

Cyfrowa nagrywarka dźwięku

Próbkowanie sygnału

Zagadnienia związane z cyfrowym przetwarzaniem sygnałów są coraz częściej omawiane na łamach „Elektroniki Praktycznej”. Jak się okazuje, nie trzeba być od razu specjalistą od procesorów DSP, żeby móc zmierzyć się z tą tematyką. Na razie oswajamy z nią Czytelników, przedstawiając projekty, w których wykorzystuje się próbkowanie i obróbkę cyfrową sygnału.

Rekomendacje: duże walory edukacyjne w połączeniu z użytkowymi powinny być zachętą do zainteresowania się projektem nagrywarki. Zachęcamy do tego nie tylko zaawansowanych elektroników.

W dobie dostępności układów nagrywająco-odtwarzających rodziny ISD, budowanie z dostępnych elementów podobnego urządzenia może wydać się nieekonomiczne. Z pewnością jakaś racja w tym jest, ale wykonanie od podstaw cyfrowej nagrywarki dźwięku warto polecić nawet niezbyt zaawansowanym elektronikom ze względu na duże walory edukacyjne takiego przedsięwzięcia. Najważniejszym celem podczas prac będzie zaznajomienie się z aspektami przetwarzania cyfrowego sygnałów analogowych. Zadanie będzie uproszczone do minimum i ograniczy się do praktycznej realizacji procesu próbkowania sygnału akustycznego i jego późniejszego odtwarzania. Do tego

celu nie będą potrzebne procesory DSP czy nawet szybkie mikrokontrolery. Wystarczą znane już od wielu lat i cieszące się dużą popularnością mikrokontrolery AVR. Zawarte w nich peryferia takie jak przetwornik A/C i generator PWM pracujący w roli przetwornika C/A, wystarczą do realizacji cyfrowej nagrywarki dźwięku. Dźwięk w postaci próbek będzie zachowywany w nieulotnej pamięci typu DataFlash, która charakteryzuje się dość dużą pojemnością (kilkanaście MB). Parametry pamięci próbkowania umożliwią zapamiętanie sygnału analogowego o czasie trwania do kilkunastu minut.

Projekt został tak opracowany, aby Czytelnik miał możliwość eksperymentowania

AVT-5167 w ofercie AVT:
 AVT-5167A – płytka drukowana
 AVT-5167B – płytka drukowana + elementy

- Podstawowe informacje:**
- Płytko o wymiarach 83×47 mm
 - Zasilanie 8...15 V
 - Próbkowanie sygnału analogowego z częstotliwością około 8 kHz
 - Rozdzielczość 8 bitów
 - Pasma sygnału analogowego około 4 kHz
 - Czas nagrywania sygnału analogowego max. 4 min. (pamięć AT45DB161)
 - Funkcje: kasowanie pamięci, nagrywanie, odtwarzanie
 - Sygnalizacja pracy nagrywarki diodą LED
 - Wbudowany mikrofon i głośnik

Dodatkowe materiały na CD i FTP:
 host: ep.com.pl, user: 12235, pass: 60u61csy

- wzory płytek PCB
- program
- karty katalogowe i noty aplikacyjne elementów oznaczonych na Wykazie Elementów kolorem czerwonym

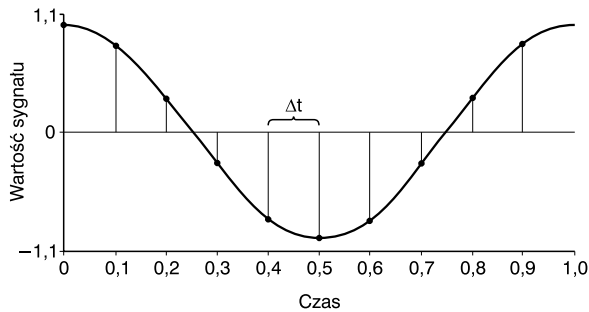
Projekty pokrewne na CD i FTP:
 (wymienione artykuły są w całości dostępne na CD)

- AVT-1305 Cyfrowa nagrywarka audio (EP5/2001)
- AVT-2045 Pozytywka – ISDofon (EdW11/1997)
- AVT-487 Nagrywarka dla układów ISD2500 (EP1/1999)
- AVT-1700 Magnetofon cyfrowy z układem ISD17xx (EP12/2008)

z układem nagrywarki. Przez modyfikacje programu sterującego można wpływać na częstotliwość próbkowania, a także na kilka innych parametrów mających wpływ na jakość i czas nagrywania sygnału analogowego. Można również wziąć pod uwagę zastosowanie kart pamięciowych typu SD lub MMC zamiast pamięci DataFlash. Tego typu karty mają aktualnie pojemności do kilkunastu GB, co daje możliwość zarejestrowania nawet kilkudziesięciu godzin dźwięku. Prezentowaną nagrywarkę można również zastosować we własnych aplikacjach, w których wymagane jest nagrywanie dźwięków o długim czasie trwania, a nie ma możliwości użycia do tego celu komputera. Przykładem może być nagrywarka rozmów telefonicznych.

Próbkowanie i odtwarzanie sygnału

Próbkowanie sygnałów analogowych opiera się na **twierdzeniu Shannona**, które mówi o tym, jak często powinniśmy mierzyć sygnał zmienny w czasie, jeśli chcemy go odtworzyć z jego cyfrowych próbek. Twierdzenie to jest rozwinięciem **twierdzenia Nyquista**, które



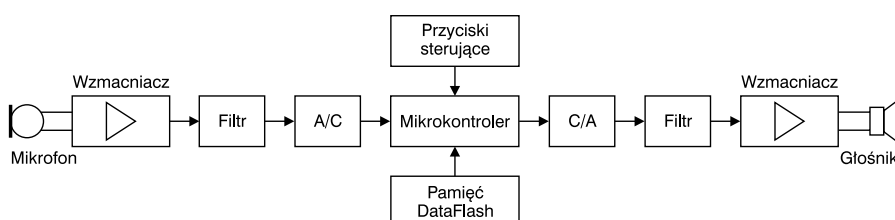
Rys. 1. Próbkowanie sygnału analogowego

mówi, że częstotliwość próbkowania musi być co najmniej dwukrotnie większa od największej częstotliwości składowej. Do próbkowania sygnałów analogowych używa się przetwornika A/C, którego sygnał wyjściowy jest ciągiem wartości cyfrowych. Na rys. 1 pokazano sposób próbkowania sygnału analogowego. Za częstotliwość próbkowania uznaje się liczbę próbek na sekundę. Czas Δt jest odstępem próbkowania – czasem pomiędzy kolejnymi próbkami. W technice analogowej sygnał ma pewną wartość w danym momencie. Próbkowanie dokonuje się poprzez przybliżenia wartości czasu za pomocą pewnej liczby próbek – punktów w czasie. Zazwyczaj odległość w czasie pomiędzy punktami próbkowania (Δt) jest taka sama. Z próbkowaniem wiąże się kwantyzacja, która odpowiada za przetwarzanie sygnału analogowego co do jego wartości, czyli wartości próbki. Można przyjąć, że **kwantyzacja** to podział poziomu wartości sygnału ciągłego na pewne przedziały, których liczba będzie zależała od rozdzielczości przetwornika A/C. Jeśli chcemy próbować sygnał o paśmie do 4 kHz, częstotliwość próbkowania zgodnie z twierdzeniem Nyquista musi wynosić co najmniej dwa razy więcej, czyli 8 kHz. Próbkowanie sygnału ze zbyt niską częstotliwością prowadzi do mylnej interpretacji częstotliwości sygnału odtworzonego – interpretujemy ją jako niższą niż rzeczywista. Zjawisko to, zwane **aliasingiem**, zostało przedstawione na rys. 2. Aby mu zapobiec, sygnał przed próbkowaniem powinien być odfiltrowany filtrem dolnoprzepustowym, który usunie z sygnału częstotliwości leżące powyżej próbkowanego pasma (w tym przypadku powyżej 4 kHz). Przez ograniczenie pasma sygnału można zapobiec aliasingowi lub zminimalizować jego wpływ. Z tego powodu wspomniany wyżej filtr nazywany jest **filtrem antyaliasingowym**. Uzyskane próbki sygnału analogowego można poddać różnym obliczeniom matematycznym. Przykładem może być cyfrowa (programowa)

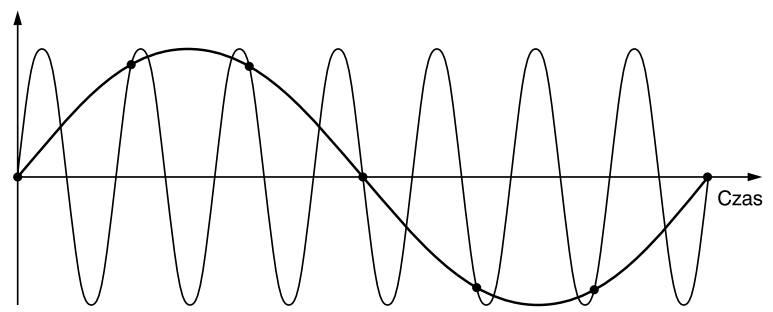
realizacja kompresji sygnału. W przypadku nagrywarki dźwięku uzyskane próbki są wprost zapisywane do nieulotnej pamięci DataFlash. W celu odtworzenia zapisanego sygnału cyfrowego, czyli jego konwersji na postać analogową, wykorzystuje się przetworniki C/A z dodatkowym wyjściowym filtrem wygładzającym, który również jest filtrem dolnoprzepustowym. Ponieważ mikrokontrolery AVR nie mają przetworników C/A, w cyfrowej nagrywarce tego typu przetwornik zbudowano w oparciu o generator sygnału PWM. Sygnał wyjściowy z generatora PWM jest uśredniany w wyjściowym filtrze dolnoprzepustowym, którego częstotliwość graniczna powinna być równa maksymalnej częstotliwości przyjętego pasma (4 kHz w przypadku opisywanej nagrywarki). Tego typu filtr odcina również składowe przetwarzania C/A o wyższych częstotliwościach, w tym również częstotliwość sygnału PWM. Częstotliwość ta powinna być większa od pasma sygnału próbkowanego. Uzyskany w ten sposób sygnał analogowy można wzmocnić i odtworzyć w głośniku. Podawanie do wejścia przetwornika C/A próbek powinno zachodzić z częstotliwością próbkowania sygnału wejściowego. Zmiana tego czasu będzie powodować w przypadku nagrywarki dźwięków szybsze lub wolniejsze odtwarzanie nagranych dźwięków.

Opis działania układu

Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy cyfrowej nagrywarki. Podczas nagrywania sygnał analogowy z mikrofonu po wzmocnieniu podawany jest na dolnoprzepustowy filtr antyaliasingowy, który odcina składowe powyżej częstotliwości 4 kHz. Dopiero sygnał z wyjścia tego filtru jest próbkowany za pomocą 10-bitowego przetwornika A/C zawartego w mikrokontrolerze. Wartość z przetwornika jest jednak konwertowana do postaci 8-bitowej. Częstotliwość próbkowania przez przetwornik A/C jest bliska 8 kHz,



Rys. 3. Schemat blokowy cyfrowej nagrywarki dźwięków



Rys. 2. Aliasing

Wykaz elementów

Rezystory:

R1, R2, R3, R12, R14: 10 kΩ
R4, R5, R6, R13: 1 kΩ
R7: 12 kΩ
R8: 470 Ω
R9, R10: 11 kΩ
R11: 34 kΩ

Kondensatory:

C1, C3, C10, C11: 100 nF MKT
C2, C4, C15: 100 μF/25 V
C5, C6: 22 pF
C7: 22 μF/16 V
C8: 1 μF MKT
C9, C13: 4,7 nF MKT
C12: 470 pF
C14: 470 nF MKT
C16: 680 pF
C17: 220 nF MKT
C18: 220 μF/25 V

Półprzewodniki:

U1: ATmega8 (DIP-28)
U2: AT45DB161B SO-28
U3: LM358
U4: TBA820M
U5: 7805 TO-220
X1: Kwarc 8 MHz
D1: 1N4007
D2: LED 5 mm red
D3, D4, D5: 1N4148

Inne:

M1: Mikrofon elektretowy
S1...S3: Przycisk typu microswitch
L1: Dławik 10 μH
G1: Głośnik 8 Ω

czyli jest to częstotliwość dwa razy większa niż pasmo próbkowanego sygnału analogowego. Mikrokontroler zapisuje zgromadzone próbki do pamięci nieulotnej typu DataFlash. Podczas odtwarzania próbki są odczytywane z tej pamięci z częstotliwością próbkowania

R E K L A M A

STM32 FanClub

Pierwszy na świecie motyl z STM32

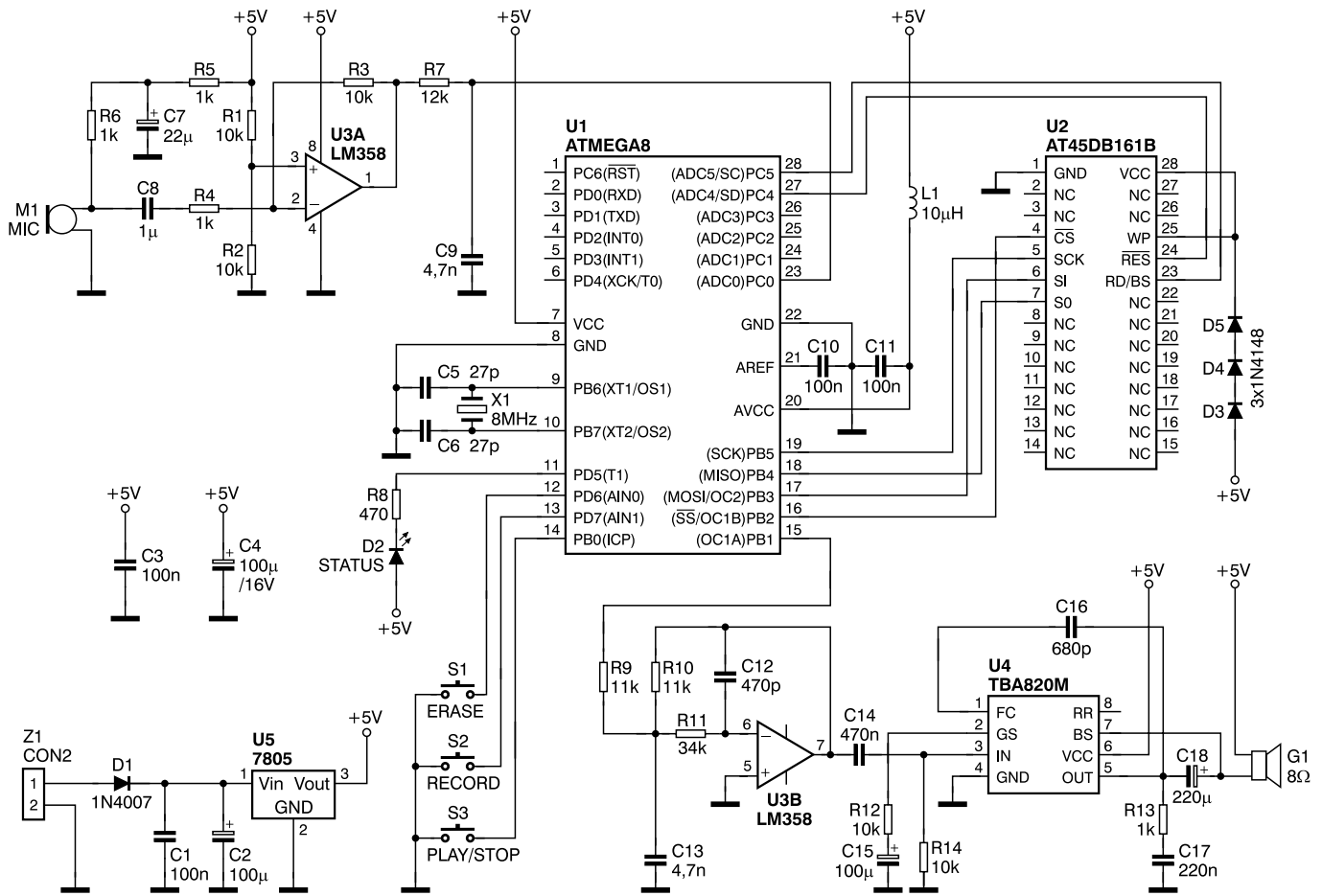


STM32Butterfly

Dostępny m.in. w
KAMAMI
www.kamami.pl

ST STM32





Rys. 4. Schemat ideowy nagrywarki

8 kHz i przesyłane do przetwornika C/A. Jak już wiemy, funkcję tę realizuje generator PWM wraz z filtrem wyjściowym. Po wzmacnieniu sygnału z przetwornika można go odsłuchać w głośniku. Mikrokontroler dodatkowo obsługuje przyciski sterujące pracą nagrywarki, której schemat ideowy przedstawiono na rys. 4. Sygnał z mikrofonu M1, polaryzowany przez elementy R5, R6 i C7, podawany jest na wzmacniacz odwracający U3A, którego wzmacnienie wynosi 10. Rezystory R1, R2 tworzą sztuczną masę, której napięcie jest równe połowie napięcia zasilającego, czyli 2,5 V. Elementy R7, C9 tworzą filtr ograniczający pasmo sygnału analogowego, z którego sygnał podawany jest na wejście przetwornika A/C (ADC0) mikrokontrolera. Elementy L1, C10 i C11 filtrują napięcie zasilające przetwornik A/C i jego napięcie referencyjne równe napięciu zasilania mikrokontrolera, czyli 5 V. Wyjściem generatora PWM jest linia OC1A, z której przebieg podawany jest na aktywny filtr uśredniający zbudowany w oparciu o wzmacniacz U3B. Jest to aktywny, dolnoprzepustowy filtr z wielokrotnym sprzężeniem zwrotnym. Generator PWM oraz dolnoprzepustowy filtr U3B tworzą przetwornik C/A o rozdzielczości równej rozdzielczości sygnału PWM, czyli 8-bitowej, gdyż do takiej rozdzielczości skonfigurowano PWM. Aktywny filtr uśredniający ma pasmo około 4 kHz, czyli takie samo, jak pasmo sygnału próbkowanego. Sygnał analogowy z wyjścia filtru uśred-

niającego jest wzmacniany we wzmacniaczu mocy U4 sterującym niewielkim głośnikiem 8 Ω. Wzmacniacz ma moc ok. 1,2 W. Kondensator C18 zapewnia brak składowej stałej na głośniku. Wzmacniacz U4 pracuje w typowej dla siebie aplikacji. Mikrokontroler AVR jest taktowany sygnałem o częstotliwości 8 MHz.

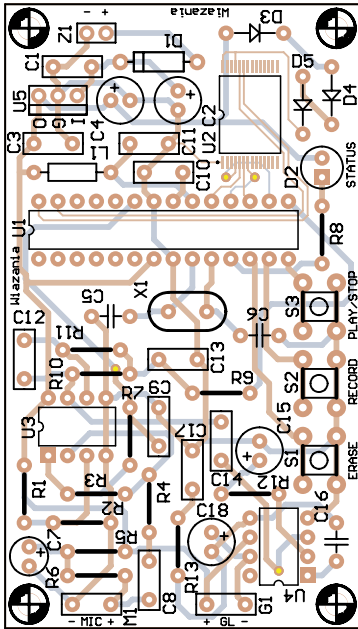
Komunikacja pomiędzy mikrokontrolerem a pamięcią DataFlash (U2) przebiega za pośrednictwem sprzętowego interfejsu SPI, w skład którego wchodzi linie SCK, MISO, MOSI oraz \CS. Linia \CS umożliwia uaktywnienie pamięci, linia \RES służy do zerowania pamięci, linia \WP może być wykorzystywana do blokowania zapisu, ale w nagrywarce została na stałe zwarta do plusa zasilania, dzięki czemu możliwe jest zapisanie całej pamięci. Linia wyjściowa RD/BS jest linią statusową. W nagrywarce jej stan sygnalizuje zakończenie wykonywania wewnętrznych operacji przez pamięć, takich jak odczyt strony, kasowanie itp. Ponieważ pamięć DataFlash musi być zasilana napięciem mniejszym niż 5 V, diody D3, D4, D5 obniżają to napięcie do bezpiecznej wartości 3 V. Do obsługi nagrywarki służą trzy przyciski: S1 (kasowanie), S2 (nagrywanie), S3 (odtwarzanie). Stan pracy nagrywarki jest sygnalizowany za pomocą diody LED D2. Nagrywarka jest zasilana napięciem 5 V stabilizowanym przez stabilizator U5. Dioda D1 zabezpiecza układ przed odwrotnym dołączeniem napięcia zasilającego. Kondensatory C1...C4 filtrują napięcia za-

silające układ, natomiast rezystor R8 ogranicza prąd diody LED do bezpiecznej wartości.

Montaż, uruchomienie i obsługa

Schemat montażowy cyfrowej nagrywarki pokazano na rys. 5. Montaż należy rozpocząć od wlutowania pamięci DataFlash – jedynego elementu w obudowie SMD typu SOIC. Ma ona spory rozstaw nóżek, więc nie powinno być problemów z jej przyłutowaniem. Montaż pozostałych elementów jest klasyczny, należy go rozpocząć od elementów najmniejszych. Po poprawnym zmontowaniu i zasileniu nagrywarki napięciem stałym 8...15 V powinna ona od razu działać poprawnie. Nie jest wymagane żadne strojenie.

Obsługa nagrywarki jest możliwa za pomocą trzech przycisków. Przycisk S1 kasuje całą pamięć. Sygnalizowane jest to szybkim miganiem diody LED. Przycisk S2 służy do uruchamiania nagrywania. Włączenie nagrywania jest sygnalizowane świeceniem diody LED. W dowolnym momencie można przerwać nagrywanie, ponownie naciskając przycisk S2. Kolejne jego naciśnięcie nie spowoduje nagrywania od początku, lecz od zakończonego miejsca. Aby możliwe było rozpoczęcie nagrywania od początku, należy przyciskiem S1 skasować pamięć. Nagrywanie kończy się, gdy zostanie wypełniona pamięć DataFlash. Naciśnięcie przycisku S3 włącza odtwarzanie, a zatrzymuje po ponownym jego naciśnięciu.



Rys. 5. Schemat montażowy

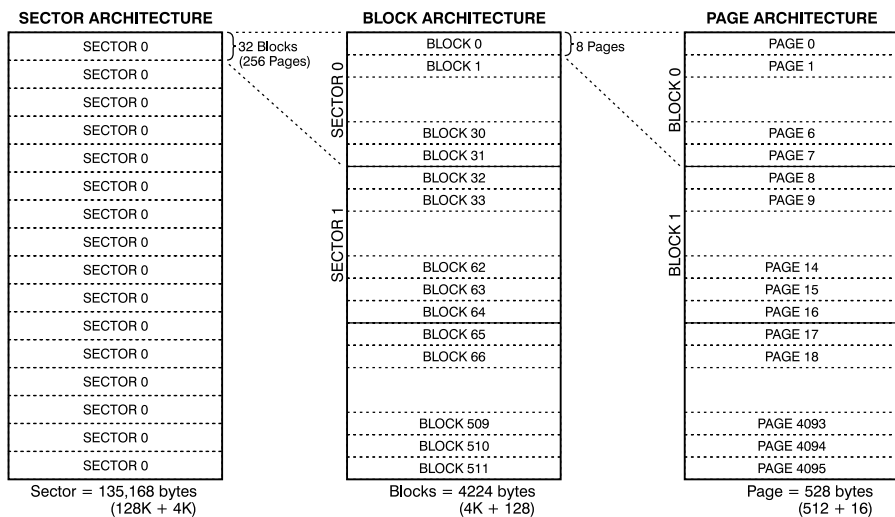
Odtwarzanie zawsze następuje od początku pamięci DataFlash. Oprócz zmian w programie sterującym nagrywarki, można również zmienić parametry kilku elementów w układzie nagrywarki. Przykładowo wzmocnienie sygnału z mikrofonu jest zależne od stosunku rezystorów R3 i R4. W celu zwiększenia wzmocnienia wystarczy zwiększyć wartość rezystora R3. Można również zmienić częstotliwość graniczną aktywnego filtra U3B. Będzie ona zależała od częstotliwości próbkowania sygnału. W tym przypadku warto skorzystać z dostępnych programów do projektowania aktywnych filtrów.

W nagrywarcie zastosowano pamięć AT45DB161 o pojemności 2 MB, co wystarcza na około 4 minuty, nagrania. Możliwe jest jednak zamontowanie większej pamięci

o pojemności np. 4 MB czy 8 MB. Wymiana pamięci będzie wymagać również niewielkich zmian w programie sterującym nagrywarką. Zamiast pamięci DataFlash można zastosować kartę pamięciową SD lub MMC. Zdobyte na drodze eksperymentów doświadczenia można wykorzystać w innych układach, jak choćby do przesyłania dźwięku drogą radiową.

Oprogramowanie sterujące nagrywarką

Oprogramowanie cyfrowej nagrywarki składa się z trzech głównych podprogramów, podprogramu kasowania pamięci, nagrywania oraz odtwarzania. W procedurze kasowania pamięci, wywoływanej przyciskiem S1, kasowana jest cała pamięć DataFlash. Komunikacja z pamięcią przebiega w trybie 3 z pierwszym bitem MSB. Na rys. 6 pokazano organizację wykorzystanej pamięci DataFlash. Dane są zapisywane na 4096 stronach, z których każda ma po 528 bajtów danych. 8 następujących po sobie stron tworzy blok danych. Bloków takich jest 512. Z kolei 32 bloki (czyli 256 strony) tworzą sektor. Dostępnych jest 16 sektorów. Dodatkowo pamięć ma dwa buforów po 528 bajtów (czyli każdy wielkości strony), które mogą służyć do szybkiego zapisu lub odczytu strony. W nagrywarcie jest wykorzystywany tylko jeden z dostępnych buforów. Komunikacja z pamięcią odbywa się za pomocą rozkazów. W podprogramie kasowania pamięci został wykorzystany rozkaz *Block Erase* (&H50), służący do kasowania bloku o podanym adresie. Aby skasować całą pamięć, rozkaz kasowania bloków należy wykonać 512 razy, gdyż tyle bloków zawiera pamięć. Parametrem rozkazu kasowania bloku jest adres kasowanego bloku składającego się z 9 bitów. Zajętość pamięci podczas wykonywania wewnętrznych operacji jest monitorowana za pomocą zewnętrznej linii RD/BS.



Rys. 6. Organizacja pamięci DataFlash AT45DB1361



Rys. 7. Przebiegi występujące podczas zapisu danych do bufora pamięci



www.wobit.com.pl



110 BYGH 601



SMC 139



ZN 300 M+TS200/48

www.silniki.pl

IDEALNE POŁĄCZENIE

Silnik krokowy
+
Sterownik
+
Zasilacz

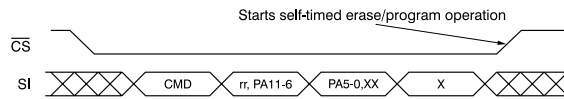


(061) 2912 225
(061) 8350 620

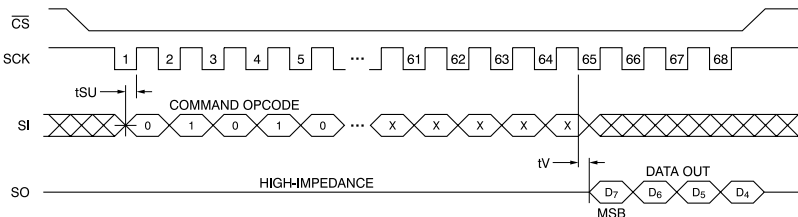


wobit@wobit.com.pl
www.wobit.com.pl

Nagrywanie wywoływane przyciskiem S2 trwa do zapelnienia pamięci lub wyłączenia nagrywania również przyciskiem S2. Otrzymywane próbki z 10-bitowego przetwornika A/C po konwersji do postaci 8-bitowej są zapisywane do bufora 1 pamięci DataFlash. Do zapisu danej do bufora 1 pamięci służy rozkaz *Buffer 1 Write* (&H84), którego parametrami są 10-bitowy adres pozycji w buforze 1 i zapisywana do niego dana. Na rys. 7 pokazano przebiegi zapisu danej do bufora pamięci. Jeśli cały bufor 1 zostanie zapelniony próbkami, jest on zapamiętywany w pamięci jako cała strona. Do zapisu bufora 1 do pamięci służy komenda *Buffer 1 to Main Memory Page Program without Built-in Erase* (&H88). Jest to komenda zapisu bufora pod wybrany adres strony, bez jej wcześniejszego kasowania. Adres strony w przypadku używanej pamięci jest 12-bitowy i może mieć wartości do 4096, gdyż tyle jest stron w pamięci. Na rys. 8 pokazano przebiegi zapisu bufora do zaadresowanej strony pamięci. Po zapisaniu bufora do pamięci, jest on ponownie zapelniany próbkami i zapisywany pod kolejny adres strony. Użycie do zapisu pamięci zawartego w niej bufora zwiększa szybkość zapisu danych. Zapis pojedynczej próbki do nieulotnej pamięci bez pośrednictwa bufora nie ma większego sensu, gdyż wymagany czas i tak będzie podobny do zapisu całego bufora. W procedurze odtwarzania, wywoływanej i zatrzymywanej przyciskiem S3, następuje odczyt próbek z pamięci i ich odtwo-



Rys. 8. Przebiegi występujące podczas zapisu bufora do zaadresowanej strony pamięci



Rys. 9. Przebiegi występujące podczas odczytu zaadresowanej strony do bufora 1

zenie w generatorze PWM (pracującym z rozdzielczością 8 bitów). W zależności od wartości próbek, będzie się zmieniało wypełnienie generowanego przebiegu PWM. Proces odtwarzania polega na odczytaniu danych z zaadresowanej strony do bufora 1. Służy do tego rozkaz *Main Memory Page to Buffer 1 Transfer* (&H53), którego parametrem jest 12-bitowy adres strony. Na rys. 9 pokazano przebiegi odczytu zaadresowanej strony do bufora 1. Po wpisaniu strony do bufora (528 bajtów) następuje jego odczyt. Służy do tego rozkaz *Buffer 1 Read* (&H54). Parametrem tego rozkazu jest 10-bitowy adres pozycji w buforze odczytywanej danej. Przebiegi odczytu zawartości bufora są identyczne jak przebiegi z rys. 9 dotyczące odczytu strony. Po odczytaniu danych z całego bufora 1, odczytywana jest kolejna strona

pamięci. Wartości odczytywane z bufora są przekazywane do rejestru generatora PWM. W trakcie eksperymentowania można próbować modyfikować otrzymywane próbki i dopiero wtedy wysyłać je do głośnika. W ten sposób można zmieniać barwę dźwięku, uzyskując coś w rodzaju transofonu. Przykładem może być też regulacja głośności nagranych dźwięków polegająca na mnożeniu wartości próbki zapisywanej do PWM przez stałą wartości z zakresu 1...10. Wykorzystanie pamięci DataFlash o innej pojemności będzie wymagać dokonania odpowiednich zmian w programie – wielkości bufora, liczby stron oraz bloków.

Marcin Wiązania, EP
marcin.wiazania@ep.com.pl

R E K L A M A

nowe kontra STARE

WEP8/2009 (na CD i w rubryce Tips&Tricks) zamieściliśmy przeszło setkę schematów ciekawych układów z timerem 555. **Konstruktorzy mikroprocesorowcy, rzucamy Wam wyzwanie!** Pokażcie, że korzystając z nowoczesnych podzespołów można którykolwiek z tych układów zbudować lepiej! Autorom najciekawszych rozwiązań oferujemy publikację, honorarium i wartościowe nagrody rzeczowe. Na rozwiązania konkursowe czekamy do końca października 2009. Wystarczy przedstawić schemat, zasadę działania i wymienić zalety proponowanego rozwiązania w odniesieniu do funkcjonalności analogicznego układu na 555. Prace konkursowe można przysyłać pocztą (Redakcja Elektroniki Praktycznej, ul. Leszczyńska 11, 03-197 Warszawa) lub e-mailem (redakcja@ep.com.pl).

konkurs 555