

18-bitowy przetwornik C/A audio, część 1

kit AVT-853



Dość skrzątnie omijaliśmy dotychczas w EP zagadnienia cyfrowego audio, a to ze względu na niebotyczne trudności ze stabilnym zaopatrzeniem się w podzespoły. Sytuacja uległa zmianie, w związku z czym rozpoczynamy od projektu stosunkowo łatwego w wykonaniu, lecz bardzo efektownego - kompletnego konwertera audio C/A z wejściami: optycznym i liniowym, z procesorem sygnałowym zapewniającym korekcję odtwarzanego sygnału, zintegrowanym z filtrem, modułem nadpróbkowania, wzmacniaczem słuchawkowym...

Zanim zajmiemy się najsmaczniejszym kąskiem, czyli opisem architektury przetwornika, nieco miejsca poświęcimy przybliżeniu standardu interfejsu I²S, który jest wykorzystywany w sprzęcie popularnym i profesjonalnym do przesyłania w postaci cyfrowej sygnału audio pomiędzy układami tworzącymi tor jego przetwarzania.

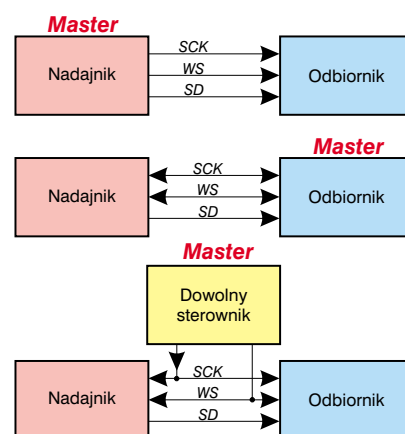
Co to jest I²S?

W cyfrowych systemach audio do przesyłania sygnałów wykorzystywany jest specjalny interfejs szeregowy noszący nazwę I²S (od Inter-IC Sound). Do przesyłania danych (próbek dźwięku) wykorzystywane są 3 linie (rys. 1):

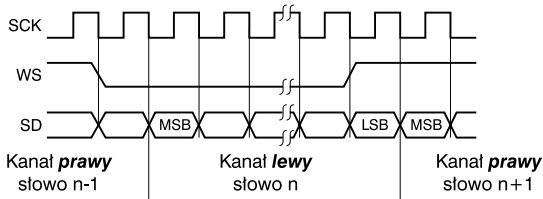
- SCK (Serial ClOcK) - sygnał zegarowy synchronizujący transmisję danych i jednocześnie określający bitową prędkość transmisji. Sygnał SCK zawsze jest wytwarzany przez Mastera systemu.
- WS (Word Select) - sygnał określający, którego kanału dane są w danej chwili przesyłane (WS=0 - kanał lewy, WS=1 - kanał prawy). Sygnał WS jest wytwarzany zawsze przez Mastera systemu. Częstotliwość tego sygnału określa częstotliwość dostarczania kompletnych próbek do kolejnego modułu w torze obróbki danych.

- SD (Serial Data) - szeregowo przesyłane dane z nadajnika do odbiornika z prędkością wyznaczoną przez SCK. W szeregowym strumieniu danych są zmultipleksowane dane dla kanału lewego i prawego. Długość ramki danych nie jest na sztywno określona i zależy od możliwości oraz wymagań systemu audio. Jedynemu ograniczeniu podlega minimalna długość próbki dla każdego kanału - nie może być krótsza niż 7 bitów.

Założenia standardu I²S narzucają konieczność stosowania w systemie obróbki danych audio



Rys. 1. Możliwe konfiguracje systemu I²S.

Rys. 2. Sposób przesyłania danych w I²S.

jednego modułu, który będzie spełniał rolę Mastera. Odpowiada on za wyznaczenie tempa przesyłania danych i decyduje o przesłaniu określonej grupy bitów do jednego z dwóch kanałów przetwarzania. Możliwe są różne konfiguracje włączenia Mastera w system, co doskonale widać na rys. 1.

Przykład transmisji trzech kolejnych ramek danych przedstawiono na **rys. 2**. Częstotliwość zmian poziomu sygnału WS wynika z przyjętej częstotliwości taktowania przesyłania bitów f_{SCK} oraz długości słowa N i wynosi:

$$f_{WS} = f_{SCK} / N$$

Jak wcześniej wspomniano, długość ramki danych może być różna, zazwyczaj wynosi 16..24 bitów. Ponieważ producenci układów w bardzo szybkim tempie wprowadzają coraz to doskonalsze układy cyfrowej obróbki danych oraz coraz „gęstsze“ przetworniki (np. Crystal Semiconductors proponuje już 30-bitowe konwertery

C/A!), twórcy standardu I²S zaproponowali proste, a przy tym bardzo skuteczne rozwiązanie zapewniające bezkonfliktową współpracę układów o różnej „długości“. Dzięki temu cyfrowy filtr „obrabiający“ sygnały 24-bitowe może przygotowywać dane dla 16-bitowego przetwornika C/A i nie spowoduje to żadnych zakłóceń w odtwarzanym sygnale.

Jak to jest możliwe? W standardzie I²S dane są przesyłane w kolejności od MSB (najbardziej znaczący bit) do LSB (najmniej znaczący bit). Konstrukcja interfejsów w układach I²S jest taka, że wybierają one z przesyłanego słowa tylko taką liczbę bitów (począwszy od MSB), jaką są w stanie „obsłużyć“. W przypadku, gdy przesyłanych jest więcej bitów niż jest w stanie odebrać układ odbiorczy, to nadmiarowe bity są po prostu ignorowane. Jeżeli przesyłanych bitów jest mniej niż może „obsłużyć“ układ odbiorczy, to w miejsce bitów mniej znaczących są wstawiane zera. Każdorazowa zmiana adresu kanału (sygnał WS) potwierdzana jest jednym taktem zegarowym, podczas którego żadne dane nie są przesyłane.

W górnej części **rys. 3** przedstawiony został przebieg charakte-

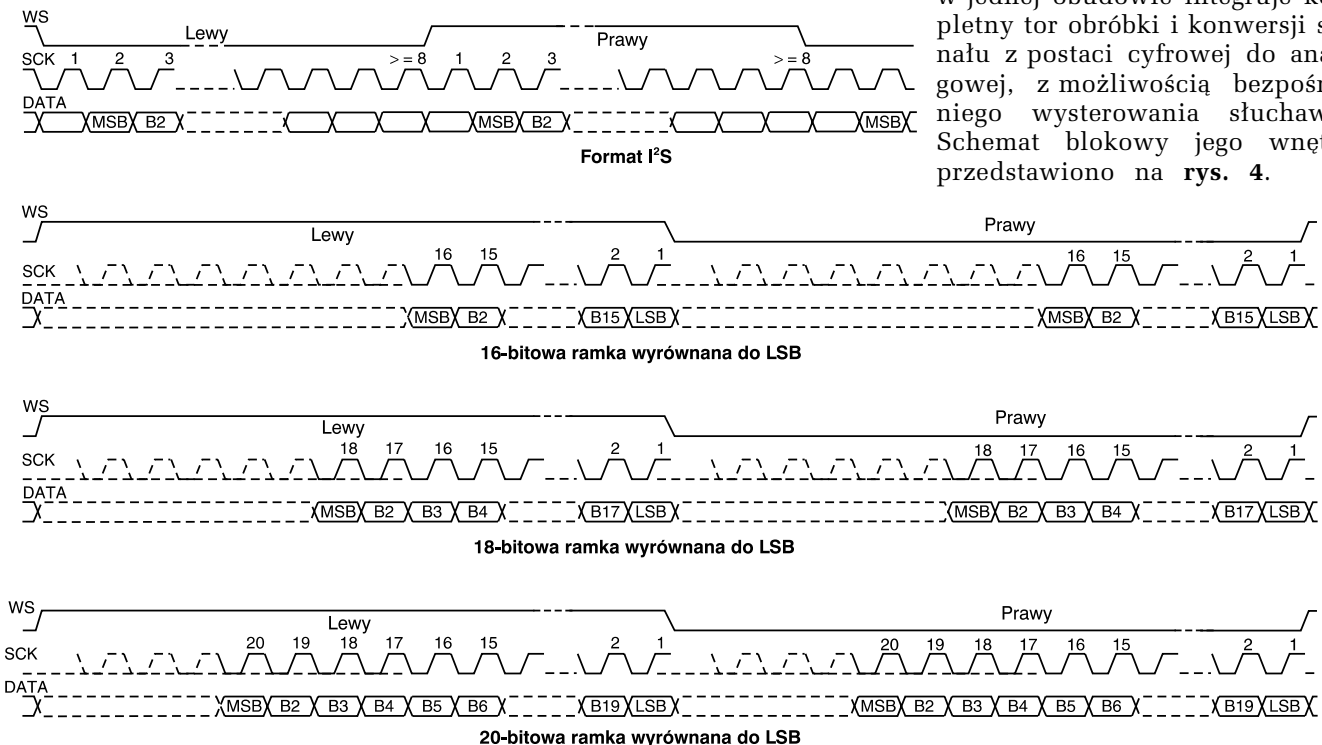
Podstawowe parametry i właściwości przetwornika:

- ✓ rozdzielczość: 16/18/20 bitów,
- ✓ wejście S/PDIF optyczne (TOSLink) oraz RCA,
- ✓ wyjścia: słuchawkowe (minijack) i dwa wyjścia audio RCA,
- ✓ automatyczne dostosowanie się przetwornika do długości ramki danych,
- ✓ 64-krotne nadpróbkowanie,
- ✓ wbudowany procesor DSP umożliwiający regulację barwy dźwięku i głośności oraz „inteligentne“ wzmocnienie basów,
- ✓ amplituda sygnału wyjściowego audio: 0,64V (na 32Ω),
- ✓ odstęp sygnału od szumu: 90dB,
- ✓ zniekształcenia nieliniowe: 0,05%,
- ✓ napięcie zasilania: 9..15VDC,
- ✓ pobór prądu: 120mA.

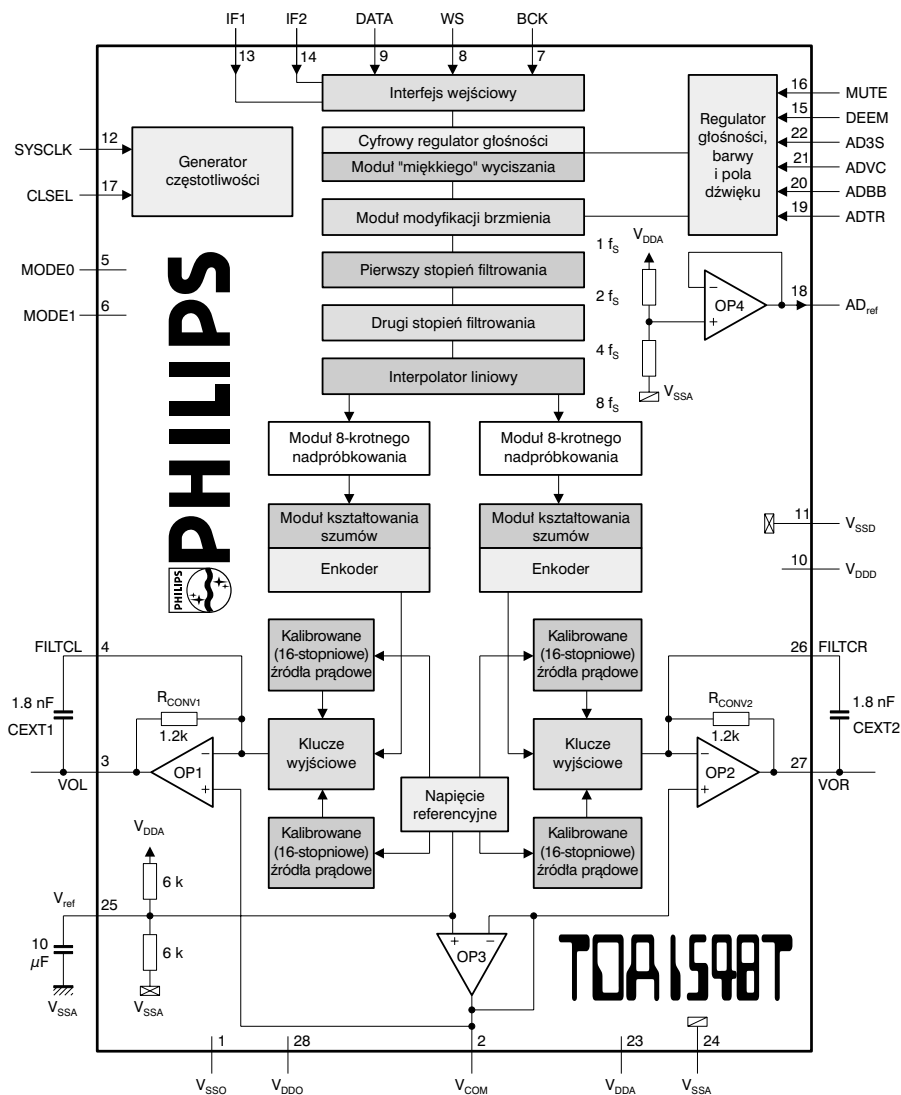
ryzując kompletny transfer danych dla jednej próbki dźwięku w obydwu kanałach. Trzy kolejne przebiegi przedstawiają transfery danych równie często stosowane w układach przystosowanych do pracy w systemach cyfrowego audio, noszące nazwę *LSB Justified*. Nie są one zgodne ze standardem I²S, a to ze względu na odwróconą kolejność bitów danych w ramce, brak „pustego“ impulsu zegarowego po zmianie adresu kanału danych i odwrotną polaryzację sygnału selekcji kanałów WS.

„Serce“ przetwornika - TDA1548

Wykorzystany w projekcie układ jest niezwykle, ponieważ w jednej obudowie integruje kompletny tor obróbki i konwersji sygnału z postaci cyfrowej do analogowej, z możliwością bezpośredniego wysterowania słuchawek. Schemat blokowy jego wnętrza przedstawiono na **rys. 4**.



Rys. 3. Różne formaty wejściowe układów cyfrowego systemu audio.



Rys. 4. Schemat wewnętrzny układu TDA1548T.

Na wejściu układu TDA1548 znajduje się konfigurowalny interfejs szeregowy, który może pracować w jednym z czterech trybów:

- zgodnym z I²S, dzięki czemu wbudowany w układ przetwornik C/A, układ konwersji próbkowania oraz filtry dolnoprzepustowe automatycznie dopasowują się do liczby bitów w dostarczanych próbkach,
- trzy tryby *LSB Justified*: 16, 18 i 20-bitowy.

Wybór trybu pracy jest możliwy dzięki zmianie stanów logicznych na wyprowadzeniach oznaczonym IF1 i IF2. W tab. 1 znajduje się tablica prawdy dla tych wejść.

Po konwersji sygnału z formatu I²S na wewnętrzny format układu TDA1548, jest on poddawany kilku modyfikacjom:

- deemfazie, jeżeli jest taka konieczność,

- dwustopniowej modyfikacji barwy dźwięku (niskie i wysokie),
- regulacji poziomu głośności z możliwością miękkiego wyciszenia,
- trzystopniowej korekcji brzmienia basów, która minimalizuje wpływ niedoskonałości przetwarzania sygnałów o najniższych częstotliwościach przez słuchawki oraz głośniki o niewielkich średnicach membrany.

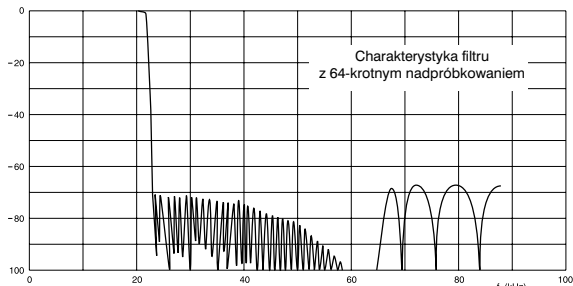
Cyfrowe regulatory barwy i natężenia dźwięku są sterowane z wejść analogowych, które wyposażono w analogowy multiplekser oraz 6-bitowy przetwornik A/C. Częstotliwość skanowania wejść wynosi

1,38kHz. Tak więc, z punktu widzenia użytkownika, zachowują się one jak regulatory analogowe. Nastawy regulatorów można zmieniać za pomocą zwykłych potencjometrów, co jest sposobem nad wyraz wygodnym.

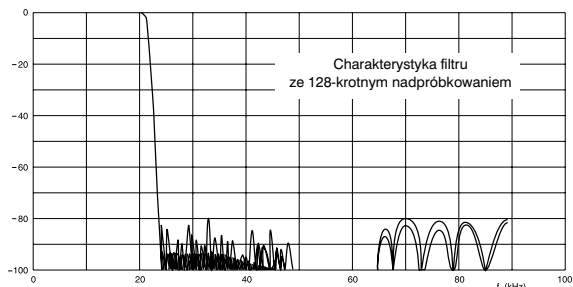
Wejście korekcji brzmienia basów (AD3S) jest 3-stanowym wejściem analogowym, które umożliwia wybranie jednej z trzech charakterystyk korekcji: płaska, basy silnie wzmacnione, basy lekko wzmacnione. Wejście AD3S można sterować za pomocą przełącznika z położeniem zerowym lub standardowego „potencjometru”.

Moduł cyfrowej regulacji głośności współpracuje z modułem miękkiego wyciszenia. Jego charakterystyka tłumienia ma kształt zbliżony do rosnącej części krzywej cosinus, składającej się z 32 z kroków. Czas wyciszenia sygnału wynosi ok. 23ms.

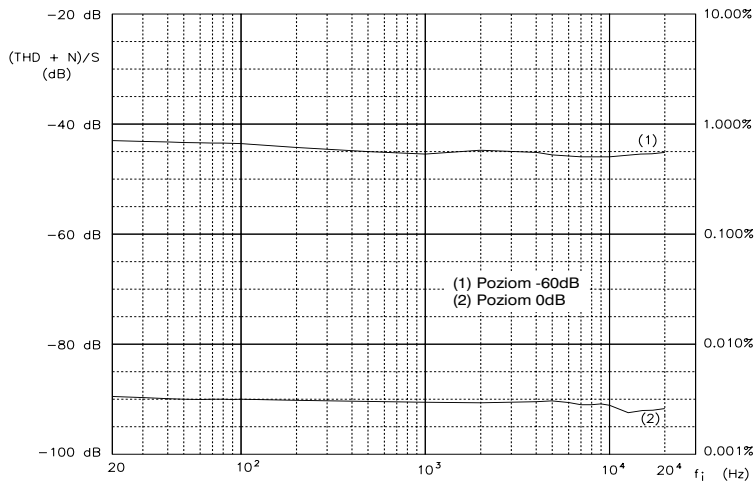
Zastosowane w układzie cyfrowe filtry, liniowy interpolator, konwertery częstotliwości próbkowania (z układami próbkująco-pamiętającymi) oraz bloki eliminacji zakłóceń szumowych pochodzących od próbkowania pozwalają na tyle poprawić charakterystykę widmową konwertowanego sygnału, że dobrej jakości sygnał audio można otrzymać po jednostopniowej filtracji w filtrze dyskretnym RC. Wypadkową charakterystykę pasmową filtrów za-



Rys. 5. Charakterystyka filtrów w układzie TDA1548.



Rys. 6. Charakterystyka filtrów z dwukrotnie większą częstotliwością nadpróbkowania.



Rys. 7. Charakterystyka przedstawiająca zniekształcenia sygnału na wyjściu TDA1548.

stosowanych w układzie TDA1548 przedstawiamy na rys. 5. Dla porównania, na rys. 6 znajduje się charakterystyka nieco lepszego filtra ze 128-krotnym napróbkowaniem.

Tak więc znaczne skomplikowanie wewnętrznej struktury przetwornika zaowocowało radykalnym uproszczeniem jego układu aplikacyjnego. Uzyskanie dobrych parametry przetwarzania umożliwiła także specjalna technika konwersji C/A oparta na czterech (po dwa na kanał) 5-bitowych kluczach prądowych, która zapewnia ciągłą autokalibrację i dużą liniowość przetwarzania. Przetworniki tego typu są powszechnie stosowane w innych układach firmy Philips z konwersją audio C/A (np. TDA1305, TDA1545 itp.). Zastosowane w nich rozwiązania zapewniają niezwykle niski poziom zniekształceń nieliniowych i duży odstęp sygnału od szumu (rys. 7).

Najpoważniejszą wadą układu TDA1548 - przynajmniej z punktu widzenia autora - jest jego obudowa, ponieważ dostępne są tylko dwie jej wersje, obydwie przystosowane do montażu powierzchniowego (SO28 i SSOP28).

Tab. 1. Możliwe tryby pracy interfejsu szeregowego w TDA1548.

IF1	IF2	Tryb pracy
0	0	zgodny z I ² S
0	1	16-bitowy z wyrównaniem do LSB
1	0	18-bitowy z wyrównaniem do LSB
1	1	20-bitowy z wyrównaniem do LSB

Opis układu przetwornika

Schemat elektryczny przetwornika znajduje się na rys. 8. Ze względu na wykorzystanie w przetworniku układów o dużej skali integracji, cały tor audio składa się z zaledwie dwóch układów scalonych: US2 i US3. Rola spełniana przez US3 w przetworniku jest oczywista - konwertuje on dane z postaci cyfrowej (w formacie I²S) na wyfiltrowany sygnał audio. Kondensatory C17 i C20 wraz z wewnętrznymi wzmacniaczami operacyjnymi wbudowanymi w TDA1548 spełniają rolę wyjściowych filtrów pierwszego rzędu, które usuwają resztki sygnałów zakłócających przebieg audio.

Ponieważ interfejs I²S został pomyślany jako lokalna magistrala danych służąca do przesyłania danych pomiędzy układami w obrębie jednego urządzenia, w przetworniku pracującym jako niezależne urządzenie niezbędne było zastosowanie konwertera sygnału S/PDIF na I²S. Zadanie to realizuje układ US2 (YM3623B firmy Yamaha). Jest to odbiornik S/PDIF pierwszej generacji, dość czuły na zakłócenia sygnału wejściowego typu *jitter*, co objawia się nieco mniejszą niż w nowoczesnych konstrukcjach stabilnością odtworzonego sygnału SCK. Jak jednak wykazały nasze doświadczenia, potencjalna niestabilność jest na tyle mała, że nawet w mało sprzyjających warunkach użytkownik nie będzie jej w stanie usłyszeć. Sygnał do wejścia US2 podawany jest z wyjścia odbiornika optycznego TORX173 (TO1) lub z wyjścia prostego wzmacniacza wykonanego na

WYKAZ ELEMENTÓW

Rezystory

P1, P2, P3: 10kΩ
 R1: 75Ω
 R2, R12, R13: 100Ω
 R3, R11, R16: 10kΩ
 R4: 10Ω
 R5: zwora
 R6, R10: 2,2Ω
 R7: 18kΩ
 R8: 1MΩ
 R9: 270Ω
 R14, R17, R18: 1kΩ
 R15: 12kΩ
 R19, R20, R21: 470Ω

Kondensatory

C1, C2: 470μF/25V
 C3, C5, C6, C8, C10, C15, C18, C19: 100nF
 C4, C11: 47μF/16V
 C7: 4,7μF/16V
 C9, C21: 10μF/16V
 C12: 8,2nF
 C13, C14: 10pF
 C16: 22μF/16V
 C17, C20: 1,2nF
 C22, C24: 100μF/16V
 C23: 10nF

Półprzewodniki

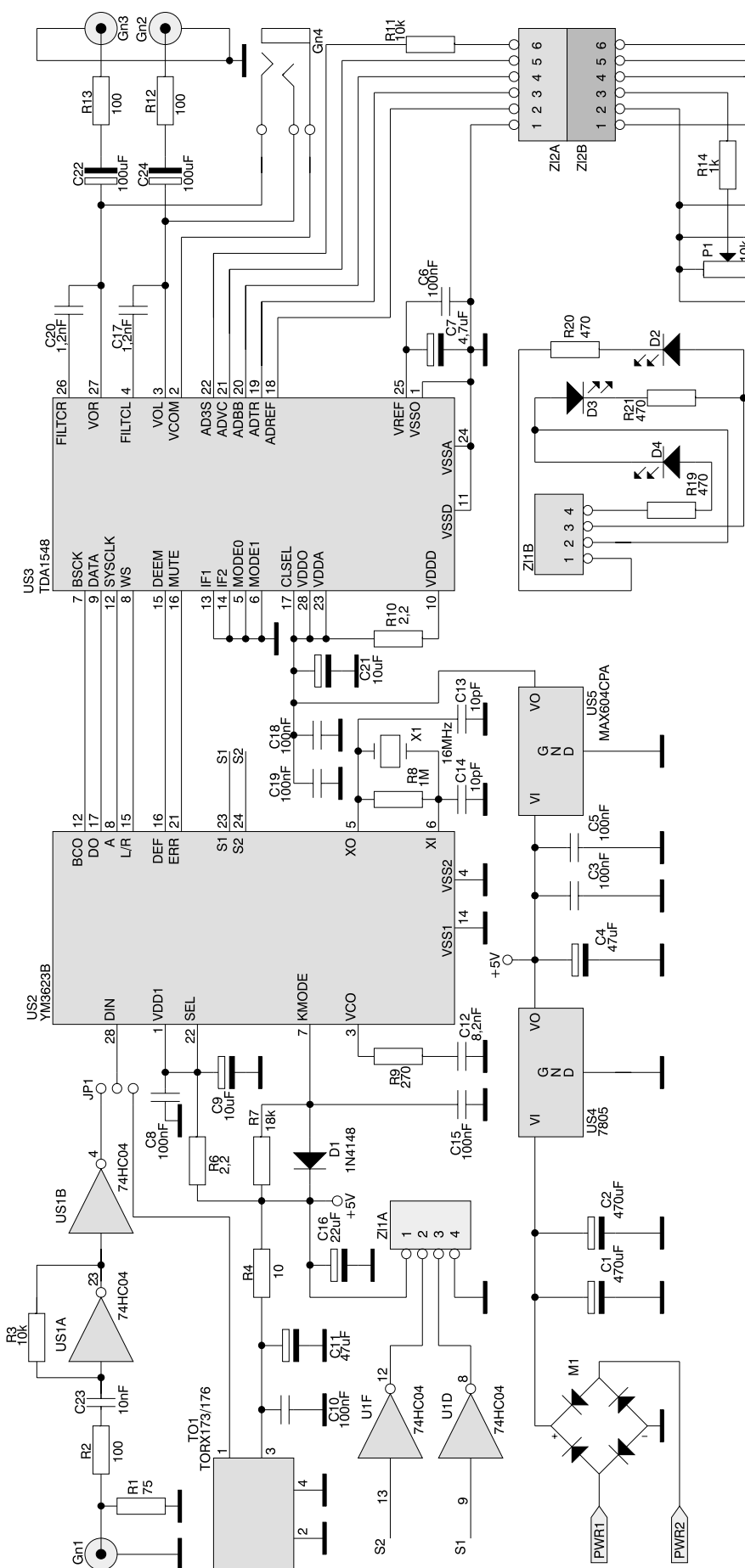
D1: 1N4148
 D2..D4: LED prostokątne
 M1: 1,5A/50V
 US1: 74HC04
 US2: YM3623B
 US3: TDA1548TZ
 US4: 7805
 US5: MAX604CPA
 TO1: TORX173/176

Różne

Gn1..Gn3: pojedyncze złącza Cinch do druku
 Gn4: gniazdo minijack stereo do druku
 JP1: 3 goldpiny + jumper
 SW1: przełącznik trzypozycyjny z "zerem"
 X1: 16MHz
 Z11A, Z11B: kompletne, 4-stykowe złącze szpilkowe
 Z12A, Z12B: kompletne, 6-stykowe złącze szpilkowe
 Radiator dla US4

bramkach US1A i US1B. Jako US1 można stosować tylko układy z rodziny 74HC! Selekcji wejścia aktywnego w danej chwili można dokonać za pomocą jumpera JP1.

Układ US2 na podstawie wchodzącego sygnału S/PDIF samoczynnie wykrywa jego częstotli-



Rys. 8. Schemat elektryczny 18-bitowego przetwornika C/A.

wość próbkowania oraz zastosowanie podczas zapisu preemfazy. Na podstawie tych informacji automatycznie włącza moduł cyfrowej deemfazy (w US3) i za pomocą diod świecących D2..4 wskazuje częstotliwość próbkowania. Ogromną zaletą układu US2 są „zaszyte” w nim mechanizmy detekcji błędów w odbieranym sygnale, co pozwala na automatyczne ich maskowanie poprzez wyciszenie sygnału audio. Odpowiada za to sygnał na wejściu MUTE US3.

Wszystkie elementy, z wyjątkiem US3, są zasilane stabilizowanym napięciem 5V. Rolę stabilizatora spełnia układ US4, którego wejście jest zasilane z mostka prostowniczego M1. Zadaniem tego mostka jest zabezpieczenie urządzenia przed odwróceniem polaryzacji napięcia zasilającego, a nie jego prostowanie. Do zasilania przetwornika należy stosować zasilacz prądu stałego. Kondensatory elektrolityczne C1 i C2 dodatkowo filtrują napięcie na wejściu stabilizatora US4, ograniczając tętnienia, które mogłyby być słyszalne.

Ponieważ układ TDA1548 opracowano z myślą o sprzęcie przenośnym, jest przystosowany do zasilania napięciem o niskiej wartości - zalecane jest 3..3,3V. Układ US5 jest stabilizatorem o niskim spadku napięcia pomiędzy wejściem i wyjściem, dzięki czemu zapewnia na swoim wyjściu stabilne napięcie o wartości 3,3V. Napięcie to jest wykorzystywane tylko do zasilania przetwornika US3.

Potencjometry P1..3 służą do regulacji barwy dźwięku i głośności wyjściowego sygnału audio. Regulacje wpływają zarówno na wyjście słuchawkowe, jak i na wyjścia Cinch-RCA.

Piotr Zbysiński, AVT
piotr.zbysinski@ep.com.pl

Wzory płytek drukowanych w formacie PDF są dostępne w Internecie pod adresem: <http://www.ep.com.pl/pcb.html> oraz na płycie CD-EP02/2000 w katalogu PCB.