Jerzy KASPEREK [1], Wojciech PÓŁCHŁOPEK [1], Paweł J. RAJDA [1], Jaromir WASZCZYSZYN [2]
[1] KATEDRA ELEKTRONIKI, AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA W KRAKOWIE, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
[2] ANCIENT AUDIO, ul. Malawskiego 50, 31-471 Kraków

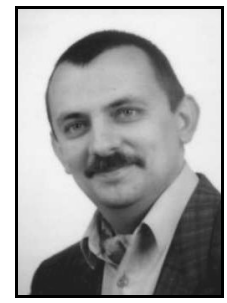
Wysokiej klasy odtwarzacz audio

Dr inż. Jerzy KASPEREK

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki AGH, obronił pracę doktorską w 2001r. Jest adiunktem w Katedrze Elektroniki. Jego zainteresowania naukowe to sprzętowe przetwarzanie sygnałów, w szczególności obrazów biomedycznych.

e-mail: kasperek@agh.edu.pl

Dr inż. Paweł J. RAJDA



Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki AGH, obronił pracę doktorską w 2001r. Jest adiunktem w Katedrze Elektroniki. Jego zainteresowania naukowe to rekonfigurowalne systemy obliczeniowe oraz sprzętowe implementacje algorytmów przetwarzania sygnałów cyfrowych.

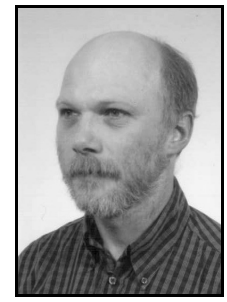
e-mail: pjrajda@agh.edu.pl

Dr inż. Wojciech PÓŁCHŁOPEK

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki AGH, obronił z wyróżnieniem pracę doktorską w 2007r. Jest adiunktem w Katedrze Elektroniki. Jego zainteresowania naukowe to algorytmy przetwarzania sygnałów cyfrowych w systemach audio, systemy przetwarzania sygnałów audio, systemy elektroakustyczne oraz systemy pomiarowe z wbudowanym przetwarzaniem sygnałów.

e-mail: ph@agh.edu.pl

Mgr inż. Jaromir WASZCZYSZYN



Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki AGH. Po kilku latach pracy na stanowisku asystenta w Katedrze Elektroniki założył firmę Ancient Audio, zajmującą się projektowaniem i produkcją profesjonalnych systemów audiofilskich.

e-mail: ancient@olsza.krakow.pl

Streszczenie

W pracy opisano zastosowanie układów programowalnych w audiofilskim, prototypowym odtwarzaczu muzyki. Rozwiązanie wykorzystuje zaawansowane układy audio, mikrokontroler, układ FPGA oraz karty pamięci flash jako nośnik przekazu dla dostarczania najwyższej jakości dźwięku w formacie cyfrowym bez kompresji. Dzięki wbudowanemu w układ FPGA kontrolerowi hosta karty Secure Digital, urządzenie wykorzystuje szybki transfer danych z karty i umożliwia słuchanie muzyki stereo z częstotliwościami próbkowania do 192 kHz przy 24-bitowej precyzji.

Słowa kluczowe: systemy audiofilskie, karta SD, aplikacje FPGA.

High fidelity FPGA-based music player

Abstract

The paper describes the FPGA application to the high fidelity audiophile music player prototype. The solution uses the Secure Digital flash memory card as a media carrier and advanced audio circuits to deliver the top quality audio output from the digital uncompressed music format. The dedicated SD card host controller built in FPGA Xilinx Spartan 3 device supports the high speed SD transfer mode and allows listening to the stereo music at sampling frequencies up to 192kHz with 24-bit precision. The block diagram of the SD card host controller and its operation, including implemented SD card commands, is presented in more details. There is also a detailed description of the whole audio player architecture, from the main microcontroller, through user interfaces (LED dot matrix display module, IRed and BT interfaces, keyboard), the analogue audio stage with vacuum tubes and other dedicated devices to the sophisticated, multivoltage power supply. The player features the high definition analogue output as well as standard AES3 and S/PDIF digital outputs. The appropriate standard file system for the uncompressed music stored on the SD card and additional multimedia content is also proposed.

Keywords: FPGA application, audiophile music player, SD card, uncompressed music

1. Wstęp

Pomimo szybkiego rozwoju systemów dystrybucji muzyki bezpośrednio przez Internet, nadal istnieje duża grupa klientów, która chce posiadać muzykę wysokiej jakości na swoim nośniku fizycznym.

Wielokrotnie ogłaszana śmierć standardu dysków kompaktowych CD nie następuje i realistyczne oceniając może nadejść dopiero za wiele lat, a odnoszący niewątpliwy sukces format MP3 nie zapewnia wymogów sporej grupy konsumentów, wymagających najwyższych standardów jakości muzyki. Prezentowany odtwarzacz ma wypełnić tę lukę i zapewnić odtwarzanie na audiofilskim poziomie jakości dźwięku.

2. Założenia projektowe

Na etapie projektu zostały przyjęte następujące założenia:

- bezkompromisowa jakość dźwięku - wsparcie dla zapisu audio przy próbkowaniu ze standardowymi częstotliwościami: 44,1 kHz, 48 kHz, 88,2 kHz, 96 kHz, 172,4 kHz i 192 kHz, z rozdzielczością do 24 bitów na próbkę,
- audiofilskie, lampowe rozwiązanie układu przedwzmacniacza w torze analogowym,
- karta SD jako nośnik danych audio,
- sprzętowy (oparty na technologii FPGA) kontroler karty SD, zapewniający szybki transfer danych,
- zdalne sterowanie przez podczerwień i interfejs Bluetooth,
- interfejs użytkownika z czytelnym panelem LED, zapewniającym łatwą nawigację i informację o aktualnym trybie pracy, albumie i odtwarzanym utworze,
- zegar czasu rzeczywistego,
- otwarty standard zapisu muzyki i materiałów dodatkowych (zdjęcia, filmy, teksty, itp.),
- wysokiej jakości granitowa obudowa.

3. Karty SD

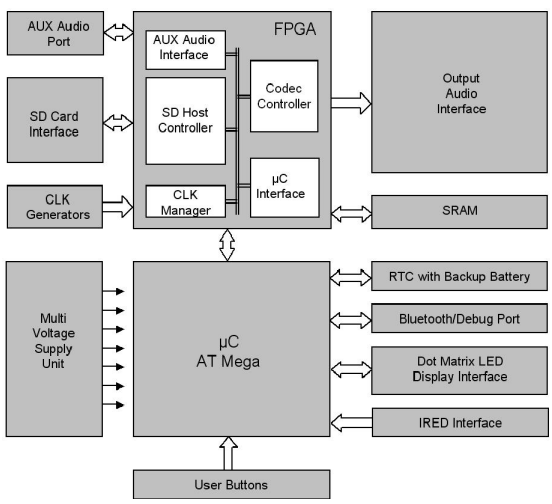
Pierwsze karty pamięci *Secure Digital* (SD) pojawiły się na rynku w 1999 r. i obecnie należą one do najczęściej używanych kart pamięci flash. Dziś najbardziej popularnymi są karty SD *High Capacity* (SDHC) o pojemności od 4 GB do 32 GB i prędkości transmisji danych 2, 4 i 6 MB/s. Standard kart SD rozwija się wraz z postępem technologii pamięci - w kwietniu 2009 organizacja SD Association zdefiniowała karty typu SDXC (*eXtended Capacity*) o pojemności do 2 TB i docelowej prędkości transferu do 300 MB/s.

Bardzo ważną funkcją technologii kart SD jest specyfikacja ochrony danych - *Content Protection Recordable Media* (CPRM). Zabezpieczenie interesów komercyjnych mediów jest kluczowe w nowych systemach dystrybucji treści multimedialnych.

4. Architektura odtwarzacza

Rys. 1 przedstawia schemat blokowy prototypu. Sercem odtwarzacza jest 8-bitowy mikrokontroler AVR AT Mega 128, współpracujący z układem FPGA Xilinx Spartan XC3S200. Poza tym odtwarzacz zawiera następujące moduły funkcjonalne:

- moduł sygnałów zegarowych – generatory częstotliwości 11,28960 MHz i 24,5760 MHz o wysokiej stabilności (dla typowych częstotliwości próbkowania, stosowanych w nagrywaniu muzyki),
- interfejs zdalnego sterowania – port IRed i dekoder standardu RC5 oraz moduł Bluetooth WT12 firmy Bluegiga,
- główny wyświetlacz odtwarzacza – matryca punktowa 7 × 80 LED. Moduł ten składa się z czterech podmodułów 7 × 20, których każdy sterowany jest przez mikrokontroler AT Mega 48. Linie RxD kontrolerów są połączone równolegle i sterowane przez linię TxD głównego kontrolera odtwarzacza. Dedykowany protokół umożliwia kontrolę pracy każdego punktu wyświetlacza (włącz/wyłącz oraz zmiana intensywności świecenia),
- cyfrowe interfejsy pomocnicze audio – AES3 i S/PDIF,
- interfejs przycisków sterowania pracą odtwarzacza,
- blok zasilania.



Rys. 1. Schemat blokowy architektury odtwarzacza
Fig. 1. Block diagram of the player architecture

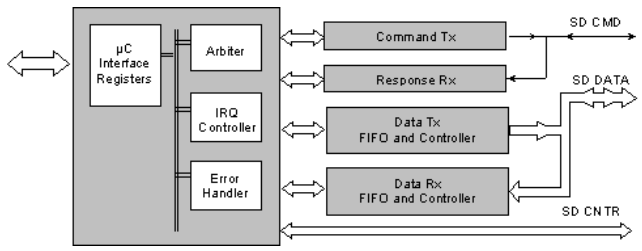
Ze względu na różne potrzeby, zasilacz dostarcza kilku napięć:

- 2 razy +3,3V: zasilanie sekcji cyfrowej i wyświetlacza matrycy LED (dla uniknięcia zakłóceń audio sekcja cyfrowa jest połączona izolowanym interfejsem),
- +6V: zasilanie sekcji przetwornika C/A,
- +/-12 V: zasilanie sekcji regulacji poziomu audio,
- +64V: zasilanie anod lamp przedwzmacniacza,
- -11V: zasilanie katod lamp przedwzmacniacza,
- +12,6V: podgrzewanie lamp przedwzmacniacza.

Obwody zasilania są galwanicznie separowane przez odrębne uzwojenia transformatora, a wszystkie napięcia zasilania są stabilizowane przez scalone, liniowe regulatory napięcia.

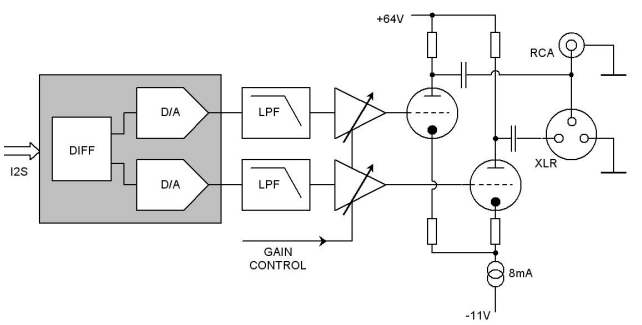
Cały odtwarzacz jest sterowany przez mikrokontroler AVR AT Mega 128. Ten mikrokontroler został wybrany ze względu na doświadczenie autorów z poprzednio zrealizowanego projektu i narzucony bardzo krótki czas realizacji prototypu. W przypadku potencjalnego sukcesu rynkowego możliwa jest integracja kontrolera w zasobach układu FPGA przez wykorzystanie soft-procesora, np. Microblaze Xilinx.

Najważniejszym zadaniem układu FPGA jest obsługa szybkiej transmisji danych audio między kartą SD a wejściem przetwornika C/A. Poza tym układ FPGA spełnia kilka pomocniczych funkcji jak: obsługa interfejsu zewnętrznej pamięci SRAM mikrokontrolera, zarządzanie generatorami sygnałów zegarowych i kontrola zewnętrznego interfejsu audio.



Rys. 2. Schemat blokowy kontrolera karty SD
Fig. 2. Block diagram of the SD host controller

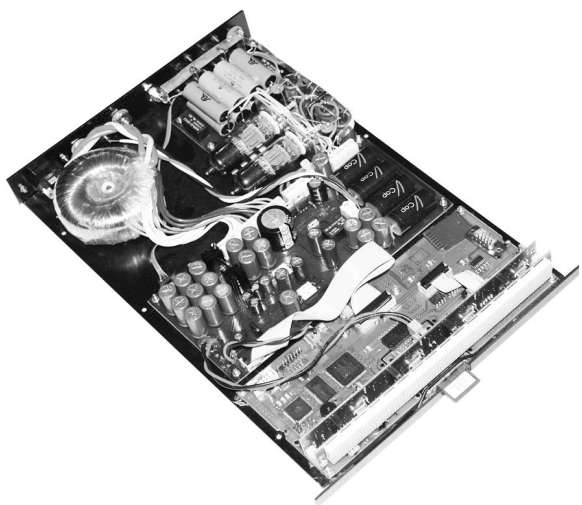
Rys. 2 przedstawia schemat blokowy zrealizowanego w układzie FPGA kontrolera karty SD. Moduł zawiera udostępniony w przestrzeni adresowej pamięci mikrokontrolera zestaw rejestrów sterujących pracą karty SD. Komunikacja z kartą polega na wysyłaniu komend szeregowo po linii CMD magistrali SD. Jeśli polecenie inicjuje transfer danych, to przesyłane są one przez dedykowane linie danych interfejsu magistrali SD. W uproszczonym trybie transferu danych używana jest tylko jedna linia danych - w odtwarzaczu wykorzystano pełną, 4-bitową szynę z uwagi na to, że tylko transfery równolegle zapewniają wymaganą szybkość transferu danych i w konsekwencji odpowiednią jakość dźwięku. Obsługa karty SD wykorzystuje złożony diagram maszyny stanów, zawierający stany: karta nieaktywna, karta w stanie spoczynku, gotowość karty, autentykacja karty, oczekiwanie na komendę, transfer komend, transfer danych i programowanie karty. Kontroler host SD zawiera bloki: *Command Tx, Command Rx, Data Rx, Data Tx, Arbiter, IRQ Controller i Error Handler.* Moduł *Command Tx* odpowiedzialny jest za wysyłanie komend od mikrokontrolera przez linię CMD magistrali karty SD w formie odpowiednich pakietów, w tym generowanie CRC. Odpowiedzi od karty obsługuje moduł *Command Rx*, transferując do przestrzeni pamięci mikrokontrolera tylko poprawnie odebrane odpowiedzi. Moduły *Data Rx* i *Data Tx,* wykorzystują moduły pamięci BRAM Xilinx Spartan jako bufory FIFO danych. Moduł *Error Handler* jest licznikiem zdarzeń, monitorującym magistralę SD i może zgłosić do kontrolera hosta błędy transferu (np. żądanie odczytu nieistniejącego numeru bloku, itp.) Moduły *Arbiter* i *IRQ Controller* zarządzają pracą całego kontrolera. Transfer danych audio z danego bloku danych SD (poprzez bufor BRAM) do przetwornika C/A odbywa się bez udziału mikrokontrolera, lecz bezpośrednio poprzez sprzętowy interfejs I2S, zaimplementowany w układzie FPGA. Sprzętowy kontroler karty SD korzysta z tego samego generatora zegara co przetwornik C/A, co gwarantuje synchroniczne przesyłanie danych.



Rys. 3. Schemat blokowy stopnia wyjściowego audio
Fig. 3. Block diagram of the output audio stage

Rys. 3 przedstawia schemat blokowy części audio odtwarzacza. Zastosowany przetwornik C/A posiada zintegrowany wewnętrznie cyfrowy filtr typu DIF (*Digital Interpolating Filter*). Zastosowane techniki nadpróbkowania i modulacji delta-sigma z kształtowaniem szumów spektralnych oraz dwu i pół bitowy sposób konwersji C/A gwarantują najwyższą jakość dźwięku, z uwagi na fakt, że szumy próbkowania lokują się daleko poza pasmem audio. Dlatego do usuwania niechcianych składników widma sygnałów audio wystarczy zastosować prosty filtr pierwszego rzędu RC. Poziom sygnału wyjściowego audio można regulować w zakresie 100 dB co 1 dB przy użyciu analogowych regulatorów PGA 2310 firmy Burr-Brown. Dodatkowo, wyprowadzono sygnał analogowy z przedwzmacniacza. Aby zminimalizować ewentualne zakłócenia, tor audio odtwarzacza począwszy od stopnia przetwornika C/A jest w pełni symetryczny. Ostateczne sumowanie odbywa się na wyjściu stopnia różnicowego, zbudowanego na podwójnej triodzie 6H30 (Sovtek, Rosja). Ścieżka sygnału audio wyposażona jest w wysokiej jakości kondensatory o dielektryku teflonowym SCR-FEP i TFTF firmy V-Cap. Wyjścia analogowe dostarczają sygnał symetryczny na poziomie 30 Vpp (złącze XLR) i niesymetryczny (złącze RCA) na poziomie 15 Vpp.

Rys. 4 przedstawia wewnętrzną konstrukcję, zawierającą moduły: przetwornika C/A, przedwzmacniacza audio, zasilacza oraz sekcję FPGA z głównym mikrokontrolerem.



Rys. 4. Konstrukcja wewnętrzna prototypu odtwarzacza
Fig. 4. The player prototype internal construction

Rys. 5 przedstawia widok zmontowanego odtwarzacza w obudowie z granitu.

Rys. 5. Widok obudowy odtwarzacza
Fig. 5. View of the player top quality enclosure

Wyświetlacz pokazuje użytkownikowi aktualny numer i bieżący czas odtwarzanego utworu (ewentualnie albumu) i poziom głośności. Dziewięć przycisków do ręcznego sterowania podstawowymi funkcjami znajduje się na górze obudowy. Zaawansowane sterowanie jest możliwe za pomocą pilota na podczerwień a opcjonalnie przez odpowiednio oprogramowane urządzenie z interfejsem Bluetooth.

5. Format zapisu audio

Specyfikacja techniczna *SD Card Association* w części 4 określa standard zapisu treści audio w wielu formatach, w tym z kompresji AAC, HE-AAC, WMA i MP3. Zdefiniowano sposób nawigacji po treściach audio, tworzenie list odtwarzania, edycji itp. Istnieje także możliwość obsługi treści dodatkowych np. zdjęć, tekstów itp. Niestety, w oficjalnej wersji specyfikacji nie ma wsparcia dla nieskompresowanych formatów muzycznych, dlatego też autorzy zaproponowali własny standard, dedykowany dla wymagających audiofilów. Główną ideą było tu stworzenie uniwersalnego formatu danych multimedialnych, a od klasy odtwarzacza posiadanego przez użytkownika miałaby zależeć możliwość prezentacji danych i jakość dźwięku. Aktualne prace prowadzone przez autorów koncentrują się na implementacji standardu na innych platformach sprzętowych, w tym: komputerach PC, inteligentnych telefonach i urządzeniach PDA.

6. Oprogramowanie

Opracowane oprogramowanie pozwala na sterowanie pracą odtwarzacza za pomocą przycisków lub za pośrednictwem standardowych pilotów zdalnego sterowania i / lub urządzenia wyposażonego w interfejs Bluetooth i odpowiednie oprogramowanie. Dostępne są standardowe funkcje, w tym: start, stop, pauza, przewijanie do przodu i do tyłu. Matrycowy wyświetlacz punktowy LED prezentuje bieżące informacje, w tym: aktualny tytuł albumu/utworu, bieżący czas, nazwa wykonawcy itp. Użytkownik łatwo może wybrać określony utwór lub album do odtwarzania, a także utworzyć listę odtwarzania. Dostępny jest też tryb A/B (ciągłe słuchanie muzyki od punktu A do B), tryb odtwarzania losowego itp.

7. Wnioski

Przedstawiona konstrukcja ma dwie wielki zalety. Pierwszą jest prostota obsługi i nawigacji. Natychmiastowy dostęp do ścieżek audio, łatwy dostęp do meta-danych, a także wysoka odporność na kurz, wstrząsy i wilgoć jest jego wielką, ale raczej oczywistą zaletą. Większe znaczenie ma oferowana bardzo wysoka jakość dźwięku. Liczne badania odsłuchowe (choć z natury subiektywne) potwierdziły przewagę jakości muzyki odsłuchiwanej z kart pamięci nad odsłuchiwaną z tradycyjnej płyty kompaktowej. Porównanie odsłuchiwanej treści z profesjonalnymi odtwarzaczami płyt CD wskazuje, że prezentowana konstrukcja dostarcza więcej informacji na temat akustyki nagrania, techniki interpretacji, a nawet o rodzaju wykorzystanych przy nagraniu instrumentów muzycznych.

8. Literatura

[1] Atmel, The official Web site of the Atmel Company, http://www.atmel.com
[2] Digital Music Report 2010, IFPI International Federation of the Phonographic Industry, http://www.ifpi.org
[3] SD Card Association, The official Web site of the Secure Digital card Association, http://www.sdcard.org
[4] Xilinx, The official Web site of the Xilinx Company, http://www.xilinx.com

otrzymano / received: 15.10.2010
przyjęto do druku / accepted: 01.12.2010 *artykuł recenzowany*