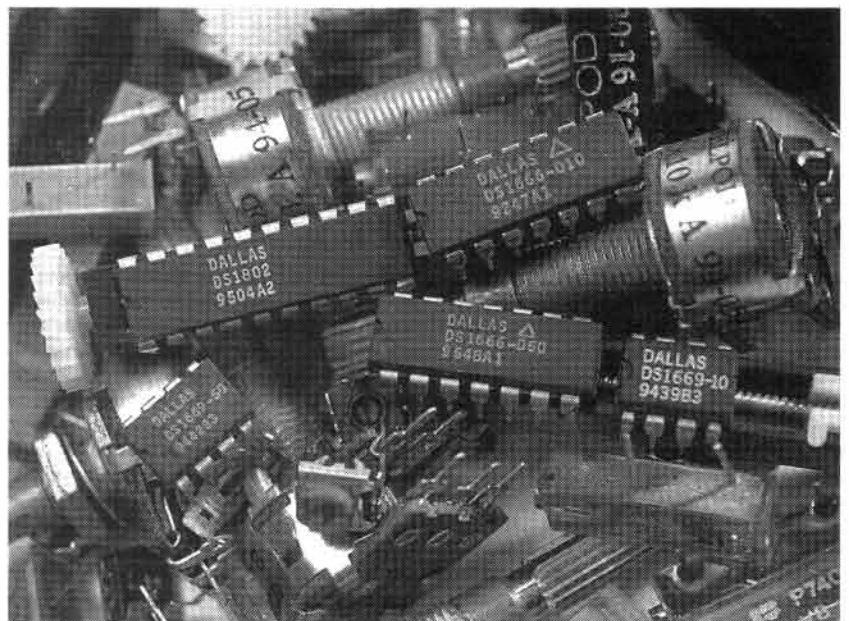


Potencjometry półprzewodnikowe

Ciągle udoskonalana technologia produkcji półprzewodników pozwala na integrację w jednej strukturze coraz bardziej skomplikowanych modułów funkcjonalnych. Dotychczas tej integracji opierały się elementy regulacyjne, tzn. potencjometry i trymery.

Stosowane są oczywiście ich przeróżne krzemowe substytuty, jednakże w wielu aplikacjach niezbędny jest zwykły potencjometr. Gdyby tak jeszcze nie trzeszczał...



Konieczność zwiększenia niezawodności elementów regulacyjnych zmusiła projektantów podzespołów do podjęcia trudu zbudowania potencjometrów półprzewodnikowych. Pierwotnie znalazły one zastosowanie w sprzęcie profesjonalnym - jedną z pierwszych „poważnych” aplikacji wykorzystujących tego typu elementy były komputery analogowe wykorzystywane podczas lotów promu kosmicznego Columbia. Jak to zwykle bywa, technika kosmiczna szybko trafiła pod strzechy - potencjometry półprzewodnikowe można bez większego trudu kupić także u krajowych dystrybutorów elementów.

W artykule skupimy się na przedstawieniu układów produkowanych przez firmy Dallas, Xicor i National Semiconductor.

Jak działa potencjometr półprzewodnikowy?

Budowa potencjometru półprzewodnikowego jest niezwykle prosta, składa się on z następujących bloków podstawowych (rys.1):

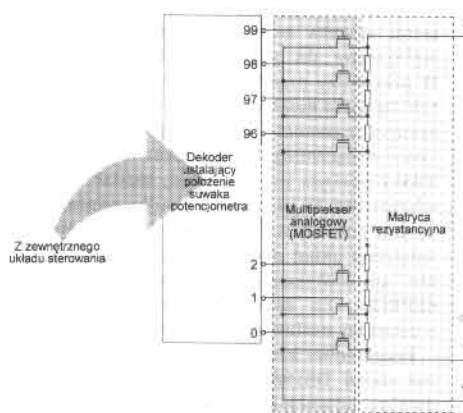
- matrycy rezystancyjnej, składającej się z łańcucha szeregowo połączonych rezystorów wykonanych w strukturze krzemowej. Ich ilość, a także stosunek rezystancji wzajemnej jest zależny od przewidywanego zastosowania danego typu potencjometru. Na ogół dostępne są potencjometry o charakterystyce liniowej (wszystkie rezystory mają jednakową wartość rezystancji) i logarytmicznej (stosunek wartości rezystancji sąsiednich rezystorów jest logarytmiczny). Ilość rezystorów w matrycy jest zależna od rozdzielczości nastawy założonej przez producenta. Dostępne w chwili obecnej potencjometry mają w swoim wnętrzu od 32 do 256 rezystorów.
- multiplexera analogowego, wykonanego

w technice unipolarnej. W zależności od technologii produkcji multiplexer może się składać z prostych jednor tranzystorowych kluczy dwukierunkowych, w nowszych opracowaniach stosuje się nieco bardziej złożone analogowe bramki transmisyjne, zbliżone budową do popularnych kluczy 4066. Ilość wejść multiplexera zależy od ilości zastosowanych w potencjometrze rezystorów.

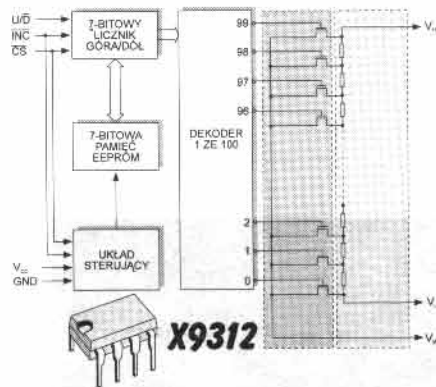
- dekodera sterującego załączaniem kluczy analogowych. Ilość wyjść dekodera zależy od rozdzielczości potencjometra.

Wszystkie opisane dotychczas bloki z punktu widzenia użytkownika są równoważne standardowemu potencjometrowi o trzech końcówkach: H (wejściowej), L (dla potencjału odniesienia) oraz W (spełniającej rolę suwaka). Jedyną istotną różnicą pomiędzy potencjometrem mechanicznym a półprzewodnikowym jest nieco większa ziarnistość możliwych nastaw. Twierdzenie, że jest ona tylko „nieco większa” może wydawać się zbyt optymistyczne - przecież suwak potencjometra mechanicznego może przyjąć nieskończenie wiele położeń, a w przypadku potencjometra elektronicznego ich ilość jest z góry ustalona! Praktyka pokazuje jednak, że ze względu na niedoskonałości konstrukcji mechanicznej oraz jej podatności na zużycie i wpływy środowiska powodują ograniczenie ilości realnie używanych położeń do 100..300 w zależności od jakości wykonania potencjometru. Przytaczane wyniki zostały zamieszczone w biuletynie „Questions & Answers 4/96” firmy Spectrol. Tak więc okazuje się, że potencjometry półprzewodnikowe składające się z 64, 100 lub 256 rezystorów mogą w pełni zastąpić potencjometry mechaniczne, gwarantując przy tym znacznie lepsze parametry długoczasowe i odporność na udary środowiskowe.

Na rys.1 pominięto dość ważny moduł po-



Rys. 1.



Rys. 2.

tencjometra półprzewodnikowego. Jest to moduł wejściowy (interfejsu), który odpowiada za odebranie z otoczenia informacji o żądanym położeniu suwaka i przekazanie go do układu dekodującego. Producenci stosują następujące układy interfejsów:

- szeregowy, które umożliwiają przekazywanie informacji w formacie Microwire, I2C lub niestandardowo po trzech lub czterech liniach cyfrowych,
- interfejsy przystosowane do inteligentnej współpracy z przyciskami chwilowymi. Są to niezwykle rozbudowane układy logiczne, które zapewniają odporność układu przełączającego na drgania styków przełączników i umożliwiają dostosowanie charakterystyki czasowej zmiany położenia suwaka potencjometru do czasu wciśnięcia przycisku. Dzięki temu krótkotrwałe, jednorazowe naciśnięcie przycisku powoduje przesunięcie suwaka w górę lub w dół o jedną pozycję, a dłuższe przytrzymanie powoduje jego szybko przesunięcie do momentu puszczenia przycisku.

Potencjometry firmy Dallas, które są wyposażone w interfejs współpracujący z klawiaturą, umożliwiają także dokonywanie regulacji przy pomocy jednego tylko przycisku. Zagadnienie to omówimy w dalszej części artykułu.

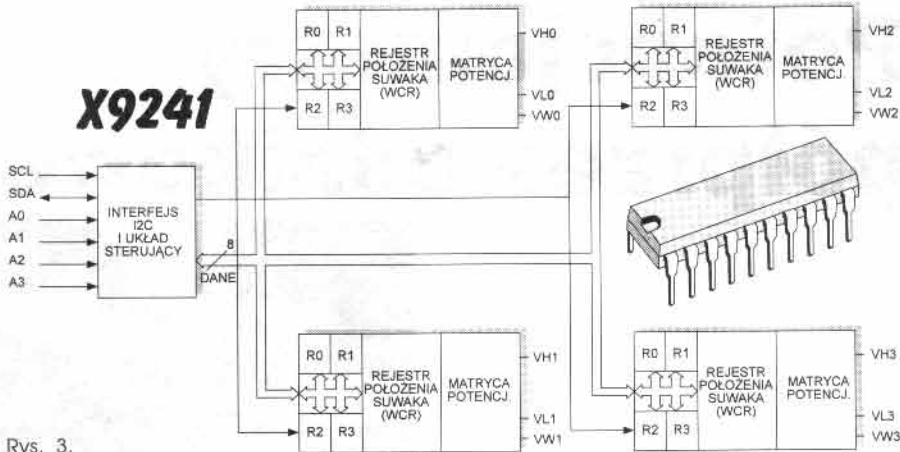
Uważni Czytelnicy zadadzą teraz zapewne pytanie - co się stanie, jeżeli po kilkugodzinnej pracy urządzenia i precyzyjnym ustaleniu jego parametrów przy pomocy potencjometrów półprzewodnikowych wyłączymy zasilanie? Odpowiedź jest prosta - w strategicznych miejscach urządzenia należy stosować potencjometry z wewnętrzną pamięcią EEPROM! Są to pamięci, do których można dokonać 50.000...100.000 wpisów, a czas pamiętania danych nie jest krótszy niż 10 lat. Procedura zapisania pamięci EEPROM jest niewidoczna dla użytkownika, ponieważ realizują ją wewnętrzne moduły potencjometru.

Teraz nieco miejsca poświęcimy omówieniu rozwiązań oferowanych przez różnych producentów podzespołów. Każdy z nich ma na polskim rynku swojego przedstawiciela handlowego, tak więc osoby zainteresowane zakupieniem tych podzespołów nie powinny mieć zbytniego kłopotu z ich zdobyciem.

Oferta rynku

Rozpoczniemy od prezentacji wybranych potencjometrów półprzewodnikowych rodziny E2POT, produkowanych mało jeszcze znaną na naszym rynku firmą Xicor.

Układ oznaczony X9312 (rys.2) jest liniowym, 100-pozycyjnym potencjometrem, sterowanym przez trójprzewodowy interfejs szere-



Rys. 3.

gowy. Jest on dość nietypowy - wejście !INC jest wejściem zegarowym wewnętrznego 7-bitowego licznika (pracuje on w trybie zliczania do 100), którego kierunek zliczania ustala poziom logiczny na wejściu U/!D. Licznik skonstruowano tak, że emuluje pracę oski potencjometru mechanicznego, tzn. po dojściu do skrajów zakresu (pozycja 0 lub 100) zatrzymuje się do momentu zmiany kierunku zliczania na przeciwny. Poziom logiczny „0” na wejściu !CS uaktywnia interfejs potencjometru, nie wywiera natomiast żadnego wpływu na pracę jego części analogowej. Wyprowadzenia VH, VL i VW są wyprowadzeniami analogowymi potencjometru.

Wpis aktualnego położenia suwaka potencjometru (czyli stanu licznika) do pamięci EEPROM odbywa się na dwa sposoby - automatycznie po wykryciu przez wewnętrzny układ nadzorujący napięcie zasilania jego spadek, wskazujący na wyłączenie zasilania całego urządzenia lub poprzez odpowiednią kombinację sygnałów sterujących interfejsu (zmiana !CS z 0 na 1, przy !INC=1). Po włączeniu zasilania zawartość pamięci EEPROM jest automatycznie przepisywana do licznika.

Układ X9241 wykonany jest także w technologii E2POT firmy Xicor. W jego wnętrzu „zaszyto” cztery 64-pozycyjne potencjometry liniowe, programowane poprzez interfejs I2C. Na rys.3 przedstawiono wewnętrzną budowę tego układu.

O aktualnym położeniu wirtualnych suwaków potencjometrów decyduje zawartość rejestrów WCR (ang. Wiper Counter Register). Każdy z potencjometrów posiada swój WCR, a także po cztery rejestry pomocnicze EEPROM (R0..3), które służą do przechowywania najczęściej używanych nastaw. Każda komórka EEPROM może być zapisywana min. 100.000 razy.

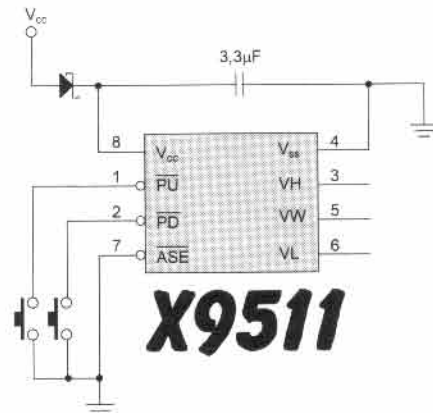
Dzięki zastosowaniu interfejsu I2C układ X9241 może być programowany (lista zawiera 9 poleceń), lecz niezbędny jest do tego celu mikrokontroler lub inteligentny programator. Dzięki zastosowaniu wewnętrznego dekodera rozkazów możliwy jest selektywny zapis wybranych rejestrów, zwiększanie lub zmniejszanie ich zawartości, a także szybkie zabicie informacji zapamiętanej w wybranym rejestrze EEPROM do WCR.

Konstrukcja obwodów analogowych układu X9241 pozwala na kaskadowe łączenie potencjometrów, dzięki czemu możliwe jest dobranie rezystancji do wymagań aplikacji.

Nieco inny rodzaj układu wejściowego zastosowano w układzie X9511. Jest to układ

nowej rodziny firmy Xicor, którą nazwano PushPot.

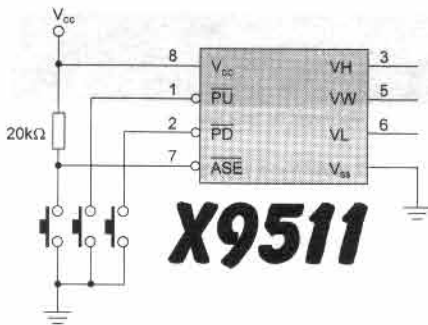
X9511 jest 32-stopniowym potencjometrem z wbudowaną pamięcią EEPROM i 5-bitowym licznikiem góra/dół. Licznik pracuje w trybie zliczania od 0..31 i po dojściu do stanu 0 lub 31 zatrzymuje zliczanie do momentu zmiany jego kierunku. Układ wejściowy, który współpracuje z zewnętrznymi przyciskami zapewnia zlikwidowanie wpływu zakłóceń impulsowych na pracę licznika, a także inteligentną obsługę przycisku. Po jednokrotnym naciśnięciu przycisku dołączonego do wejścia !PU lub !PD (rys.4) położenie suwaka potencjometru zmienia się o jeden w górę lub dół. Jeżeli przycisk zostanie przytrzymany suwak jest automatycznie przesuwany z małą częstotliwością powtarzania powoli, a po ok. 1 sek szybkość jego „ruchu” zostaje zwiększona.



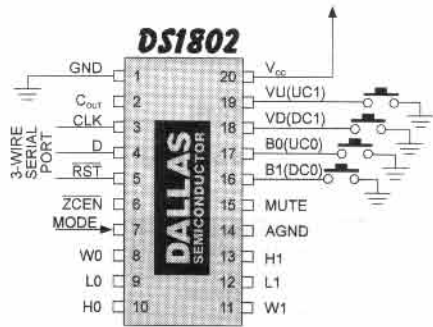
Rys. 4.

W przypadku podłączenia wejścia !AST do masy (jak na rys.4) po każdej zmianie położenia suwaka zawartość jest automatycznie wpisywana do pamięci EEPROM licznika. W przypadku przedstawionym na rys.5 zawartość licznika można zapisać w dowolnie wybranym momencie, poprzez naciśnięcie przycisku dołączonego do wejścia !AST. Układ X9511 posiada jeszcze jedną, bardzo ciekawą właściwość. W przypadku spadku napięcia zasilania poniżej wartości określonej przez wewnętrzny układ nadzorczy zawartość licznika jest automatycznie wpisywana do pamięci EEPROM, co zapobiega utracie informacji o ostatniej nastawie po wyłączeniu zasilania.

Przykładem bardzo ciekawego opracowania jest układ DS1802 firmy Dallas. Jest to podwójny potencjometr logarytmiczny, opracowany z myślą o zastosowaniach w sprzęcie au-

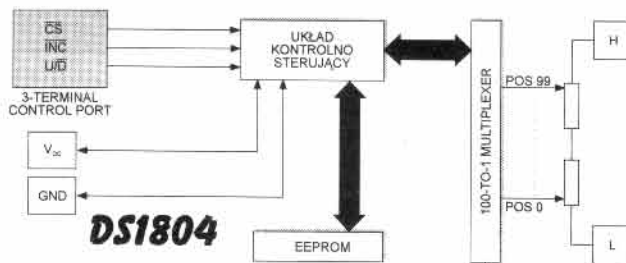


Rys. 5.

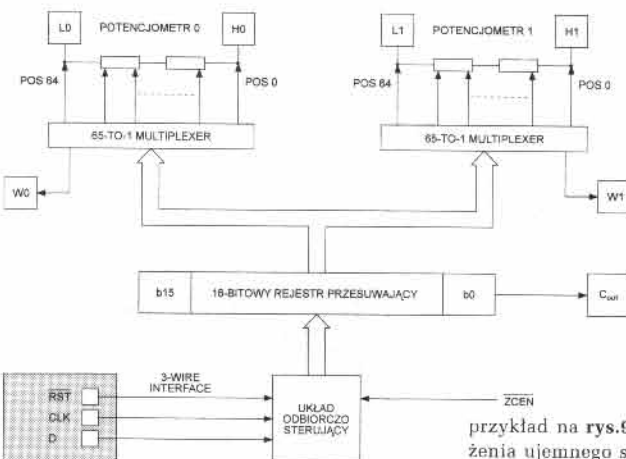


Rys. 6.

dio wysokiej klasy. Może on być sterowany poprzez trójprzewodową szynę danych lub przy pomocy klawiatury (rys.6). We wnętrzu układu znajdują się dwa 64-pozycyjne potencjometry logarymiczne, które można sterować niezależnie od siebie przy pomocy przycisków góra/dół (tryb pracy mono) lub w sposób zależny (tryb stereo) - góra/dół i lewo/prawo. Jest to więc idealny układ do stosowania w sprzęcie audio. We wnętrzu układu nie wbudowano pamięci EEPROM podtrzymującej na-



Rys. 7.



Rys. 8.

stawy potencjometrów. Układ ma za to wbudowany tłumik wyciszający sygnał wejściowy do poziomu -90dB, który jest uaktywniany każdorazowo po włączeniu zasilania.

Podobnie, jak w przypadku potencjometrów firmy Xicor obsługa klawiszy sterujących jest inteligentna, tzn. likwidowane są skutki drgań styków przełączników, a po dłuższym przytrzymaniu zwiększana jest szybkość „przesuwania” suwaka.

Układ DS1804 jest idealnym kandydatem do zastąpienia miniaturowych potencjometrów dostrojczych. Ustalenie położenia suwaka odbywa się poprzez trzyliniowy port szeregowy. Każda zmiana położenia suwaka zapamiętywana jest w wewnętrznej pamięci EEPROM, co pozwala na precyzyjne i niezależne od warunków zasilania dobranie punktu regulacyjnego.

Budowę układu DS1804 przedstawiono na rys.7.

Układ DS1801 jest także wyposażony w trójprzewodowy interfejs szeregowy, jego konstrukcja jest jednak inna od dotychczas opisanych. Sterowanie pracą interfejsu możliwe jest dzięki sygnałom !RST oraz CLK i DATA (rys.8). Sygnał zegarowy na wejściu CLK powoduje synchroniczne wpisywanie danych z wejścia D do wewnętrznej pamięci rejestru o długości 16 bitów. Dzięki wyjściu szeregowemu COUT możliwe jest łączenie kaskadowe wielu układów DS1801 (a także potencjometrów elektronicznych innego typu).

Obsługa tego interfejsu jest zbliżona do standardu Microwire.

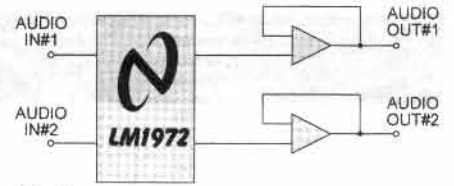
Układy μ POT firmy National Semiconductor charakteryzuje nieco inny sposób działania, zbliżony bardziej do programowanych dzielników napięcia, niż do klasycznych potencjometrów. Z punktu widzenia użytkownika nie ma to specjalnego znaczenia, ponieważ

są one opracowane z myślą o zastosowaniach w sprzęcie audio, jako cyfrowo ustawiane regulatory poziomu sygnału.

W skład rodziny μ POT wchodzi trzy układy:

- LM1971 - pojedynczy regulator poziomu o maksymalnym poziomie tłumienia 62dB i możliwości całkowitego stłumienia sygnału (100dB),
- LM1972 - podwójny regulator poziomu o maksymalnym poziomie tłumienia 78dB i możliwości całkowitego stłumienia sygnału (100dB),
- LM1973 - potrójny regulator poziomu o maksymalnym poziomie tłumienia 76dB i możliwości całkowitego stłumienia sygnału (100dB).

Są to układy wyposażone w trójprzewodowy interfejs szeregowy. Można je stosować jak zwykle potencjometry ustalające poziom na wejściu wzmacniacza - przykład na rys.9 lub włączyć w układ sprzężenia ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego (rys.10). Otrzymujemy w ten sposób wzmacniacz o wzmacnieniu re-

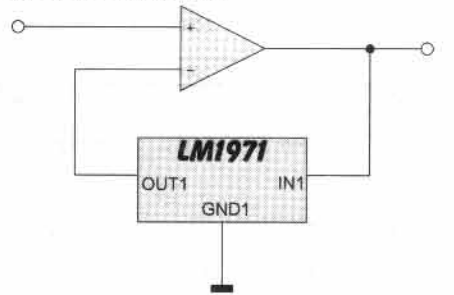


Rys. 9.

gulowanym zgodnie z charakterystyką logarymiczną.

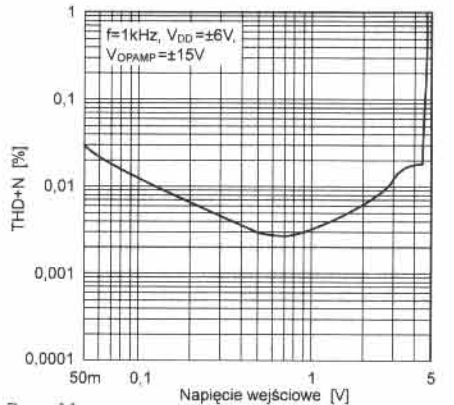
Parametry potencjometrów półprzewodnikowych

Ponieważ potencjometry półprzewodnikowe są dość złożonymi podzespołami elektronicznymi podczas projektowania układu, w którym zostały one wykorzystane, należy zwracać sobie sprawę z ograniczeń stawianych przez ich konstrukcję.

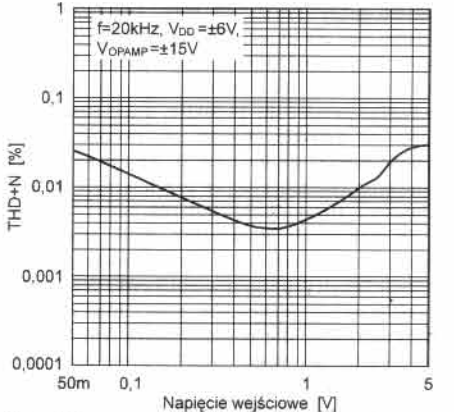


Rys. 10.

Po pierwsze potencjometry elektroniczne wprowadzają do przeniesionego sygnału zniekształcenia. Zniekształcenia te są naturalną konsekwencją przepływu prądu przez półprzewodnik, jak jednak pokazują rys.11 i rys.12 ich poziom nie jest wysoki. Przedstawione



Rys. 11.



Rys. 12.

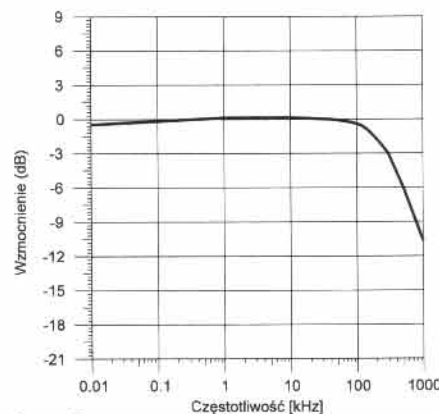
Typ	Producent	Struktura wewnętrzna (ilość pot./rozdzielczość)	Rezystancja	Interfejs	Zasilanie [V]	Wyposażenie dodatkowe
DS1267	Dallas	2/256	Liniiowy 10kΩ/50kΩ/100kΩ	SERIAL 3L	5	Możliwość łączenia kaskadowego
DS1666	Dallas	1/128	Logarytmiczny 10kΩ/50kΩ/100kΩ	Klawiatura UP/DOWN	5V lub ±5V	
DS1667	Dallas	2/256	Liniiowy 10kΩ/50kΩ/100kΩ	SERIAL 3L	5V lub ±5V	2 wzmacniacze operacyjne, możliwość łączenia kaskadowego
DS1669	Dallas	1/64	Liniiowy 10kΩ/50kΩ/100kΩ	Klawiatura UP/DOWN	4.5..8V	EEPROM
DS1800	Dallas	2/128	Logarytmiczny 45kΩ	SERIAL 3L, klawiatura UP/DOWN	2.7..5.5V	Przystosowany do pracy w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniaczy operacyjnych
DS1801	Dallas	2/64	Logarytmiczny 45kΩ	SERIAL 3L	3..5V	Możliwość łączenia kaskadowego
DS1802	Dallas	2/64	Logarytmiczny 45kΩ	SERIAL 3L, klawiatura UP/DOWN oraz LEFT/RIGHT	2.7..5.5V	Możliwość łączenia kaskadowego
DS1803	Dallas	2/256	Logarytmiczny 10kΩ/50kΩ/100kΩ	I2C	3..5V	
DS1804	Dallas	1/100	Liniiowy 10kΩ/50kΩ/100kΩ	Klawiatura UP/DOWN	2.7..5.5V	EEPROM
DS1806	Dallas	6/64	Liniiowy 10kΩ/50kΩ/100kΩ	SERIAL 3L	2.7..5.5V	Możliwość łączenia kaskadowego
DS1807	Dallas	2/64	Logarytmiczny 45kΩ	I2C	3..5V	
DS1866	Dallas	1/8	Logarytmiczny 10kΩ	3-bitowy port równoległy	2.7..5.5V	Tłumik 0..35dB (co 5 dB)
DS1867	Dallas	Jak DS1267				EEPROM
DS1868	Dallas	2/256	Liniiowy 10kΩ/50kΩ/100kΩ	SERIAL 3L	4.5..5.5V	Możliwość łączenia szeregowego potencjometrów
DS1869	Dallas	1/64	Liniiowy 10kΩ/50kΩ/100kΩ	Klawiatura UP/DOWN	2.7..8.0V	EEPROM
X9221	Xicor	2/64	Liniiowy 2kΩ/10kΩ/50kΩ	I2C	5V	Każdy potencjometr wyposażono w cztery rejestry nastaw (EEPROM)
X9241	Xicor	4/64	Liniiowy	I2C	5V	Każdy potencjometr wyposażono w cztery rejestry nastaw (EEPROM), potencjometry mają różne rezystancje w zależności od wersji układu
X9312	Xicor	1/100	Liniiowy 1kΩ/10kΩ/50kΩ/100kΩ	Klawiatura UP/DOWN	5V	Potencjometr może być zasilany napięciem 0..15V, EEPROM
X9313	Xicor	1/32	Liniiowy 1kΩ/10kΩ	Klawiatura UP/DOWN	3..5V	Potencjometr może być zasilany napięciem -5..+5V, EEPROM
X9314	Xicor	1/32	Logarytmiczny 10kΩ	Klawiatura UP/DOWN	3..5.5V	Potencjometr może być zasilany napięciem -5..+5V, EEPROM
X9C102..4 oraz X9C503	Xicor	1/100	Liniiowy	Klawiatura UP/DOWN	3..5.5V	Potencjometr może być zasilany napięciem -5..+5V
X9511	Xicor	1/32	Liniiowy 1kΩ/10kΩ	Klawiatura UP/DOWN	5V	Potencjometr może być zasilany napięciem -5..+5V, EEPROM
LM1971	NS	1/64	Logarytmiczny	SERIAL 3L		Narzucona kierunkowość wyprowadzeń potencjometru, pasmo 20kHz
LM1972	NS	2/157	Logarytmiczny	SERIAL 3L	4.5..12V	Narzucona kierunkowość wyprowadzeń potencjometru, pasmo 100kHz
LM1973	NS	3/157	Logarytmiczny	SERIAL 3L	4.5..12V	Narzucona kierunkowość wyprowadzeń potencjometru, pasmo 100kHz

charakterystyki uwzględniają sumaryczne zniekształcenia potencjometru (LM1971) i wzmacniacza wyjściowego (w układzie wtórnik napięciowego LMC6041) dla dwóch różnych częstotliwości. Firma Dallas podaje, że potencjometry półprzewodnikowe opracowane do zastosowań audio wprowadzają zniekształcenia o poziomie poniżej 0.002%.

Druga rzecz na którą należy zwrócić uwagę to pasmo przenoszenia potencjometru. Jest ono silnie zależne od wartości rezystancji sumarycznej potencjometru, tzn. im większą ma ona wartość, tym silniej jest „obcięte” pasmo przenoszenia od góry. Dla przykładu pasmo 3dB dla układu DS1802 wynosi 700kHz, przy rezystancji 45kΩ. Potencjometr DS1666 o rezystancji 10kΩ może przenosić sygnały o częstotliwości do 1100kHz, przy 50kΩ sygnały do 200kHz, a przy rezystancji 100kΩ pasmo zawęża się do 100kHz. Na rys.13 przedstawiono charakterystykę przenoszenia potencjometru firmy Xicor X9C103.

W niektórych aplikacjach duże znaczenie może mieć dokładność nastaw oferowana przez potencjometry półprzewodnikowe. Na rys.14 przedstawiono wykres obrazujący błąd względny i całkowity dla potencjometru X9C102 firmy Xicor. Jak widać błąd bezwzględny jest stosunkowo niewielki - poniżej 2%. Deklarowany przez National Semiconductor i Dallas

poziom tego błędu nie przekracza 0.5LSB, a błędu względnego 1LSB, co można uznać za wartość dość przyzwoitą. Jeżeli rozpatrujemy niedokładności rezystorów wchodzących w skład potencjometrów elektronicznych nie wolno nam pominąć negatywnego wpływu temperatury na stabilność rezystancji. O ile w aplikacjach audio nie ma ona specjalnego znaczenia, to w wielu innych sytuacjach zjawisko to może uniemożliwić wręcz działanie układu. W przypadku układów firmy Dallas współczynnik niestabilności termicznej wynosi od 650 do ±800ppm. Firma Xicor w ukła-

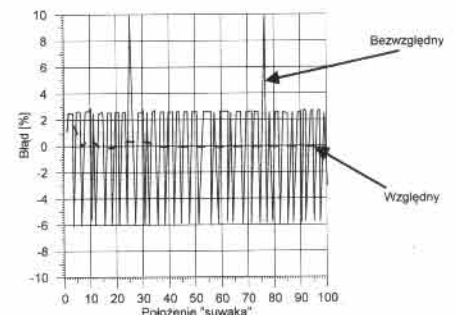


Rys. 13.

dach X9C103/104/503 osiągnęła znacznie niższą wartość tego współczynnika - zaledwie +300ppm. Jest to wprawdzie znacznie więcej niż w przypadku standardowych, dobrej jakości, potencjometrów mechanicznych, lecz jak pokazuje praktyka błędy i niestabilność temperaturą wprowadzaną przez potencjometry półprzewodnikowe można zminimalizować poprzez odpowiednie zaprojektowanie układu.

W kolejnym numerze EP przedstawimy opis konstrukcji wzmacniacza audio, w którym wykorzystany został potencjometr DS1802 firmy Dallas - Czytelnikom zainteresowanym tą konstrukcją gorąco polecamy ten artykuł!

Piotr Zbysiński, AVT



Rys. 14.