

# Cyfrowe zwrotnice głośnikowe (1)

## Zagadnienia wstępne

*Każdy system elektroakustyczny stanowi łańcuch urządzeń, na którego początku są mikrofony, a na końcu zestaw głośnikowy. W takim zestawie sprawdza się zasada „najsłabszego ogniwa”, która określa jakość efektu końcowego. Jak wiadomo, nawet najlepsze zestawy głośnikowe nie zabrzmiały dobrze, gdy źródłem sygnału są nieudane przetworniki cyfrowo-analogowe albo wzmacniacze o słabych parametrach. Z kolei bez dobrych zestawów głośnikowych, nie wykorzystana jest w pełni możliwość dobrze zaprojektowanego przetwornika cyfrowo-analogowego czy wzmacniacza. Jeżeli zależy nam na wysokiej wierności odtwarzania materiału muzycznego, to warto dokładniej przyjrzeć się tym elementom toru, na których budowę mamy wpływ. Specyfikując założenia projektowe uwzględniające wymagania zakładanego budżetu, możemy zaprojektować system, który spełni nasze oczekiwania.*

W tym artykule przedstawiamy ideę wspólnego podejścia do rozwiązań w sprzęcie audio polegającą na zastosowaniu procesorów sygnałowych (DSP), które są popularne w profesjonalnym sprzęcie nagłośnieniowym, ale w urządzeniach konsumenckich są spotykane stosunkowo rzadko. Nowym zadaniem DSP jest zastąpienie pasywnych zwrotnic głośnikowych zaimplementowanymi programowo filtrami cyfrowymi. Zaprezentujemy rozwiązania poszczególnych elementów układu, przydatne narzędzia projektowe oraz przedstawimy projekt systemu odsłuchowego z procesorem DSP. Ma to pomóc Czytelnikowi w zaprojektowaniu i wykonaniu własnego urządzenia tego rodzaju. Zrobimy to na przykładzie stereofonicznego systemu odsłuchowego do odtwarzania muzyki w warunkach domowych. Jednak podane wskazówki można będzie stosować w projektach innych systemów np. popularnej w ostatnich latach konfiguracji 5.1. Omówimy kolejno następujące zagadnienia:

- źródła sygnałów audio (AES3/SPDIF) – zalety i wady transmisji cyfrowej,
- problem synchronizacji pomiędzy nadajnikiem a przetwornikami C/A, w tym zjawisko jitter'a,
- rozwiązania układowe poszczególnych sekcji toru elektroakustycznego,
- implementacja zwrotnic głośnikowych na bazie filtrów z wybranym procesorem

DSP, w tym: odbiór sygnału, filtrowanie oraz transmisja,

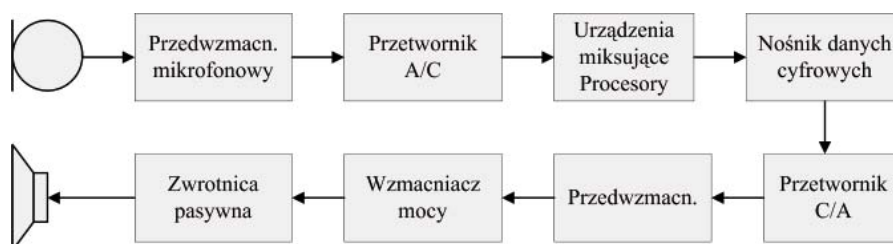
- filtry cyfrowe oraz metody ich projektowania z użyciem narzędzia FDATool, pakietu MatLab, w tym konwersja uzyskanych współczynników filtrów na język C i Asembler.

Rozpatrzmy przykładowy schemat blokowy systemu elektroakustycznego umieszczony na **rysunku 1**. Dzięki temu określimy elementy toru, którymi zajmiemy się. Współcześnie w 99% przypadków z sygnałem analogowym mamy do czynienia jedynie przy nagrywaniu oraz przy odtwarzaniu materiału. Mastering, przetwarzanie, kompresja, efekty i przechowywanie danych audio są obecnie realizowane cyfrowo.

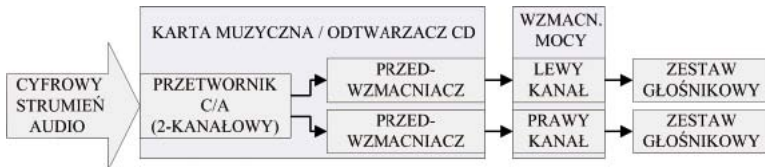
Przy odtwarzaniu muzyki za pomocą komputerów, odtwarzaczy mp3 lub telefonów komórkowych mamy możliwość wpływu na przebieg sygnału poprzez korektory cyfrowe, filtry, efekty itd.

Analizując schemat blokowy z rysunku 1 można stwierdzić, iż najsłabszym ogniwem (a w pewnym sensie zbędnym) są zwrotnice głośnikowe oraz same głośniki. Zwrotnice są filtrami pasywnymi wykonanymi w oparciu o elementy RLC, których zadaniem jest podział pasma akustycznego (20 Hz...20 kHz) na podpasma. Taka potrzeba wynika z niedoskonałości głośników. Przenoszą one bowiem tylko pewien zakres częstotliwości akustycznych, co wymusza taki dobór głośników do kolumny, aby pasmo akustyczne zostało możliwie równomiernie pokryte w tym zakresie. Dlatego jest stosowany podział głośników na nisko-, średnio- i wysokotonowe. Liczba różnych głośników zastosowanych do pokrycia pasma akustycznego określa drożność kolumny (przykładowo, kolumna z dwoma identycznymi głośnikami nisko-/średniotonowymi i jednym wysokotonowym jest kolumną dwudrożną).

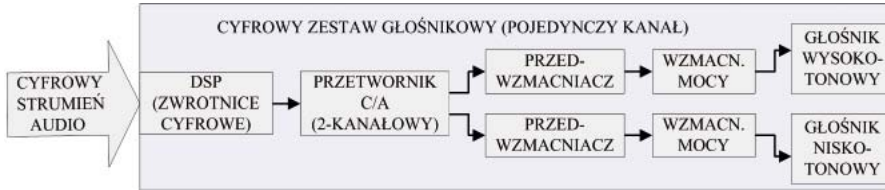
Można zadać pytanie: po co stosować zwrotnice do ograniczania pasma, skoro głośniki same poprzez swoją charakterystykę przenoszenia to pasmo ograniczają?. Powodów jest kilka. Głównie chodzi o to, iż nie da się dobrać głośników tak, aby górna częstotliwość graniczna jednego pokrywała się z dolną następnego. Zazwyczaj pasma przenoszenia głośników pokrywają się w pewnych zakresach częstotliwości, co spowodowałoby głośniejsze odtwarzanie sygnału akustycznego w tym zakresie. A przecież dążymy do równomiernego odtwarzania sygnału w całym paśmie akustycznym, tak aby wszystkie dźwięki były odtwarzane z tą samą głośnością. Kolejnym powodem jest ograniczenie energii sygnału. Jeżeli głośnik nie przenosi sygnału o danej częstotliwości, to nie znaczy, że nie ma ona na niego wpływu, ponieważ



Rysunek 1. Schemat blokowy toru elektroakustycznego



Rysunek 2. Klasyczne rozwiązanie systemu odtwarzania audio



Rysunek 3. Cyfrowe rozwiązanie systemu odtwarzania audio

wydziela się ona w postaci ciepła w cewce głośnika. Zatem ogranicza się pasmo sygnału zwrotnicami również po to, aby nie wydzielać w głośniku zbędnej energii. Dotyczy to głównie głośników wysokotonowych, które mają cewkę z bardzo cienkiego, łatwego do przepalenia drutu. Przy podawaniu na nie sygnału o niskiej częstotliwości najprawdopodobniej ulegną uszkodzeniu.

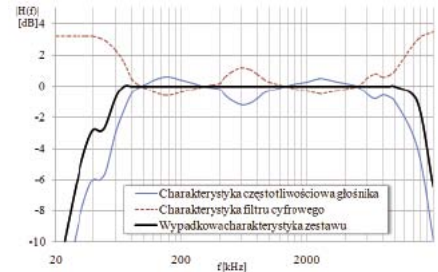
Wokół częstotliwości podziału zwrotnice wprowadzają największe zniekształcenia, w tym zniekształcenia fazowe (przesunięcie fazy sygnału jednego głośnika w stosunku do drugiego o 90, 180 albo 270 stopni w zależności od rzędu zwrotnic). Co więcej, częstotliwość podziału zazwyczaj leży w zakresie 1,5...4 kHz, w którym ucho jest najbardziej wrażliwe. Dąży się zatem do zawężenia tego zakresu poprzez zwiększenie rzędu filtra, a tym samym uzyskanie większej stromości nachylenia ich charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej. To z kolei powoduje zwiększenie liczby użytych elementów RLC, a w konsekwencji (zazwyczaj) zwiększenie zniekształceń wprowadzanych przez zwrotnice. Dodatkowo problem występuje przy filtrze dolnoprzepustowym dla głośnika subbasowego, gdyż dla uzyskania jego niskiej częstotliwości granicznej należy zastosować elementy o sporych wymiarach. Kolejną wadą zwrotnic pasywnych jest trudność ich zestrojenia, czyli takiego dobrania elementów, dla których charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa zestawu głośnikowego w zakresie częstotliwości podziału jest równomierna (płaska). Wymaga to wykonania pomiarów w komorze bezchłowej.

Alternatywą dla owego takiego „klasycznego” podejścia (rysunek 2) jest całkowita eliminacja zwrotnic pasywnych na rzecz filtrów cyfrowych zrealizowanych z użyciem procesora sygnałowego.

Zestawy oparte na takim rozwiązaniu są potocznie nazywane zestawami cyfrowymi, a ich koncepcja powstała w połowie lat 90-ych. Wówczas jednak takie rozwiązanie było mało praktyczne ze względu na

niezadowalające parametry procesorów oraz ich wysoką cenę. Sytuacja zmieniła się wraz z rozwojem procesorów sygnałowych, ale jedynie w profesjonalnym sprzęcie audio. Obecnie w topowych produktach takich firm, jak JBL czy Renkus-Heinz są stosowane procesory DSP.

W zwrotnicach cyfrowych wyeliminowano większość wad klasycznych zwrotnic pasywnych, wprowadzając jednocześnie większą elastyczność doboru głośników wskutek możliwości kształtowania ich charakterystyk częstotliwościowych. Procesory sygnałowe pozwalają zrealizować filtry o większym nachyleniu charakterystyki, niż w przypadku filtrów analogowych. Ponadto, projektując je w postaci filtrów typu FIR (Finite Impulse Response) uzyskuje się liniową charakterystykę fazowo-częstotliwościową w określonym przez projektanta paśmie częstotliwości. Oczywiście, nie są one pozbawione wad, ponieważ dzieląc pasmo akustyczne na poziomie cyfrowym (rysunek 3) projektant musi liczyć się ze zwielokrotnieniem liczby kanałów systemu, gdyż każdy głośnik musi mieć niezależny tor elektroakustyczny. Zatem dla dwudrożnego zestawu stereo, liczba bloków funkcjonalnych, począwszy od przetworników C/A, a skończywszy na wzmacniaczach mocy, podwaja się w stosunku do rozwiązania klasycznego. Jednak biorąc pod uwagę fakt, iż obecnie cena układów scalonych jest znacznie niższa niż w przeszłości, ta największa wada cyfrowego rozwiązania przestaje mieć duże znaczenie. Natomiast projektant, dzięki takiemu podejściu, ma możliwość niezależnego opracowania każdego z torów. W klasycznych kolumnach ze zwrotnicami biernymi, przy doborze głośników należało brać pod uwagę takie parametry, jak: pasmo przenoszenia, efektywność, impedancja, liniowość pasma przenoszenia, moc itd. Mając do dyspozycji procesor sygnałowy nieistotne są ograniczenia związane z impedancją i efektywnością głośników, gdyż projektant jest w stanie ustalić wzmocnienie sy-



Rysunek 4 Zastosowanie procesora DSP pozwala na wyrównanie charakterystyki przenoszenia głośnika za pomocą filtrów cyfrowych, których charakterystyka jest lustrzanym odbiciem charakterystyki głośnika

gnału niezależnie dla każdego toru i każdej częstotliwości. Istnieje bowiem możliwość eliminowania nierównomierności charakterystyki transmitancji zestawu poprzez takie ukształtowanie charakterystyki filtra, aby była lustrzanym odbiciem charakterystyki głośnika. W konsekwencji uzyskuje się równomierną charakterystykę amplitudową systemu w całym paśmie głośnika (rysunek 4).

Kolejną zaletą jest możliwość znacznego poszerzenia pasma przenoszenia poprzez podbicie sygnału na granicach tego pasma, przy czym należy pamiętać, iż zwiększenie poziomu sygnału o 3 dB wiąże się z dwukrotnym zwiększeniem jego mocy dla danej częstotliwości. Należy również zauważyć, iż w tym rozwiązaniu poszczególne wzmacniacze mocy nie pracują z całym zakresem pasma akustycznego, a jedynie w paśmie określonym przez poprzedzający go filtr (w konfiguracji pasywnej filtry znajdowały się za wzmacniaczami mocy). Ograniczamy tym samym zniekształcenia intermodulacyjne wzmacniacza, a w konsekwencji poprawiamy jego parametry dynamiczne.

Zgodnie z założeniami cyfrowych zestawów głośnikowych, transmisja od źródła do odbiornika odbywa się w sposób cyfrowy (SPDIF/AES3) w postaci sygnałów elektrycznych lub optycznych. Wyeliminowany jest tym samym jeden z problemów dzielących miłośników sprzętu Hi-End’owego, mianowicie: „Jak bardzo powinny być złote kable głośnikowe aby sygnał na tym nie ucierpiał?”. Montując przetworniki C/A i wzmacniacze mocy wewnątrz obudów głośnikowych, ograniczamy linię transmisyjną sygnału analogowego do paru lub parunastu centymetrów. Natomiast do transmisji sygnału cyfrowego wystarczy użyć zwykłego kabla ekranowanego o odpowiedniej impedancji lub światłowodu.

Wadą cyfrowych zestawów jest zwielokrotnienie ich bloków funkcjonalnych. Oszczędza się natomiast na elementach pasywnych zwrotnic, których cena w wysokiej jakości kolumnach znacznie prze-

wyższą cenę cyfrowych układów scalonych, w tym procesorów. Kolejnym minusem omawianego rozwiązania są dodatkowe zasilacze – dla części cyfrowej oraz dla przetworników C/A i przedwzmacniaczy. Przy czym należy dołożyć starań, aby prawidłowo poprowadzić i odseparować masę analogową od cyfrowej, łącząc je w jednym punkcie (jak najbliżej zasilacza lub przetworników C/A). W przypadku zasilania bloków analogowych należy zastosować dobrej jakości transformatory, najlepiej toroidalne, bezrdzeniowe. Złym pomysłem jest próba stosowania zasilaczy impulsowych (nawet do części cyfrowej), gdyż wprowadzają one znaczne zakłócenia. Stosując obecnie najpopularniejsze 24-bitowe przetworniki sigma-delta, musimy pamiętać, iż szумы rzędu ułamków mV ograniczają znacznie ich dynamikę. Jeżeli przyjąć, iż zakres napięcia wyjściowego przetwornika to 1 V, to dzieląc go na  $2^{16}$  przedziałów kwantowania (przetworniki 16-bitowe) uzyskuje się wartość napięcia odpowiadającego pojedynczemu bitowi (LSB)  $15 \mu\text{V}$ . Z kolei dzieląc ten zakres na  $2^{24}$  przedziałów (przetworniki 24-bitowe), to napięcie odpowiadające jednemu bitowi (LSB) wynosi  $60 \text{ nV}$ !

Zgodnie z wzorem (1), 24-bitowy przetwornik ma stosunek sygnał/szum (okre-

ślający jego dynamikę) teoretycznie na poziomie 146 [dB].

$$(1) S/N = (6,02n + 1,76) \text{ dB}$$

W praktyce mając gotowy układ i mierząc jego dynamikę (S/N), na podstawie przekształconego powyższego wzoru, wyznacza się tzw. parametr ENOB określający efektywną (rzeczywistą) liczbę bitów przetwornika (2):

$$(2) \text{ENOB} = (S/N - 1,76) / 6,02$$

Nie wystarczy zatem mieć układ scalony przetwornika z najwyższej półki. Jego „bitowość” określa maksymalną, możliwą do uzyskania dynamikę. **Jednak jaką dynamikę uzyskamy w dużej mierze zależy nie tylko od użytych elementów, lecz również od projektu płytki drukowanej (PCB) i układów zasilania.**

Zastosowanie procesorów DSP daje jeszcze większe możliwości w przypadku profesjonalnego nagłaśniania, gdy jest stosowana duża liczba zestawów. Umożliwiają one zaimplementowanie linii opóźniających dla zestawów dogłaśniających najbardziej oddalone strefy pomieszczenia. W bardziej zaawansowanych systemach, wykorzystujących mikrofony pomiarowe i zaimplementowane filtry adaptacyjne, system jest w stanie samodzielnie dostroić charakterystykę zestawów do odpowiedni impulsowej pomieszczenia w celu

uzyskania równomiernej charakterystyki całego układu. Producenci cyfrowych zestawów głośnikowych wraz z zakupionym sprzętem udostępniają oprogramowanie, pozwalające na sterowanie całym systemem z poziomu jednego komputera. Dostępne są gotowe preset'y charakterystyk zestawów, dobierane pod kątem rodzaju odtwarzanego sygnału, od rodzaju pomieszczenia i jego parametrów czy nawet od warunków pogodowych w przypadku nagłaśnienia dużych imprez masowych.

Rozwiązanie cyfrowe stało się bardzo popularne w sprzęcie profesjonalnym, jednak obecnie wykorzystuje się je również w lepszych i droższych systemach domowych. Ich większy koszt jest spowodowane nie tyle zastosowaniem dużej liczby układów cyfrowych, lecz lepszych głośników i bloków analogowych. Zestawy takie nie są produkowane na skalę masową, co również ma duży wpływ na ich wysoką cenę.

W kolejnym artykule będzie omówiona cyfrowa transmisja sygnału audio w standardzie SPDIF oraz synchronizacja przetworników C/A z nadajnikiem sygnału.

**Roman Bogusz  
Piotr Pietrzyk**

REKLAMA

**STEROWNIKI.PL**

Sterowanie w automatyce  
portal branżowy

- Aktualności z branży • Pliki • Giełda
- Katalog firm • Baza wiedzy • Praca
- Kalendarz imprez • Kursy • Forum

**Qwerty**  
www.qwerty.pl

PROJEKTUJEMY  
PRODUKUJEMY  
SPRZEDAJEMY

klawiatury • elewacje  
tabliczki • zestyki foliowe

Towarzystwo Elektrotechnologiczne **Qwerty** Sp. z o.o.  
ul. Siewna 21, 94-250 Łódź  
tel. +48 426324792, +48 426333284, +48 426304264,  
fax +48 426328593  
e-mail: qwerty@qwerty.pl; www.qwerty.pl;