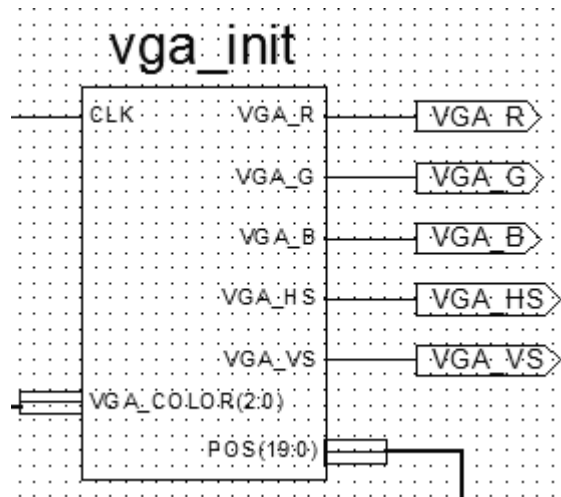
TOUCHING <= '0';
if DATA = '0' and
    HPOS > BOX_HPOS and HPOS < BOX_HPOS + SIDE and
    VPOS > BOX_VPOS and VPOS < BOX_VPOS + SIDE then
    TOUCHING <= '1';
end if;
```

Kiedy pozycja kwadratu spełnia warunki końcowe, to dezaktywowana jest flaga TIMER_EN, która zatrzymuje pomiar czasu.

Listing 11: Zatrzymywanie pomiaru czasu

```
if BOX_VPOS < 2 then
    TIMER_EN <= '0';
end if;
```


2.2 vga_init



Rysunek 3: Schemat modułu vga_init

Moduł vga_init oblicza timingi, które wymagane są przez standard VGA. Jego wyjściem jest pozycja aktualnego piksela zapisana jako 20 bitowy wektor. Moduł ten jako wejście przyjmuje 3 bitowy numer koloru, który ma wyświetlić na pikselu. Dodatkowo połączony jest z zewnętrznymi pinami Spartana.

Wewnątrz znajdują się dwa liczniki modulo liczące w górę. Pierwszy z nich odlicza pozycję w poziomie w sygnale HPOS i kiedy osiąga wartość maksymalną, aktywuje impuls VGA_HS.

Listing 12: Sterowanie pozycją piksela w poziomie

```
HPOS_CNT: process (CLK)
begin
    if rising_edge(CLK) then
        if HPOS = HPOS_MAX then
            HPOS <= 0;
        else
            HPOS <= HPOS + 1;
        end if;
    end if;
end process HPOS_CNT;
```

Drugi licznik zwiększa pozycję w pionie w sygnale VPOS, kiedy licznik HPOS osiąga wartość maksymalną i odpowiada za przeniesienie aktualnego piksela na początek ekranu aktywując VGA_VS.

Listing 13: Sterowanie pozycją piksela w pionie

```
VPOS_CNT: process (CLK)
begin
    if rising_edge(CLK) and HPOS = HPOS_MAX then
        if VPOS = VPOS_MAX then
            VPOS <= 0;
        else
            VPOS <= VPOS + 1;
        end if;
    end if;
end process VPOS_CNT;
```

Sygnał wyjściowy POS jest konkatenacją 10-bitowych wektorów HPOS i VPOS. Kierowany jest do modułu MASTER.

Listing 14: Przypisanie wektora z pozycją piksela

```
POS <= STD_LOGIC_VECTOR(to_unsigned(HPOS, 10)) &
      STD_LOGIC_VECTOR(to_unsigned(VPOS, 10));
```

Kolory ustawiane są poprzez sygnały wyjściowe VGA_R, VGA_G, VGA_B.

Listing 15: Ustawienie kolorów

```
VGA_R <= VGA_COLOR(2) when
    HPOS < HT_DISP and VPOS < VT_DISP else '0';
VGA_G <= VGA_COLOR(1) when
    HPOS < HT_DISP and VPOS < VT_DISP else '0';
VGA_B <= VGA_COLOR(0) when
    HPOS < HT_DISP and VPOS < VT_DISP else '0';
```

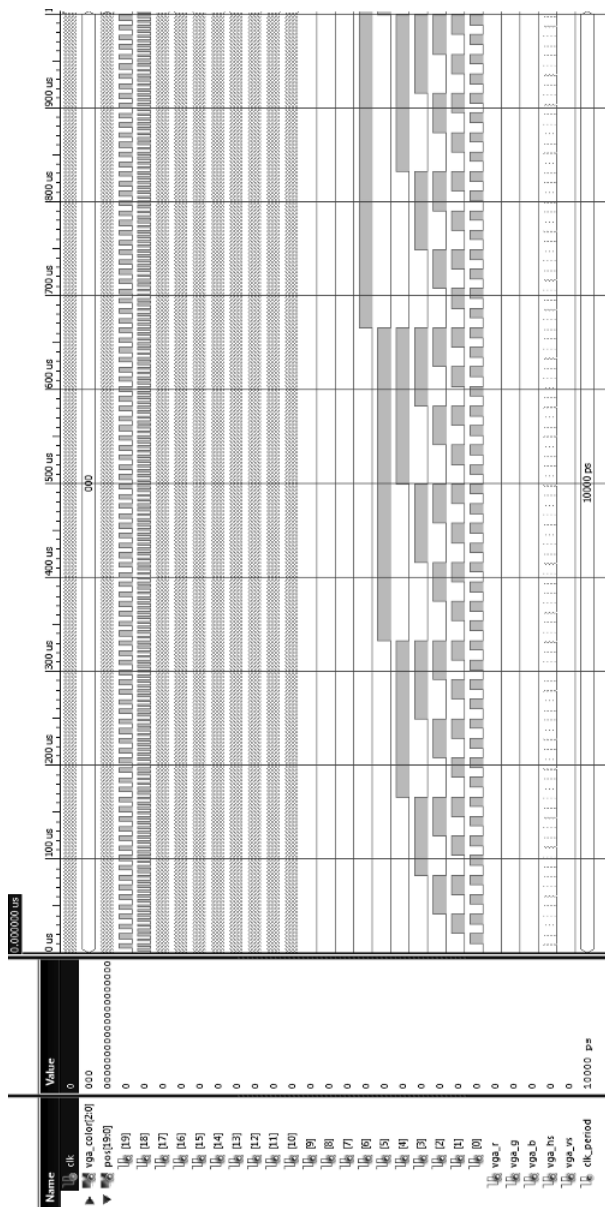
Pobierane są z 3-bitowego wektora VGA_COLOR jeśli aktualna pozycja piksela mieści się w widzialnym zakresie monitora. W przeciwnym wypadku ustawiany jest kolor czarny "000".

Listing 16: Sterowanie pozycją piksela

```
VGA_HS <= '1' when HPOS >= HT_DISP + HT_FP and
    HPOS < HPOS_MAX - HT_BP else '0';
VGA_VS <= '1' when VPOS >= VT_DISP + VT_FP and
    VPOS < VPOS_MAX - VT_BP else '0';
```

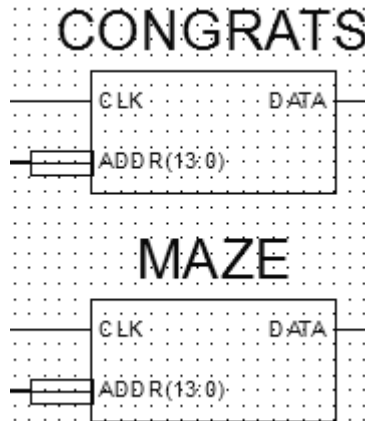
2.2.1 SYMULACJA

Przeprowadzona została symulacja zachowania modułu `vga_init`, na której widać, jak zmienia się wektor `pos` pod wpływem upływu czasu.



Rysunek 4: Symulacja modułu vga_init

2.3 ROM



Rysunek 5: Schemat pamięci ROM

Pamięci ROM są kluczowymi elementami projektu. Występują dwie instancje pamięci tego typu, które są bitmapami o rozmiarze 100x75 zapisanymi jako monochromatyczne bity. Pierwsza z nich, MAZE, to zapis struktury labiryntu. Druga to plansza końcowa z napisem "CONGRATULATION".

Listing 17: Kod pamięci ROM

```
entity MAZE is
port (CLK : in std_logic;
      ADDR : in std_logic_vector(13 downto 0);
      DATA : out std_logic);
end MAZE;

architecture syn of MAZE is
    type rom_type is array (0 to 9599) of std_logic;
    constant ROM : rom_type:= (
        '0','0','1','1','1','1','1','1','1', ...
    );

    signal rdata : std_logic;
begin
    rdata <= ROM(conv_integer(ADDR));

    process (CLK)
```

```

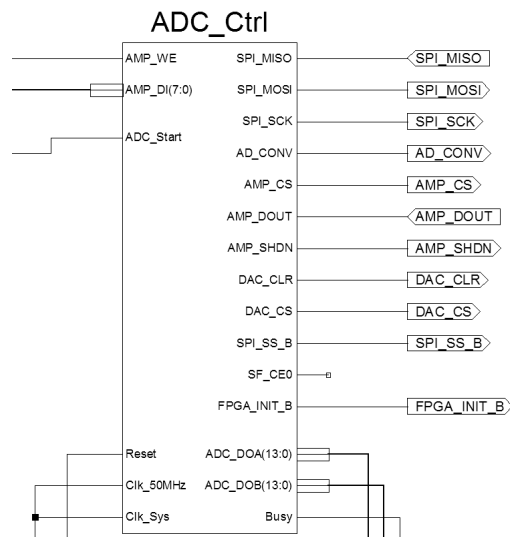
begin
    if (rising_edge(CLK)) then
        DATA <= rdata;
    end if;
end process;
end syn;

```

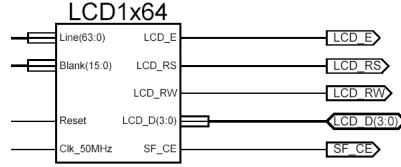
Na powyższym fragmencie kodu pamięci ROM zapisane jest 9600 bitów, które odpowiadają blokom pikseli 8x8. Piksele zostały tak zgrupowane w celu zaoczędzenia pamięci, kosztem widzianej rozdzielczości. Pamięć ROM na wejściu przyjmuje 14-bitowy wektor, który jest adresem komórki pamięci. Starsze 7 bitów to numer wiersza, a młodsze to numer kolumny.

Pomimo, że na ekranie o rozdzielczości 800x600 można wyświetlić 7500 bloków 8x8-bitowych, to dodane zostało 28 kolumn, które są niewidoczne na ekranie, ale ułatwiają adresację w pamięci. Dzieje się tak, ponieważ liczby w zakresie 100+28 można zapisać na dokładnie 7 bitach.

2.4 POZOSTAŁE MODUŁY



Rysunek 6: Schemat modułu ADC_Ctrl



Rysunek 7: Schemat modułu LCD1x64

W projekcie użyte zostały również inne moduły, których kod jest nieznany. Są to ADC_Ctrl i LCD1x64. Pierwszy odpowiada za sczytywanie sygnałów analogowych z drążka sterowego i przekazanie do modułu MASTER jego pozycji w postaci cyfrowej. Drugi moduł komunikuje się z wyświetlaczem LCD i wyświetla na nim pozycje drążka w pionie i poziomie oraz aktualny czas gry. Traktowane są jako czarne skrzynki, dla których zdefiniowane są wejścia i wyjścia. Więcej na ten temat można znaleźć na stronie [2].

3 IMPLEMENTACJA

3.1 WYKORZYSTANIE SPRZĘTU

Poniższa tabela przedstawia wybrane parametry użycia Spartana-3E. Wynika z niej, że projekt używa niewielki procent dostępnych zasobów.

Tablica 1: Podsumowanie użycia urządzenia

| Logic Utilization | Used | Available | Utilization |
|--|------|-----------|-------------|
| Number of Slice Flip Flops | 236 | 9,312 | 2% |
| Number of 4 input LUTs | 369 | 9,312 | 3% |
| Number of occupied Slices | 286 | 4,656 | 6% |
| Number of Slices containing only related logic | 286 | 286 | 100% |
| Total Number of 4 input LUTs | 470 | 9,312 | 5% |
| Number used as logic | 368 | | |
| Number used as a route-thru | 101 | | |
| Number used as Shift registers | 1 | | |
| Number of bonded IOBs | 27 | 232 | 11% |
| Number of IDDR2s used | 1 | | |
| Number of ODDR2s used | 2 | | |
| Number of RAMB16s | 2 | 20 | 10% |
| Number of BUFGMUXs | 1 | 24 | 4% |
| Average Fanout of Non-Clock Nets | 2.98 | | |

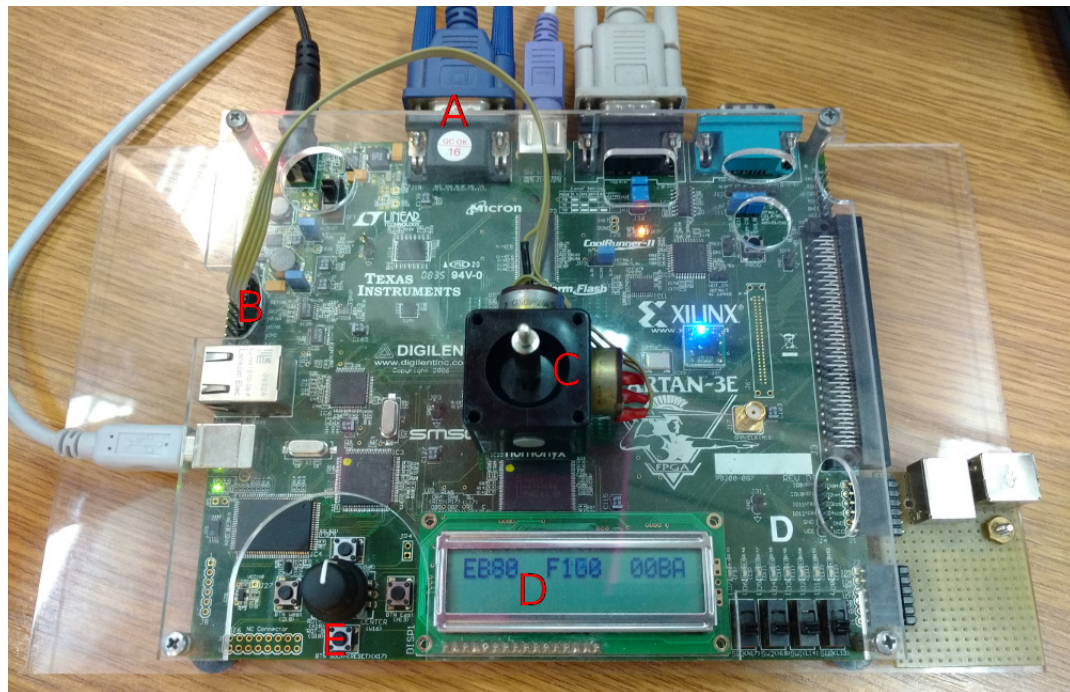
Ograniczenia czasowe wyglądają następująco. Użyty został zegar o okresie 20 ns. Narzędzie Xilinx ISE wygenerowało raport, z którego wynika, że Worst Case Slack dla SETUP wynosi 2,590 ns, a dla HOLD 0,968 ns. Wartości dodatnie oznaczają, że ograniczenia są spełnione. Best Case Achievable jest dostępny tylko dla czasu SETUP i jest równy 14,820 ns.

Podczas generowania raportu nie zostały znalezione żadne błędy związane z zegarem.

3.2 PODRĘCZNIK UŻYTKOWNIKA

Poniższy podręcznik użytkownika ma na celu krótkie wprowadzenie do obsługi gry, bez zagłębiania się w szczegóły implementacyjne.

Celem gry jest przejście labiryntu kwadratem przy pomocy drążka sterowego w jak najkrótszym czasie. Za dotknięcie ściany naliczana jest kara czasowa w postaci wielokrotnie przyspieszonego liczenia czasu.



Rysunek 8: Płytką z potrzebnym sprzętem

A - wyjście podłączenia monitora przez port VGA

B - wejście analogowe do podłączenia drążka sterowego

- C - analogowy drążek sterowy
- D - wyświetlacz LCD
- E - przycisk resetu

Jak widać na zdjęciu wtyczka od drążka sterowego musi być podłączona do pinów po prawej stronie i zwrócona widocznymi blaszkami na zewnątrz.

Przed rozpoczęciem gry należy drążek ustawić możliwie w pozycji pionowej. Oprócz tego należy zwrócić uwagę na to, by osie drążka odpowiadały układowi współrzędnych, gdzie wartości osi X rosną w prawo, a osi Y w górę. Ma to na celu poprawne odzwierciedlenie ruchów gracza w grze.

Po podłączeniu potrzebnego osprzętu i zaprogramowaniu płytki gra rozpoczyna się.



Rysunek 9: Widok labiryntu podczas gry

Kwadrat w kolorze fukcji, którym poruszamy za pomocą drążka sterowego znajduje się lewym, dolnym rogu. Gracz poprzez manewrowanie

drażkiem sterowym kontroluje ruch kwadratu. Poruszać się można tylko po żółtym polu. Ściany labiryntu reprezentowane są kolorem niebieskim.



Rysunek 10: Widok końcowy gry

Koniec labiryntu znajduje się w lewym, górnym rogu. Po dojściu tam, pokazuje się grafika końcowa z napisem CONGRATULATION. Ponadto zatrzymywany jest pomiar czasu, który pokazany jest na wyświetlaczu LCD po prawej stronie w systemie szesnastkowym. W celu rozpoczęcia nowej rozgrywki należy użyć przycisku RESET.

4 PODSUMOWANIE

Po zakończeniu prac można krytycznie ocenić realizację założeń projektu. Wszystkie z początkowo postawionych celów zostały spełnione w planowanym terminie, dlatego jesteśmy zadowoleni z ogółu wyników prac. Pewne

rozwiązania, które przyjęliśmy na początku okazały się jednak chybione i po wielogodzinnych analizach problemu oraz pomocy prowadzącego, musieliśmy diametralnie je zmienić. Przykład może stanowić użycie danych typu integer. Choć zachęcające prostotą użycia, sprawiły nie lada problem dla sprzętu. Okazało się, że należy skorzystać z typu signed.

Kolejną trudnością było przejście z architektury jednomodułowej do wielomodułowej. Zmiana ta spowodowana była nieczytelnością projektu. Zbyt wiele procesów w jednym module utrudniało analizę przepływu informacji. Rozwiązaniem tego problemu było wprowadzenie modułu MASTER, który jako moduł główny łączył pozostałe moduły. W tym przypadku problematyczne było przeniesienie procesów do MASTERa i dostrojenie ich.

Analizując przebieg prac na projektem, dochodzimy do wniosku, że było kilka elementów, które dałoby się poprawić. Gdybyśmy jeszcze raz realizowali ten projekt, to od razu dzielilibyśmy system na więcej modułów, by uniknąć problemów przy zmianie. Ponadto logika sterowania kwadratem również mogłaby być osobnym modulem, co odchudziłoby moduł MASTER.

4.1 KIERUNKI DAJSZYCH PRAC

Po zakończeniu projektu, pomimo pełnej założonej funkcjonalności, możemy określić dalsze kierunki rozwoju gry. Przede wszystkim można zaimplementować nowe mapy labiryntów, o rosnącym poziomie trudności, by gra była coraz większym wyzwaniem. Kolejny pomysł to możliwość zmiany kolorów w grze za pomocą przycisków, które znajdują się dookoła potencjometru na płycie Spartan 3E. Można również rozbudować projekt o kolejne urządzenia peryferyjne, takie, jak głośnik, na którym odtwarzana byłaby muzyczka umilająca grę. Następny pomysł, to dodanie obsługi kolejnego drążka sterowego, w celu możliwości gry wieloosobowej na jednym monitorze. W ten sposób element rywalizacji osiągnąłby wyższy poziom. Ostatnia propozycja to zapisywanie rankingu czasów osiągniętych przez graczy.

5 SPIS LITERATURY

Literatura

- [1] Xilinx: *Spartan-3E FPGA Starter Kit Board User Guide*, v1.2 (2011)
- [2] Dr inż. Jarosław Sugier: Zestawy Digilent S3E-Starter, http://www.zsk.ict.pwr.wroc.pl/zsk_ftp/fpga/ (stan na 29.05.2017)
- [3] Dr inż. Jarosław Sugier: Prezentacje dotyczące języka VHDL, http://www.zsk.ict.pwr.wroc.pl/zsk/repository/dydaktyka/uc/ucsw1_vhdl.pdf (stan na 29.05.2017)

Spis rysunków

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Schemat całego projektu | 4 |
| 2 | Schemat modułu MASTER | 5 |
| 3 | Schemat modułu vga_init | 9 |
| 4 | Symulacja modułu vga_init | 11 |
| 5 | Schemat pamięci ROM | 12 |
| 6 | Schemat modułu ADC_Ctrl | 13 |
| 7 | Schemat modułu LCD1x64 | 14 |
| 8 | Płytką z potrzebnym sprzętem | 15 |
| 9 | Widok labiryntu podczas gry | 16 |
| 10 | Widok końcowy gry | 17 |

Spis tablic

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Podsumowanie użycia urządzenia | 14 |
|---|--|----|