

Cyfrowe zwrotnice głośnikowe (2)



Problem synchronizacji zegara systemowego

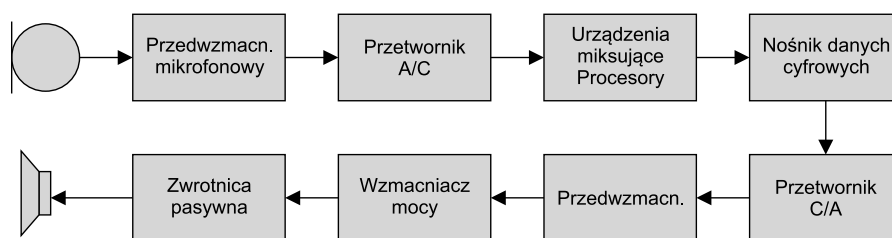
W pierwszej artykule serii zaprezentowano ideę cyfrowej realizacji systemu elektroakustycznego z użyciem procesora DSP. Podaliśmy w nim szkic takiego rozwiązania oraz jego wady i zalety. W tym artykule opiszemy transmisję cyfrowego sygnału audio w standardzie S/PDIF. Omówimy także problem synchronizacji przetworników C/A z nadajnikiem sygnału oraz przykładowe rozwiązanie tego problemu. Postaramy się także wskazać rozwiązanie optymalne oraz podać wstępne założenia projektowe.

Na **rysunku 4** przedstawione poglądowy schemat toru elektroakustycznego. W naszych rozważaniach zajmiemy się blokami znajdującymi się w łańcuchu za nośnikami danych, gdyż tylko na nie mamy wpływ jako projektanci systemu odsłuchowego. Jeżeli chodzi o same nośniki sygnałów audio, to obecnie są to przede wszystkim dyski twarde w komputerach oraz pamięci Flash w odtwarzaczach MP3 i telefonach komórkowych. Powstaje pytanie czy jakość muzyki odtwarzanej za pomocą karty muzycznej można porównać z jakością tej z odtwarzacza CD wysokiej klasy? Okazuje się, wbrew wielu opiniom, tak (artykuł na stronie EnjoyTheMusic.com „Music Playback From A Computer – The Audiophile’s Concerns”, Daniel Weiss of Weiss Engineering). Komputer z dyskiem twardym i odpowiednią kartą muzyczną może być dobrym odtwarzaczem pod warunkiem, iż prawidłowo wygeneruje strumień danych cyfrowych. Zależy to od dwóch czynników: prawidłowego zapisu danych oraz spełnienia właściwych zależności czasowych, na które ma wpływ generator sygnału cyfrowego (S/PDIF-AES3). Chociaż poprawne odtworzenie „zer” i „jedynek” nie stanowi problemu, to w wypadku zależności czasowych bardzo istotna dla efektu końcowego jest wartość rozmycia fazy (jitter).

Transmisja cyfrowa w audio

We współczesnych urządzeniach profesjonalnych audio transmisja sygnału od wzmacniacza do głośników odbywa się rów-

nież cyfrowo. Zaletą takiego rozwiązania jest uniknięcie stosowania drogich i ciężkich kabli głośnikowych, co w przypadku rozległych obiektów typu stadion zwiększa koszty instalacji. Przy transmisji cyfrowej nie obserwuje się wpływu jakości kabli na jakość sygnału, pod warunkiem, iż zostaną spełnio-



Rysunek 4. Schemat blokowy toru elektroakustycznego

ne wytyczne norm dotyczące ich długości i rodzaju. Najbardziej popularną normą jest AES/EBU (AES3) lub jej konsumencki odpowiednik S/PDIF (Sony/Philips Digital Interface Format).

Zgodnie z normą S/PDIF jest przesyłany jest „samotaktujący” się sygnał bifazowy. Zatem oprócz danych muzycznych i informacyjnych „niesie” również sygnał zegara systemowego potrzebnego do taktowania przetworników C/A. Nie możemy rzecz jasna założyć, iż nasza karta muzyczna generuje strumień cyfrowy o małej wartości jittera. A zatem zadaniem projektanta jest dbałość o to, aby ten jitter wyeliminować i aby dostarczyć do przetwornika C/A jak najbardziej stabilny sygnał zegarowy, z zachowaniem

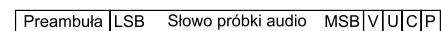
Dodatkowe materiały na CD/FTP:
<ftp://ep.com.pl>, user: 10925, pass: 87thc181
 • pierwsza część kursu

synchronizacji pomiędzy nadajnikiem sygnału (np. kartą dźwiękową komputera) a naszym systemem.

Nadajnik transmituje dane w formacie, w którym podstawowym elementem jest podramka przedstawiona na **rysunku 5**. Rozpoczyna ją preambuła identyfikująca kanał bądź sygnalizująca początek bloku. Kolejne 24 bity niosą informację o próbce audio. Ostatnie 4 bity to: bit ważności (ustawiany za pomocą flagi błędu), stanu kanału (np. czy zezwala się na kopiowanie), użytkownika oraz bit parzystości. Podczas transmisji sygnału stereo (lewy/prawy kanał) na ramkę przypadają dwie podramki.

Sygnal S/PDIF jest niesymetryczny i ma amplitudę 0,5 V. Do transmisji stosuje się kable koncentryczne o impedancji 75 Ω zapewniające przesyłanie danych na odległość do 15 m (**rysunek 6**). Innym interfejsem transmisyjnym sygnałów cyfrowych audio jest TosLink wprowadzony przez Toshiba. Jest to interfejs optyczny używany zarówno w sprzęcie profesjonalnym, jak i w konsumenckim. Zasięg transmisji światłowodem zależy od jego rodzaju i jakości.

W wyjście cyfrowe S/PDIF (elektryczne lub optyczne) jest wyposażone wiele kart dźwiękowych. Co zrobić, jeżeli karta takiego



Rysunek 5. Ramka S/PDIF

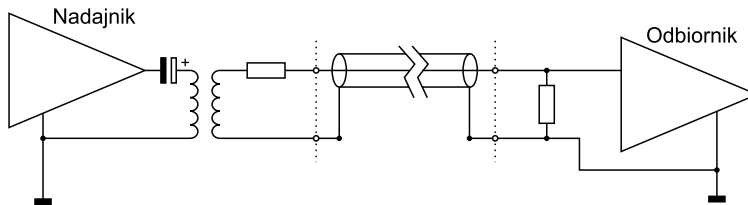
wyjścia nie ma? Wówczas w projekcie odbiornika sygnału SPDIF należy zastosować układ konwersji USB na S/PDIF. Dzięki temu, możemy poprzez port USB wysyłać strumień danych a układ konwersji przekształci je na sygnał standardu S/PDIF.

Ciekawostką jest, iż coraz częściej do transmisji sygnałów audio wykorzystuje się sieci typu Ethernet. Obecnie są to dwa standardy: CobraNet oraz EtherSound, umożliwiające połączenie dużej liczby urządzeń elektroakustycznych w jedną sieć. Odpowiednie protokoły umożliwiają kaskadowe połączenie wszystkich dostępnych obiektów, pozwalając na komunikację „każdy z każdym” przy zachowaniu małej latencji. Głównymi zaletami takiego rozwiązania są znaczne ograniczenie liczby fizycznych połączeń oraz możliwość zarządzania całą siecią z jednego hosta. Pojemność sieci, przykładowo CobraNet, to 64 kanały 20-bitowych danych o częstotliwości próbkowania 48 kHz. Przy zwiększaniu rozdzielczości sygnału i częstotliwości próbkowania, liczba dostępnych kanałów jest mniejsza. W wypadku standardów AES/EBU i SPDIF jedno połączenie fizyczne zapewnia komunikację jedynie między dwoma urządzeniami i tylko w jednym kierunku.

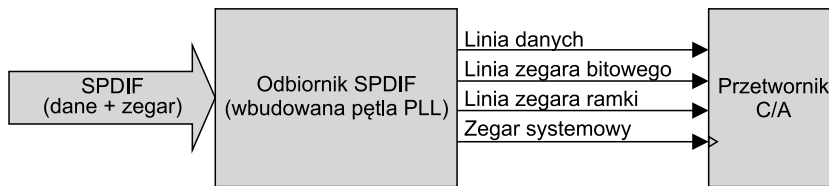
Problem synchronizacji

Drugim, obok zakłóceń, ważnym problemem układu przetwornika cyfrowo-analogowego, na rozwiązanie którego ma wpływ projektant, jest stabilność sygnału taktującego modulator oraz filtry interpolacyjne przetwornika, potocznie nazywanego zegarem systemowym. Ma on znaczny wpływ na jakość sygnału, w więc należy stosować sygnały zegarowe o jak najlepszej stabilności częstotliwościowej (podawanej w PPM – *Parts Per Milion*). Określa ona o ile może się różnić generowana częstotliwość od wartości nominalnej. Za dobrą uważa się wartość stabilności rzędu 10¹ PPM.

Podczas przetwarzania w czasie rzeczywistym sygnału pochodzącego z konkretnego źródła należy zadbać o synchronizację pomiędzy sygnałem zegarowym taktującym źródło a sygnałem taktującym przetworniki cyfrowo-analogowe. Sygnały te powinny mieć identyczną, nominalną częstotliwość próbkowania. Jednak wartość rzeczywista zawsze różni się od nominalnej w pewnym



Rysunek 6. Schemat nadajnika i odbiornika sygnału S/PDIF



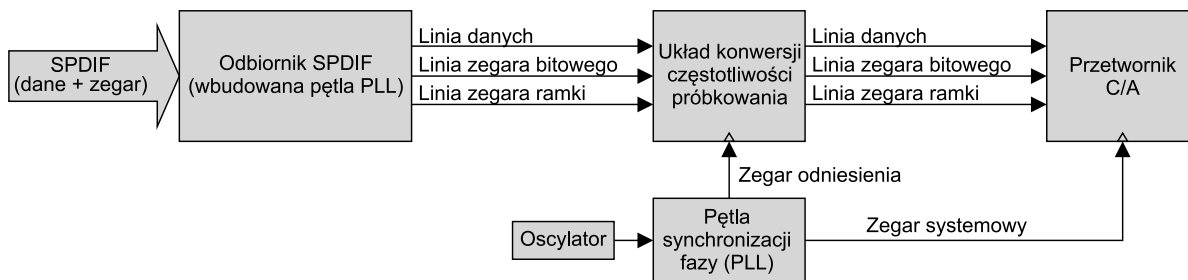
Rysunek 7. Schemat blokowy rozwiązania problemu synchronizacji w oparciu o PLL

stopniu. Nie można zatem zastosować sygnału zegarowego dla przetwornika niezynchronizowanego z sygnałem taktującym sygnał wejściowy. Doszłoby wówczas do utraty próbek, wynikającej z różnicy pomiędzy częstotliwościami zastosowanych sygnałów. Autorom znane są trzy rozwiązania wyżej opisanego problemu. Są to najprawdopodobniej jedyne rozwiązania stosowane w praktyce. Zostaną one przedstawione na przykładzie sygnału wejściowego w standardzie S/PDIF.

- a) Sygnał S/PDIF jest samotaktującym sygnałem bifazowym, dzięki czemu można zaprojektować układ pętli synchronizacji fazowej (PLL), który będzie dostrajał się do częstotliwości odbieranego sygnału. Układ taki odtwarza więc sygnał zegarowy zsynchronizowany z sygnałem wejściowym, który może być sygnałem taktującym przetworniki C/A (rysunek 7). Takie rozwiązanie jest najbardziej podatne na niestabilność sygnału wejściowego. Układ PLL w nieznacznym eliminuje rozmycie fazy sygnału wejściowego.
- b) Drugim rozwiązaniem problemu synchronizacji jest zastosowanie układów konwersji częstotliwości próbkowania (*Sample Rate Conversion*). Układ taki ma dwa wejścia sygnałów zegarowych. Jedno z nich jest wejściem sygnału zegarowego bitowego pochodzącego z nadajnika sygnału, a drugie dla sygnału zegarowego odniesienia pochodzącego z niezależnego źródła, którym również może być również PLL. Wówczas można dobrać sygnał odniesienia o znacznie

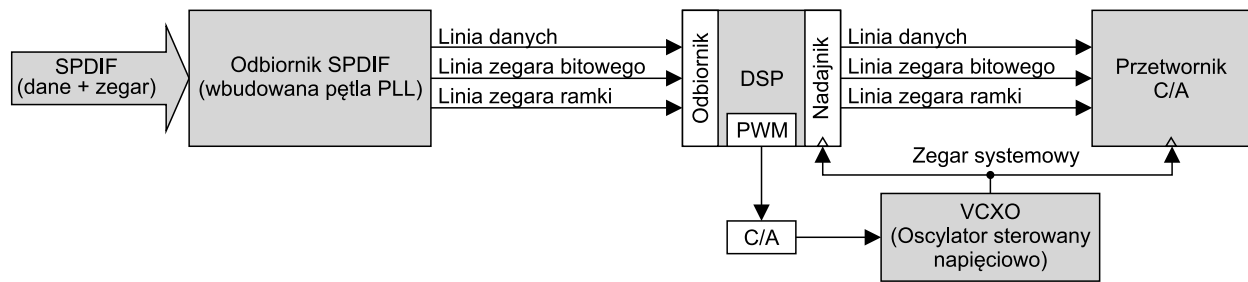
lepszych parametrach niż sygnał zegarowy pochodzący z sygnału wejściowego. Częstotliwość sygnału odniesienia powinna być wielokrotnością częstotliwości sygnału zegara bitowego, wskutek czego następuje nadpróbkowanie sygnału wejściowego. Układ może zatem przesyłać sygnał ze zwielokrotnioną częstotliwością próbkowania albo obniżyć ją do wartości pierwotnej lub mniejszej. Przy czym sygnał wyjściowy taktowany jest sygnałem źródła odniesienia, które musi również taktować przetworniki C/A. Taki układ jest odporny na jitter sygnału wejściowego i daje dużo lepsze efekty niż w rozwiązaniu pierwszym, szczególnie wtedy, gdy sygnał wejściowy jest niestabilny i zakłócony. Nie jest to jednak rozwiązanie optymalne, gdyż przetwornik nie jest taktowany bezpośrednio przez sygnał oscylatora, a przez sygnał układu PLL wprowadzającej również pewną jego niestabilność.

c) Problem zsynchronizowania sygnałów taktujących można rozwiązać z użyciem oscylatorów sterowanych napięciowo (VCXO). Niezbędne jest wówczas zastosowanie procesora sygnałowego z wbudowanym blokiem modulacji szerokości impulsu PWM (*Pulse Width Modulation*) oraz przetwornikiem cyfrowo-analogowym, wbudowanym lub zewnętrznym, służącym do sterowania VCXO (rysunek 9). Oscylatory sterowane napięciowo mają częstotliwość nominalną równą wielokrotności częstotliwości próbkowania sygnału wejściowego 44,1 kHz



Rysunek 8. Schemat blokowy systemu z konwerterem częstotliwości próbkowania

<http://sklep.avt.pl>



Rysunek 9. Schemat blokowy systemu z oscylatorem sterowanym napięciowo (VCXO)

z możliwością odstrajania od niej o pewną wartość. Ta wartość zależy od napięcia stałego podawanego na odpowiednie wejście oscylatora. Sterowanie odstroięciem odbywa się za pośrednictwem DSP, który na podstawie zawartości buforów wejściowych określa czy należy zwiększyć czy zmniejszyć współczynnik wypełnienia PWM. Kiedy procesor odbiera dane szybciej niż wysyła, współczynnik wypełnienia należy zwiększyć, zwiększając tym samym napięcie na wejściu oscylatora. Powoduje to zwiększenie częstotliwości sygnału generowanego przez oscylator, taktującego zarówno nadajnik procesora jak i przetworniki audio. W przypadku, gdy nadajnik jest szybszy niż odbiornik, zachodzi sytuacja odwrotna. Powstała w ten sposób pętla ujemnego sprzężenia zwrotnego doprowadza do ustabilizowania odbiornika i nadajnika, a tym samym do zsynchronizowania sygnałów wejściowego i taktującego przetworniki. Pozwala to na minimalizację jittera sygnału wejściowego.

Przedstawione wyżej techniki synchronizacji sygnałów zegarowych, od najprostszego użycia pętli PLL, po profesjonalne zastosowanie oscylatorów VCXO, są stosowane w zależności od potrzeb bądź klasy urządzenia.

Założenia realizowanego projektu

Opisane powyżej przykładowe rozwiązanie systemu odsłuchowego posłużyły do zaprojektowania układu łączącego ich zalety. Układ powstał w wyniku analizy zalet oraz wad poszczególnych rozwiązań, kosztów elementów i przeznaczenia systemu.

Niewątpliwie najlepszym rozwiązaniem jest takie, w którym sygnał audio jest dostarczany do zestawów głośnikowych w postaci cyfrowej, a następnie przetwa-

rzany w DSP i przetwarzany do postaci analogowej. W tym rozwiązaniu należy zastosować dwa identyczne układy przetwarzania, co pociąga za sobą podwojenie liczby wszystkich elementów, w tym procesorów, płytek drukowanych oraz zasilaczy. W przypadku transmisji na duże odległości rozwiązanie takie jest uzasadnione. Ponieważ przeznaczeniem systemu jest odtwarzanie muzyki w domu, a zatem odległość zestawów od źródła jest rzędu metrów. Przy takim założeniu można zdecydowanie zrezygnować z transmisji cyfrowej na rzecz przesyłania sygnału w postaci analogowej o amplitudzie rzędu Voltów. Przy tak małych poziomach sygnału uniknie się dużych spadków napięć na przewodach. Należy jedynie zadbać o odpowiednie ich ekranowanie w celu możliwie maksymalnego odizolowania przesyłanego sygnału od elektromagnetycznych zakłóceń zewnętrznych. Przy takim rozwiązaniu jest niezbędne wbudowanie wzmacniaczy mocy do zestawów głośnikowych (rozwiązanie charakterystyczne dla systemu aktywnego), co zrealizowano w projekcie. Dzięki temu będzie zminimalizowana, a dokładniej ograniczona do parunastu centymetrów, odległość niekorzystnej transmisji wysokonapięciowych sygnałów głośnikowych. W tym celu zostanie użyta jedna płyta drukowana, z pojedynczym odbiornikiem sygnału, procesorem DSP oraz układami zasilania bloków cyfrowego i analogowego. Zasilanie bloku analogowego obejmuje przetworniki i przedwzmacniacze, które również zostaną umieszczone na omawianej płytce (w sekcji cyfrowo-analogowej). Sekcja przedwzmacniaczy jest zrealizowana na wzmacniaczach operacyjnych, a poziom sygnałów wyjściowych transmitowanych do zestawów głośnikowych nie przekroczy wartości $3,5 V_{RMS}$.

Sygnalem wejściowym dla urządzenia jest sygnał w standardzie S/PDIF. Użyto trzech przełączanych mechanicznie interfejsów: optycznego TosLink, elektrycznych RCA oraz USB. Dwa pierwsze służą do odbierania sygnału z autonomicznych lub komputerowych odtwarzaczy CD. Z kolei port USB umożliwia odsłuchiwanie muzyki z komputerów bez wyjść cyfrowych. Odbiornik SPDIF będzie akceptował dane o standardowych częstotliwościach: 38; 44,1; 48; 96 kHz i długości słowa 16...24 bitów. Elektryczne sygnały wejściowe zostaną galwanicznie odseparowane od sekcji cyfrowo-analogowej za pomocą transformatorów sygnałowych o przekładni 1:1. Synchronizacja sygnału taktującego przetworniki C/A z sygnałem wejściowym jest zrealizowana w układzie z konwerterem częstotliwości próbkowania. Poziom głośności sygnału akustycznego jest regulowany cyfrowo.

System jest stereofoniczny z dwoma dwudrożnymi zestawami głośnikowymi w obudowach zamkniętych. Zwrotnice głośnikowe są zrealizowane z użyciem procesora DSP w funkcji filtrów cyfrowych typu FIR. Ma niezależne układy zasilania dla części analogowej (z transformatorem toroidalnym) i cyfrowej (z transformatorem rdzeniowym). Do stabilizacji napięć zastosowano stabilizatory liniowe. Masy części obwodu analogowego i cyfrowego są połączone w jednym punkcie, w pobliżu układów zasilania.

Podsumowanie

W następnym artykule zostaną opisane poszczególne bloki systemu (blok odbiornika S/PDIF, procesora DSP, przetworników C/A, przedwzmacniaczy oraz wzmacniaczy mocy) oraz sposoby projektowania i implementacji zwrotnic cyfrowych.

Roman Bogusz
Piotr Pietrzyk

<http://forum.ep.com.pl>