Edukacja w EdW dla szkół i uczelni:
Wykład 44: Płyta CD audio

JUNIOR
strona 81

ELEKTRONIKA dla wszystkich

nr 08/2026 (367) • sierpień • www.elportal.pl

DIY PLUS tylko dla prenumeratorów

PROJEKTY dla elektroników

- Pico Gamer – konsola do gier w stylu retro
- Dzielnik częstotliwości wzorcowej 10 MHz
- Cyfrowy terminal wideo z Raspberry Pi Pico, część 1

DIY dla wszystkich

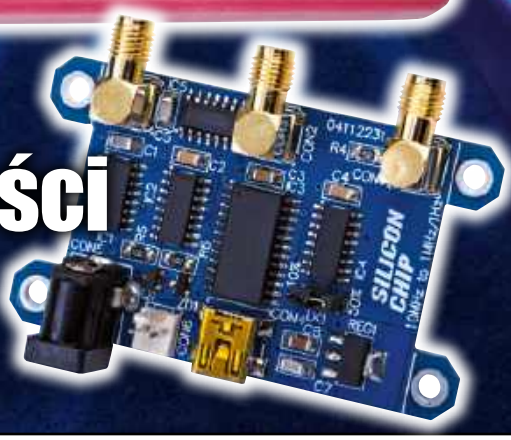
- Termometr cyfrowy z modułem Arduino Uno
- System monitorowania warunków uprawy pszenicy
- Zaawansowany wykrywacz alkoholu w wydychanym powietrzu

TUTORIALE

- Nauka elektroniki z modułem ESP32, część 1. Pierwsze kroki
- Kick Start część 11: pomiary parametrów środowiska. Wprowadzenie do czujnika BME280
- Audio OUT: Trzaski powodowane przez potencjometry, część 2
- Chirurgia obwodowa: Rezystancja sterowana elektronicznie, część 1

Pico Gamer konsola do gier

Dzielnik częstotliwości wzorcowej 10 MHz



ISSN 1425-1698 Indeks 33362X
9 771425 169269 08
19,90 zł 8% VAT)

Pomocna dłoń

automatykaB2B.pl

EP.com.pl
Największy portal dla elektroników konstruktorów

FIRMA PIEKARZ
CZĘŚCI ELEKTRONICZNE
przełączniki
półprzewodniki
złącza
przekaźniki
radiatory
obudowy
i wiele więcej...
www.piekarz.pl

eprasa.pl 17a47aa7e2

FN-SWM10
Zgrzewarka do ogniw – spawarka punktowa z kolorowym wyświetlaczem i funkcją powerbank FNIRSI SWM10

FN-DPOS-350P
Dwukanałowy oscyloskop 350 MHz, FNIRSI DPOS350P

FN-2C53T
Dwukanałowy oscyloskop z multimetrem i generatorem 50 MHz FNIRSI 2C53T

BESTSELLERY sklepu AVT – sklep.avt.pl

Mierniki Testery FNIRSI

Rabat dla Czytelników EdW przy zakupie podaj kod **EdW2505FN** **–3%**

Rabat dla Prenumeratorów EdW przy zakupie podaj numer prenumeraty **–6%**

FN-LCR-ST1
Miernik pęsetowy, tester elementów FNIRSI LCR-ST1

FN-LCR-P1
Tester elementów FNIRSI LCR-P1

FN-HRM10
Tester rezystancji wewnętrznej akumulatorów FNIRSI HRM-10

FN-G1200
Mikroskop cyfrowy G1200 z wyświetlaczem 7 cali, powiększenie ×1200, tryb foto/video

FN-DWS200-F245
Stacja lutownica 200 W z kolbą F245, FNIRSI DWS200

FN-1014D
Oscyloskop dwukanałowy 100 MHz; Generator sygnału DDS, FNIRSI 1014D

prenumerata

–15%
NA START
203,00 zł

–30%
po pierwszym roku prenumeraty
167,20 zł

–40%
po drugim roku prenumeraty
143,30 zł

–50%
po trzecim roku nieprzerwanej prenumeraty
119,40 zł

Odkryj korzyści z prenumeraty drukowanej – większe oszczędności z każdym rokiem!

Rozpocznij swoją przygodę z *Elektroniką dla Wszystkich*. Decydując się teraz na roczną prenumeratę drukowaną, otrzymasz nie tylko dostęp do najnowszych wydań, ale i **znakomity start dzięki zniżce 15%** na pierwsze zamówienie!

Prenumerata to nie tylko wygoda dostępu do treści, ale także sposób na znaczące oszczędności. Dołącz do grona naszych stałych czytelników i ciesz się coraz lepszymi warunkami.

Im dłużej jesteś z nami, tym więcej oszczędzasz:
- po roku nieprzerwanej prenumeraty zapewnimy Ci **30% rabatu** na kolejny rok,
- po dwóch latach wierności zaoferujemy **40% rabatu**,
- po trzech latach lojalności osiągniesz **najwyższy poziom rabatu – 50%!**

Jak otrzymać rabat za lojalność?

Zaloguj się na swoje konto prenumeratora na **www.UlubionyKiosk.pl** i zamów prenumeratę, korzystając z przycisku PRZEDŁUŻ w zakładce „Prenumeraty".

Przeglądaj wcześniej, płać mniej – postaw na e-prenumeratę!

Wybierz prenumeratę cyfrową PDF i ciesz się dostępem do czasopisma nawet 7 dni przed oficjalną premierą w kioskach. Oszczędzaj czas i pieniądze – skorzystaj z **rabatu 30%** na roczną e-prenumeratę w cenie 133,60 zł.

Dodatkowa oferta dla prenumeratorów wersji drukowanej: jeśli już subskrybujesz wersję papierową, możesz dokupić równoległe e-wydania w cenie 38,20 zł/rok – z niesamowitym **rabatem 80%**.

Zyskaj nieograniczony dostęp do zasobów dla pasjonatów elektroniki!

Tylko prenumeratorzy mają pełny dostęp do:
- cyfrowego archiwum *Elektroniki dla Wszystkich* na www.elportal.pl/archiwum
- projektów DIY+ na www.elportal.pl/diy

Zamów prenumeratę drukowaną lub e-prenumeratę na www.UlubionyKiosk.pl lub przez przelew na konto Wydawnictwa AVT, a po zaksięgowaniu wpłaty wyślemy Ci mailowo kod dostępu do portalu.

ARCHIWUM

DIY PLUS tylko dla prenumeratorów

Zacznij korzystać z pełnych zasobów już dziś!

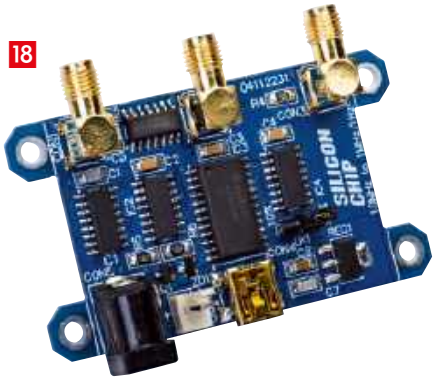
Zamów prenumeratę lub e-prenumeratę na www.UlubionyKiosk.pl/prenumerata
tel. 22 257 84 22 (godz. 10–14) | prenumerata@avt.pl | AVTKorporacja sp. z o.o. ul. Leszczynowa 11, 03-197 Warszawa
rachunek bankowy: 18 1050 1012 1000 0024 3173 1013

oprasa.pl 17a4raa7e2

ELEKTRONIKA dla wszystkich

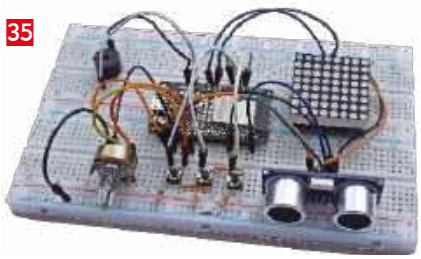
Sierpień 2026 • 08 (367)

8



18

26



35

47

Projekty dla elektroników:

Pico Gamer – konsola do gier w stylu retro 8

Dzielnik częstotliwości wzorcowej 10 MHz 18

Cyfrowy terminal wideo z Raspberry Pi Pico, część 1 26

Tutoriale:

Nauka elektroniki z modułem ESP32, część 1. Pierwsze kroki 35

Kick Start część 11: pomiary parametrów środowiska.
Wprowadzenie do czujnika BME280 47

Audio OUT: Trzaski powodowane przez potencjometry, część 2 52

Chirurgia obwodowa: Rezystancja sterowana elektronicznie, część 1 60

Edukacja w EdW dla szkół i uczelni. Wykład 44: Płyta CD audio 65

DIY dla wszystkich:

Termometr cyfrowy z modułem Arduino Uno 74

System monitorowania warunków uprawy pszenicy 76

Zaawansowany wykrywacz alkoholu w wydychanym powietrzu 78

Junior:

Dwudzieste szóste spotkanie z najmłodszymi pasjonatami elektroniki 81

Na zdjęciu na okładce Adrian – Młodzi Entuzjaści Elektroniki, Szkoła Podstawowa nr 86, Wrocław

DIY PLUS tylko dla prenumeratorów zamawiających prenumeratę na www.UlubionyKiosk.pl

Nakładka Sound to Light Color Shield dla OLEDUINO v2 90

3-przewodowy przedwzmacniacz mikrofonu elektretowego 90

Rubryki stałe:

Prenumerata 3

Od redakcji 5

Poczta 7

eprasa.pl 17a47aa7e2

Sierpień – rzeczy ważne i najważniejsze

Wakacje to czas odpoczynku, ale również czas, w którym częściej niż zwykle trzeba wziąć odpowiedzialność za innych. Za młodsze rodzeństwo, własne dzieci, wnuki, kolegów podczas górskiej wycieczki czy spływu kajakowego. Czasem trzeba przypomnieć o zabraniu wody, posmarowaniu skóry kremem z filtrem, założeniu kamizelki ratunkowej albo zabraniu latarki przed wieczornym spacerem. Innym razem trzeba będzie odwieść kogoś od ryzykownego pomysłu lub też zachęcić do odkrywania, budowania i twórczej zabawy. To czasem drobiazgi, a czasem wyzwania, ale właśnie z takich drobiazgów i wyzwań składa się bezpieczeństwo, którego nam wszystkim szczerze życzę.

Sierpniowy numer EdW jest właśnie zaproszeniem do takiego odkrywania, budowania i twórczej zabawy. Niezależnie od tego, czy dopiero zaczynasz przygodę z elektroniką, czy masz za sobą dziesiątki własnych konstrukcji, z pewnością znajdziesz tu coś, co zachęci Cię do sięgnięcia po lutownicę, napisania kilku linijek programu albo po prostu do lepszego zrozumienia działania otaczającej nas techniki.

Czy do tworzenia własnych programów naprawdę zawsze potrzebny jest komputer? Tim Blythman przekonuje, że niekoniecznie. Przedstawia możliwości PicoMite, WebMite i Micromite oraz pokazuje, jak z modułu Raspberry Pi Pico, monitora HDMI i klawiatury USB zbudować samodzielne środowisko do tworzenia własnych programów. A gdy przyjdzie pora na chwilę odpoczynku od bardziej wymagających projektów, Geoff Graham przypomni, że elektronika potrafi być także świetną zabawą. Jego Pico Gamer przywołuje klimat dawnych konsol, ale jednocześnie zachęca do napisania własnych gier.

Jeśli bardziej lubisz zrozumieć działanie układów niż tylko je budować, również znajdziesz w tym numerze coś dla siebie. Ian Bell pokazuje, jak elektronicznie sterować rezystancją i analizować takie rozwiązania w LTspice. Nicholas Vinen udowadnia, że uzyskanie niezwykle stabilnego sygnału 1 Hz z wzorca 10 MHz wcale nie wymaga skomplikowanych konstrukcji, a Jake Rothman kończy cykl poświęcony przyczynom trzasków powodowanych przez potencjometry oraz metodom ich skutecznego eliminowania.

Mike Tooley zaprasza tym razem do dwóch różnych światów. Najpierw pokazuje, jak wykorzystać popularny czujnik BME280 do budowy prostego elektronicznego barometru. Najważniejszą nowością tego numeru jest jednak rozpoczęcie nowego kursu poświęconego modułowi ESP32. Projekty wykorzystujące ten moduł od lat pojawiają się na łamach EdW i cieszą się dużym zainteresowaniem Czytelników. Tym razem zamiast kolejnej pojedynczej konstrukcji proponujemy coś więcej – systematyczny kurs, który pozwoli krok po kroku poznać możliwości ESP32, uporządkować zdobytą wcześniej wiedzę lub rozpocząć naukę od podstaw. Mam nadzieję, że nowy kurs stanie się wartościowym przewodnikiem zarówno dla początkujących, jak i bardziej doświadczonych konstruktorów.

Nie zabrakło również projektów praktycznych. Termometr cyfrowy, system monitorowania warunków uprawy pszenicy oraz wykrywacz alkoholu pokazują, że nawet stosunkowo proste rozwiązania mogą znaleźć bardzo konkretne zastosowania. Być może staną się także inspiracją do własnych konstrukcji i eksperymentów.

Jos Verstraten zaprasza do kolejnego wykładu, tym razem poświęconego standardowi Audio CD. Dla jednych będzie to sentymentalna podróż do czasów, gdy srebrny krążek był symbolem nowoczesności. Dla młodszych Czytelników – okazja do poznania technologii, która dziś jest już bardziej wspomnieniem niż powszechnie stosowanym standardem. Niezależnie od wieku warto jednak zobaczyć, jak wiele pomysłowych rozwiązań kryje się pod pozornie prostym nośnikiem, z którym przez lata obcowaliśmy niemal każdego dnia.

Na młodszych Czytelników czeka kolejny odcinek EdW Junior. Tym razem będzie można zbudować podręczną latarkę LED – urządzenie proste, ale niezwykle praktyczne podczas wakacyjnych wyjazdów, biwaków i wieczornych spacerów. To jednak znacznie więcej niż kolejny zestaw do lutowania. Na przykładzie tej niewielkiej konstrukcji będzie można przypomnieć sobie prawo Ohma, zrozumieć znaczenie rezystancji wewnętrznej baterii i przekonać się, że nawet bardzo prosty układ może stać się doskonałą okazją do poznania podstaw elektroniki. To właśnie od takich projektów bardzo często zaczyna się pasja, która później prowadzi do coraz ambitniejszych konstrukcji.

Życzę udanej końcówki wakacji, bezpiecznych powrotów do domu i wielu godzin spędzonych przy elektronice. Oby tych najważniejszych rzeczy nigdy nie zabrakło, a na te ważne – odkrywanie, budowanie, eksperymentowanie i radość z tworzenia – zawsze znalazł się czas.

Mariusz Ciszewski

A za miesiąc we wrześniowym EdW

Generator funkcyjny Wi-Fi DDS, część 1
Generator funkcyjny DDS wyposażony w dwa kanały wyjściowe umożliwia generowanie wielu rodzajów przebiegów oraz sterowanie z kolorowego ekranu dotykowego lub zdalnie przez sieć Wi-Fi. W pierwszej części artykułu przedstawiono jego możliwości oraz wyjaśniono zasadę działania, pokazując, w jaki sposób moduł Raspberry Pi Pico W i przetwornik DAC współpracują, aby uzyskać sygnały o szerokim zakresie częstotliwości i bardzo małych zniekształceniach.

Styloclone – instrument muzyczny
Styloclone to współczesna interpretacja klasycznego Stylophone'a – prostego instrumentu elektronicznego, w którym rolę klawiatury pełnią ścieżki na płytce drukowanej dotykane specjalnym rysikiem. Projekt wykorzystuje popularne układy NE555 i LM386, dzięki czemu jest łatwy do zbudowania, a jednocześnie wiernie oddaje charakter oryginalnego instrumentu.

Cyfrowy terminal wideo z Raspberry Pi Pico, część 2
Druga część artykułu poświęcona jest montażowi, uruchomieniu i konfiguracji cyfrowego terminala wideo opartego na trzech modułach Raspberry Pi Pico. Przedstawiono również sposób współpracy terminala z modułami PicoMite i WebMite oraz innymi urządzeniami wyposażonymi w interfejs USB-Serial.

Dla studentów i uczniów:
garść technicznych tutoriali

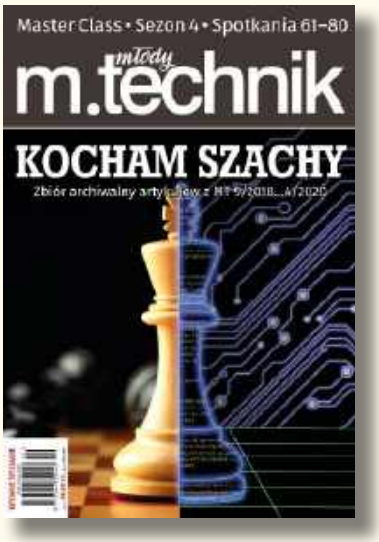
Dla szukających inspiracji:
ciekawe projekty DIY

Dla najmłodszych:
kolejny zestaw z serii AVTEDU

W kioskach od 28 sierpnia

eprasa.pl 17a47aa7e2

www.UlubionyKiosk.pl



pakiet promocyjny

KOCHAM SZACHY

7 e-booków z rabatem

50%

Dla prenumeratorów – 30% rabatu!

Promocja internetowa – w formularzu zamówienia online zaznacz pole „Jestem prenumeratorem wydawnictwa AVT, kupuję ze zniżką” i podaj swój numer prenumeraty.

eprasa.pl 17a47aa7e2

W rubryce „Poczta" zamieszczamy fragmenty listów od Czytelników. Szczególnie chętnie publikujemy komentarze do artykułów w bieżących wydaniach EdW oraz propozycje tematów artykułów, zadań i quizów.

Dioda zwierająca szyny zasilania – czy to naprawdę dobry pomysł?

Szanowna Redakcjo!

Od wielu lat zajmuję się elektroniką amatorsko i wydawało mi się, że temat zabezpieczenia urządzeń przed odwrotnym podłączeniem zasilania jest prosty. Najbardziej oczywistym rozwiązaniem wydaje mi się dioda prostownicza włączona szeregowo z zasilaniem. Powoduje wprawdzie niewielki spadek napięcia, ale skutecznie chroni układ przed pomyłką.

Tym większe było moje zdziwienie, gdy w różnych chińskich zestawach do samodzielnego montażu, a także w niektórych projektach publikowanych w „Elektronice dla Wszystkich", zauważyłem inne rozwiązanie – diodę prostowniczą włączoną równolegle do szyn zasilania, spolaryzowaną zaporowo podczas normalnej pracy.

Rozumiem zasadę działania takiego układu. Po odwrotnym podłączeniu zasilania dioda zaczyna przewodzić i powoduje zwarcie, dzięki czemu napięcie o niewłaściwej polaryzacji nie dociera do chronionego urządzenia. Mam jednak poważne wątpliwości, czy jest to rozwiązanie bezpieczne.

Przecież przez diodę płynie wtedy bardzo duży prąd. Jeżeli użytkownik nie zauważy pomyłki od razu, dioda będzie się silnie nagrzewać. W przypadku zasilacza wtyczkowego może to doprowadzić do jego przegrzania, stopienia obudowy, a nawet pożaru. Jeszcze bardziej obawiam się zasilania z baterii lub akumulatorów. Czy długotrwałe zwarcie nie może doprowadzić do ich przegrzania, uszkodzenia, a nawet wybuchu?

Rozumiałbym takie rozwiązanie, gdyby przed diodą znajdował się bezpiecznik. Wtedy po odwrotnym podłączeniu zasilania bezpiecznik natychmiast by się przepalił, a dioda przewodziłaby tylko przez bardzo krótki czas.

Dlaczego więc w wielu konstrukcjach stosuje się samą diodę? Czy wynika to jedynie z chęci zaoszczędzenia kilku groszy, czy istnieją ku temu ważne powody techniczne?

Chciałbym również zapytać o historię tego rozwiązania. Kiedy zaczęto je stosować i dlaczego z czasem zrezygnowano z bezpiecznika, skoro wydaje się on oczywistym uzupełnieniem takiego zabezpieczenia?

Na koniec chciałbym zapytać, czy istnieją normy bezpieczeństwa, na przykład IEC lub UL, które określają, kiedy można stosować takie rozwiązanie, a kiedy wymagany jest bezpiecznik lub inne zabezpieczenie nadprądowe?

Czesław W., Poznań

Red. To bardzo dobre pytanie. Na pierwszy rzut oka rozwiązanie polegające na celowym zwieraniu zasilania rzeczywiście wydaje się sprzeczne ze zdrowym rozsądkiem.

Najpierw uporządkujmy jednak terminologię. W przypadku ochrony przed odwrotną polaryzacją mówimy o równoległej diodzie zabezpieczającej (ang. reverse polarity protection diode lub anti-parallel diode). Nie należy mylić jej z klasycznym układem crowbar, który służy do ochrony przed nadnapięciem i najczęściej wykorzystuje tyrystor zwierający zasilanie po przekroczeniu dopuszczalnego napięcia.

Sama dioda zabezpieczająca przed odwrotną polaryzacją jest rozwiązaniem stosowanym od wielu dziesięcioleci. Upowszechniła się wraz z rozwojem tranzystorowych urządzeń zasilanych z baterii i akumulatorów. Trudno wskazać jednego autora tego pomysłu. Warto jednak przypomnieć, że klasyczny układ obejmował nie tylko diodę, ale również bezpiecznik umieszczony pomiędzy źródłem zasilania a diodą. Po odwrotnym podłączeniu zasilania dioda zwierała linię zasilania, a bezpiecznik odłączał urządzenie od źródła energii.

Dlaczego więc dziś często spotykamy samą diodę?

Najczęściej dlatego, że urządzenie jest przeznaczone do współpracy z określonym źródłem zasilania wyposażonym już w zabezpieczenie przeciwzwarciowe. Dotyczy to między innymi portów USB, markowych zasilaczy impulsowych oraz zasilaczy laboratoryjnych. Po wykryciu zwarcia ograniczają one prąd lub całkowicie wyłączają napięcie.

Nie oznacza to jednak, że dioda jest całkowicie bezpieczna. Nawet prąd ograniczony do 1 A powoduje wydzielanie w typowej diodzie prostowniczej mocy bliskiej 1 W. Jeżeli taki stan będzie trwał zbyt długo, dioda może ulec trwałemu uszkodzeniu. Po usunięciu pomyłki urządzenie nie zawsze wróci więc do normalnej pracy i może wymagać naprawy.

Podobnie wygląda sytuacja ze źródłem zasilania. Markowy zasilacz spełniający wymagania odpowiednich norm powinien bezpiecznie wytrzymać zwarcie lub wyłączyć się, zanim dojdzie do przegrzania. Nie można jednak tego samego powiedzieć o wszystkich tanich zasilaczach dostępnych na rynku.

Jeszcze większą ostrożność należy zachować w przypadku urządzeń zasilanych z akumulatorów lub innych źródeł energii o dużej wydajności prądowej. Akumulator samochodowy czy pakiet litowy mogą dostarczyć prąd wielokrotnie większy niż typowy zasilacz USB. Jeżeli zabraknie bezpiecznika lub innego skutecznego zabezpieczenia nadprądowego, uszkodzeniu może ulec nie tylko dioda, ale również ścieżki na płytce drukowanej, przewody, a nawet samo źródło zasilania. Dlatego w takich zastosowaniach bezpiecznik nadal pozostaje rozwiązaniem zdecydowanie zalecanym.

Czy brak bezpiecznika jest próbą zaoszczędzenia kilku groszy? Niekoniecznie. Często wynika z założenia, że urządzenie będzie współpracowało wyłącznie z określonym źródłem zasilania, które samo zapewnia odpowiednie zabezpieczenie przeciwzwarciowe. Jeżeli jednak projekt ma być uniwersalny i może zostać podłączony do różnych źródeł energii, zastosowanie bezpiecznika znacząco zwiększa bezpieczeństwo i odporność urządzenia na błędy użytkownika.

Na koniec odpowiedź na pytanie o normy. Współczesne normy bezpieczeństwa, między innymi IEC 62368-1 oraz UL 62368-1, nie narzucają konkretnego sposobu zabezpieczenia przed odwrotną polaryzacją. Wymagają natomiast, aby gotowe urządzenie pozostawało bezpieczne zarówno podczas normalnej pracy, jak i w przewidywalnych warunkach uszkodzenia lub niewłaściwej obsługi. Producent może więc zastosować diodę szeregową, diodę równoległą z bezpiecznikiem, tranzystor MOSFET pełniący funkcję tzw. idealnej diody lub inne rozwiązanie, o ile całe urządzenie spełnia wymagania bezpieczeństwa.

Podsumowując, sama dioda równoległa nie jest ani rozwiązaniem błędnym, ani uniwersalnym. Jej poprawność zależy od całego systemu zasilania. W prostych urządzeniach współpracujących z odpowiednio zabezpieczonym źródłem zasilania może być rozwiązaniem wystarczającym. Natomiast wszędzie tam, gdzie istnieje możliwość podłączenia do źródła o dużej wydajności prądowej, zastosowanie bezpiecznika lub innego skutecznego zabezpieczenia nadprądowego należy uznać za dobrą praktykę inżynierską.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Pico Gamer

Konsola do gier w stylu retro

Przedstawiamy konsolę do gier w stylu retro, opartą na module PicoMite. Zawiera ona dziewięć gier wzorowanych między innymi na Pac-Manie, Space Invaders i Tetrisie. Dzięki wbudowanemu akumulatorowi oraz kolorowemu wyświetlaczowi LCD o przekątnej 3,2 cala (81 mm) zapewnia wiele godzin dobrej zabawy.

Opisywany Pico Gamer został zainspirowany konsolą Game Boy firmy Nintendo, wprowadzoną na rynek w 1989 roku. Było to niewielkie, przenośne urządzenie zasilane bateriami, wyposażone początkowo w monochromatyczny wyświetlacz LCD oraz ośmiobitowy mikroprocesor. Z czasem pojawiły się kolejne wersje o bogatszym wyposażeniu. Cała seria odniosła ogromny sukces – we wszystkich odmianach sprzedano ponad 100 milionów egzemplarzy.

Prezentowany Pico Gamer stanowi znaczące udoskonalenie w porównaniu z oryginalnym Game Boyem. Wyposażono go w kolorowy wyświetlacz LCD, dwurdzeniowy 32-bitowy procesor taktowany częstotliwością 252 MHz, 2,5 MB pamięci przeznaczonej na gry oraz interfejs USB. Konsola jest łatwa w montażu, zawiera zaledwie kilka elementów i mieści się w specjalnie zaprojektowanej obudowie wydrukowanej techniką druku 3D.

Projekt jest wzorowany na konsoli Game Boy Advance. Ma poziomy układ z przyciskami sterującymi rozmieszczonymi po obu stronach wyświetlacza. Takie rozwiązanie doskonale sprawdza się w przenośnych konsolach do gier i zostało zastosowane również w wielu innych konstrukcjach.

Konsola jest wyposażona w osiem przycisków. Po lewej stronie znajdują się cztery przyciski kierunkowe (góra, dół, lewo, prawo), pod wyświetlaczem dwa przyciski funkcyjne START i SELECT, a po prawej dwa przyciski A i B.

Ważnym elementem urządzenia jest wbudowany akumulator litowo-jonowy. Oryginalny Game Boy był zasilany czterema bateriami AA. Akumulator Pico Gamer zapewnia ponad osiem godzin gry, co w zupełności wystarcza nawet na długą podróż. Można go naładować przez wbudowane złącze USB w czasie krótszym niż cztery godziny, a w razie potrzeby również doładować z przenośnego power banku.

Kolorowy wyświetlacz LCD o przekątnej 3,2 cala ma obszar aktywny o wymiarach 66×50 mm i rozdzielczość 320×240 pikseli. Może wyświetlać ponad 65 000 kolorów, z czego większość gier korzysta z bardzo dobrym efektem. Wyświetlacz jest dotykowy, chociaż obecnie żadna z gier nie wykorzystuje tej funkcji. Nowe gry można tworzyć w języku BASIC. Być może jedną z nich opracuje któryś z Czytelników!

Pico Gamer jest wyposażony w monofoniczny wzmacniacz akustyczny i głośnik do odtwarzania efektów dźwiękowych. W większości gier wykorzystano je do generowania różnych sygnałów dźwiękowych, piknięć i odgłosów eksplozji. Tor dźwiękowy ma jednak na tyle dobre parametry, że umożliwia również odtwarzanie bardziej złożonych efektów dźwiękowych oraz muzyki. W niektórych grach wykorzystano obie te możliwości.

Przykładową rozgrywkę można obejrzeć na stronie www.siliconchip.au/Videos/PicoGamer.

Mikrokontroler

Pico Gamer opiera się na module RP2040-Plus firmy Waveshare z mikrokontrolerem RP2040. Jest to klon Raspberry Pi Pico zgodny z nim pod względem wyprowadzeń, lecz wyposażony w kilka istotnych udoskonaleń.

Po pierwsze, moduł jest wyposażony w układ ładowania akumulatora litowo-jonowego, dzięki czemu nie trzeba dodawać

Parametry:

- Wymiary: 198 × 90 × 22 mm
- Masa: 300 g
- Akumulator: LiPo, 1100 mAh, wbudowany
- Czas pracy: około 8 godzin
- Zasilanie zewnętrzne/ładowanie: 5 V USB, 260 mA
- Wyświetlacz: LCD, 66 × 50 mm, 320 × 240 pikseli, 65 535 kolorów
- Dźwięk: moc wyjściowa 340 mW, głośnik o średnicy 28 mm
- Pamięć wewnętrzna: 14,5 MB* (wystarcza na setki gier)
- Pamięć zewnętrzna: karta SD o pojemności do 32 GB, sformatowana w systemie plików FAT16 lub FAT32
- Tryb testowania dźwięku i tryb demonstracyjny
- Test przycisków
- Przeglądarka plików
- Zestaw zainstalowanych gier (patrz panel)

* lub 2,5 MB w przypadku zastosowania modułu RP2040-Plus z pamięcią FLASH 4 MB, co wystarcza na ponad 30 gier.

eprasa.pl 17a47aa7e2

go do projektu. Zastosowana pamięć FLASH jest wystarczająco szybka, aby mikrokontroler RP2040 można było przetaktować do 252 MHz, co jest wymagane przez gry o większych wymaganiach obliczeniowych. Ponadto moduł RP2040-Plus ma 4 MB pamięci FLASH zamiast 2 MB, jak w standardowym Raspberry Pi Pico. Ma to istotne znaczenie, ponieważ właśnie w tej pamięci są przechowywane gry. Standardowy Raspberry Pi Pico pozwala zapisać jedynie ograniczoną ich liczbę, natomiast RP2040-Plus może pomieścić ich kilkadziesiąt i w praktyce trudno będzie zapełnić całą dostępną pamięć.

W Pico Gamer można również zastosować standardowy moduł Raspberry Pi Pico. Konsola będzie działać, jednak konieczne będzie zasilanie przez przewód USB. Trzeba będzie także zainstalować inną wersję oprogramowania, ponieważ dostarczone przez nas jest zoptymalizowane pod kątem modułów Waveshare wyposażonych w 4 MB lub 16 MB pamięci FLASH.

Oprogramowanie PicoMite

Zainstalowane w module RP2040-Plus oprogramowanie układowe PicoMite opisaliśmy w styczniowym numerze z 2022 roku (www.siliconchip.au/Article/15177). Jest to rozbudowany interpretator języka BASIC (MMBasic) przeznaczony dla Raspberry Pi Pico, obsługujący takie urządzenia peryferyjne, jak wyświetlacz LCD, karta SD czy generator dźwięku. Ponieważ językiem programowania wykorzystywanym przez PicoMite jest BASIC, wszystkie gry napisano właśnie w tym języku.

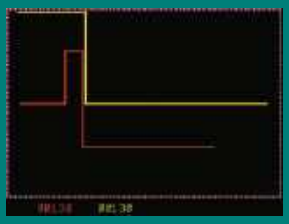
Najnowsze wersje oprogramowania układowego PicoMite udostępniają użytkownikowi wirtualny dysk A:, który działa jak niewymienna karta SD. Rozwiązanie to umożliwia przechowywanie programów, plików muzycznych, grafiki i innych danych wewnątrz modułu, bez konieczności stosowania zewnętrznej pamięci, na przykład karty SD.

W razie potrzeby do gniazda w wyświetlaczu LCD można wsunąć kartę SD lub kartę microSD z adapterem. Będzie ona widziana jako dysk B:. System menu umożliwia przełączenie się na ten dysk i uruchamianie z niego gier. Nie jest to jednak konieczne, ponieważ do przechowywania wszystkich gier zazwyczaj wystarcza wewnętrzny system plików (dysk A:).

PicoMite udostępnia również trzy gniazda pamięci FLASH, stanowiące alternatywne miejsca przechowywania programów. Program uruchamiany z jednego z nich nie musi być ładowany do głównej pamięci programu, dzięki czemu jest uruchamiany

Gry zawarte w oprogramowaniu Pico Gamera

PETSCII Robots
W tej rozbudowanej grze strategiczno-przygodowej Twoim zadaniem jest przedostanie się do osady i zniszczenie robotów. Kluczem do sukcesu jest odnajdywanie odpowiednich narzędzi i nauczenie się ich właściwego wykorzystania.



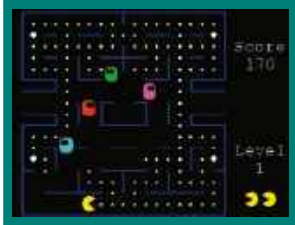
Lazer Cycle
Pędzisz szybkim pojazdem laserowym, podobnie jak Twój przeciwnik. Będzie on próbował zmusić Cię do zderzenia ze ścianą lub pozostawionym torem, a Ty musisz zrobić to samo jemu. To wyścig na śmierć i życie!

3D Maze
Utknąłeś w trójwymiarowym labiryncie. Twoim zadaniem jest odnalezienie wyjścia. Możesz skorzystać z mapy, ale mimo to zadanie nie będzie tak łatwe, jak mogłoby się wydawać.

Pico Blocks
Podobnie jak w popularnej grze Tetris, Twoim zadaniem jest obracanie i układanie spadających z góry kolorowych klocków tak, aby tworzyły pełne rzędy, które następnie znikają. Jeśli stos klocków stanie się zbyt wysoki, przegrasz.

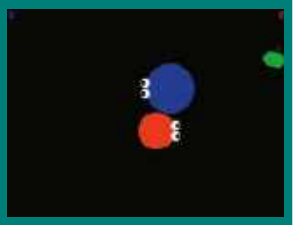
Kingdom
Jesteś władcą Królestwa nad Żółtą Rzeką. Musisz rozsądnie gospodarować zasobami, dzieląc je między wyżywienie mieszkańców a obronę przed złodziejami. Nie popełnij błędu, bo lud może się zbuntować.

Wąż
Kierujesz wężem po planszy, zjadając dobre jedzenie i omijając to, które mu szkodzi. Z każdym zjedzonym kąskiem wąż staje się dłuższy. Będziesz musiał wykazać się dużą zręcznością, aby uniknąć zderzenia ze ścianą!



Pico Man
Wciągająca gra zainspirowana Pac-Manem. Poruszasz się po labiryncie, zjadając kropki, podczas gdy ścigają Cię cztery duchy. Zjedzenie kulki Power Ball daje Ci specjalną moc, dzięki której role się odwracają i to Ty zaczynasz ścigać duchy!

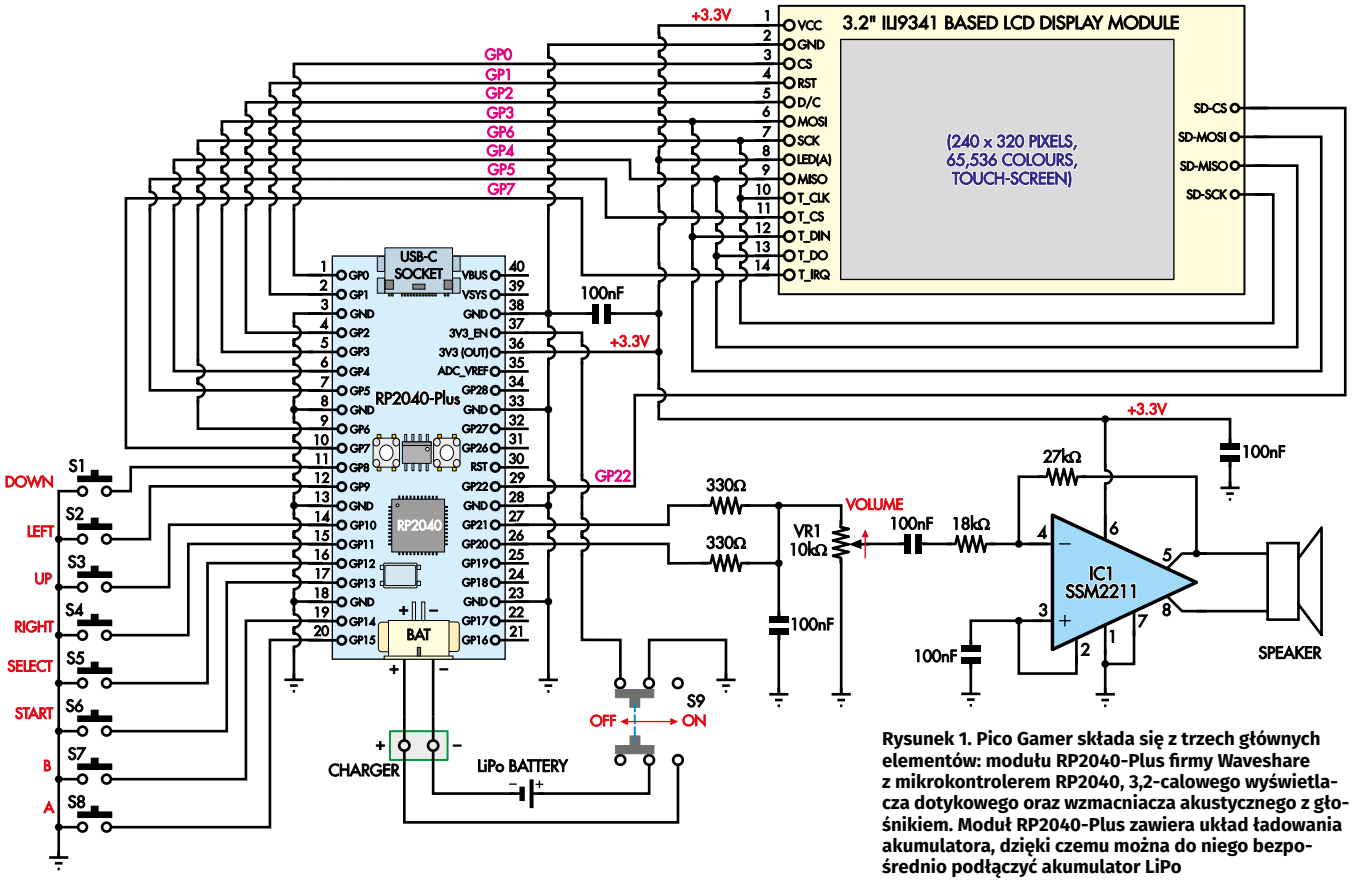
Pico Vaders
W tej grze, wzorowanej na klasycznym Space Invaders z lat 80., musisz stawić czoła hordom najeźdźców nieustannie zrzucających bomby. Sterując swoją armatą, poruszasz się w lewo i w prawo, próbując zestrzelić wszystkich przeciwników.



Circle One
Celem gry jest zjadanie jabłek i powiększanie swojej postaci. Komputerowy przeciwnik próbuje osiągnąć to samo. Wygrywa ten, kto pierwszy osiągnie maksymalny rozmiar. Gra jest prosta, ale bardzo wciągająca i doskonale nadaje się dla młodszych dzieci.

Redakcja „Silicon Chip" oferuje zestawy elementów Pico Gamera (SC6911). Więcej informacji można znaleźć na stronie https://www.siliconchip.com.au/Shop/20/6911.

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 1. Pico Gamer składa się z trzech głównych elementów: modułu RP2040-Plus firmy Waveshare z mikrokontrolerem RP2040, 3,2-calowego wyświetlacza dotykowego oraz wzmacniacza akustycznego z głośnikiem. Moduł RP2040-Plus zawiera układ ładowania akumulatora, dzięki czemu można do niego bezpośrednio podłączyć akumulator LiPo

szybciej. Program menu Pico Gamer jest zapisany w pierwszym gnieździe, dlatego jest zawsze gotowy do uruchomienia.

Podziękowania

Pico Gamer powstał dzięki współpracy wielu osób z całego świata. Pomysł stworzenia urządzenia wzorowanego na Game Boyu i opartego na Raspberry Pi Pico pochodzi od Toma Williamsa z Wielkiej Brytanii, który wspólnie z Australijczykiem Mickiem Gulovsenem opracował konsolę Game*Mite. Tom opublikował projekt na forum The Back Shed (www.siliconchip.au/link/absd), gdzie spotkał się on z dużym zainteresowaniem. W rezultacie powstało kilka sprzętowych klonów tej konsoli oraz wiele dodatkowych gier. Ich autorami są między innymi Martin Herhaus (Niemcy), Harm (Holandia), Tom Williams (Wielka Brytania) i Geoff Graham (Australia). Tom Williams jest również autorem większości programów użytkowych. Z twórcami można kontaktować się za pośrednictwem forum The Back Shed, przekazując uwagi i zgłaszając błędy.

W Pico Gamer zapewniono zgodność sprzętową z konsolą GameMite, dzięki czemu gry i programy napisane dla jednej z tych konsol działają również na drugiej. Na Pico Gamer można nawet wgrać pełne oprogramowanie układowe przygotowane przez Toma dla GameMite i będzie ono działać równie dobrze.

Opis układu

Jak można się było spodziewać, główną część Pico Gamera (**rysunek 1**) stanowi moduł RP2040-Plus firmy Waveshare z mikrokontrolerem RP2040. Bezpośrednio z mikrokontrolerem połączonych jest osiem przycisków wykorzystywanych w grach. Naciśnięcie każdego z nich wymusza niski poziom logiczny na jednym z wejść mikrokontrolera. Programy uruchamiane na Pico Gamer konfigurują te piny jako wejścia z włączonymi wewnętrznymi rezystorami podciągającymi (pull-up), dlatego nie są potrzebne rezystory zewnętrzne.

Przełącznik zasilania w położeniu „wyłączone" odłącza akumulator i dodatkowo wyłącza zasilanie modułu RP2040-Plus. Dzięki temu Pico Gamer jest całkowicie wyłączony nawet wtedy, gdy jest podłączony do zasilania przez złącze USB.

Ładowarka akumulatora wyłącza ładowanie po osiągnięciu przez akumulator napięcia 4,2 V, czyli napięcia pełnego naładowania standardowych akumulatorów LiPo. Dzięki temu nie dochodzi do ich przeładowania. Gdy Pico Gamer jest zasilany z akumulatora, układ zabezpieczający wbudowany w akumulator automatycznie odłącza obciążenie, dzięki czemu nie można go uszkodzić przez przypadkowe pozostawienie włączonej konsoli.

Wyświetlacz LCD jest połączony z mikrokontrolerem za pośrednictwem interfejsu SPI, który obsługuje wyświetlacz, kontroler panelu dotykowego oraz gniazdo karty SD. Zarówno wyświetlacz, jak i wzmacniacz akustyczny są zasilane z wyjścia 3,3 V modułu RP2040-Plus. Napięcie to jest wytwarzane przez przetwornicę DC/DC, dzięki czemu pozostaje stałe niezależnie od napięcia akumulatora, które podczas pracy może zmieniać się od 4,2 V do około 2 V.

Sygnał akustyczny stereo jest generowany na wyjściach PWM pinów GP20 i GP21. Sygnały te są sumowane i filtrowane przez dwa rezystory 330 Ω oraz kondensator 100 nF. Powstały sygnał monofoniczny jest podawany na wzmacniacz akustyczny SSM2211SZ, który steruje głośnikiem pracującym w układzie mostkowym. Przy napięciu zasilania 3,3 V wzmacniacz nie zapewnia dużej mocy, jednak w przypadku urządzenia przenośnego uzyskiwana głośność jest w pełni wystarczająca.

Zakup elementów

Redakcja „Silicon Chip" oferuje zestawy zawierające wszystkie elementy Pico Gamera

eprasa.pl 17a47aa7e2

z wyjątkiem akumulatora (nie można go wysyłać drogą lotniczą). Dostępne są trzy wersje: bez obudowy (jeśli chcecie wydrukować własną), z podstawową obudową, którą można pomalować na dowolny kolor, oraz z nieco droższą obudową w kolorze czarnym. Jest to jeden ze sposobów skompletowania elementów potrzebnych do budowy Pico Gamera.

Odpowiedni akumulator LiPo o napięciu 3,7 V i pojemności 1100 mAh można kupić na przykład w sklepie Altronics (nr kat. S4724).

Jeśli jednak zdecydujecie się kompletować pozostałe elementy samodzielnie, poniżej zamieszczamy kilka wskazówek.

Sercem Pico Gamera jest moduł RP2040-Plus firmy Waveshare. Jest on dostępny w sklepie producenta (www.waveshare.com), na Amazonie oraz u innych dystrybutorów. Wystarczy wersja z 4 MB pamięci FLASH. Upewnijcie się, że zamawiacie moduł bez przylutowanych listew stykowych, ponieważ musi on zostać przylutowany płasko do płytki drukowanej.

Gniazdo ładowania akumulatora na module RP2040-Plus to dwupinowe złącze Molex PicoBlade o rastrze 1,25 mm. Pasująca wtyczka z przewodami jest powszechnie stosowana w dronach i można ją kupić u dostawców części do dronów. Zwróćcie uwagę, że wiele oferowanych złączy akumulatorowych ma standard JST, na przykład JST-SH lub JST-XH, i nie są one zgodne ze złączem PicoBlade.

Innym sposobem zdobycia pasującego złącza jest zakup akumulatora ze złączem PicoBlade. Złącze można odciąć i wykorzystać jako przewód do ładowania, a pozbawione złącza przewody akumulatora przylutować bezpośrednio do płytki drukowanej.

Wyświetlacz LCD ma przekątną 3,2 cala, rozdzielczość 320×240 pikseli i jest wyposażony w sterownik ILI9341. W serwisach eBay i AliExpress jest dostępnych wiele takich wyświetlaczy. Upewnijcie się jednak, że zdjęcie oferowanego modułu odpowiada temu przedstawionemu na **rysunku 4**. Dostępne są również wersje, które fizycznie nie pasują do naszej płytki drukowanej.

Wyświetlacz może być pozbawiony funkcji dotykowej. Obecnie żadna z gier z niej nie korzysta. Wyświetlacze z panelem dotykowym są jednak tylko nieznacznie droższe, dlatego warto wybrać właśnie taki model.

Duże, kolorowe przyciski o średnicy 8 mm można kupić na przykład w sklepach Altronics, Jaycar lub RS Components. Stwierdziliśmy, że modele oferowane przez Altronics zapewniają przyjemniejsze „kliknięcie", ale może to być kwestią indywidualnych preferencji.

Przyciski START i SEL muszą mieć stosunkowo długi trzpień – około 9 mm – oraz całkowitą wysokość 13 mm (łącznie z podstawą). Można je kupić na eBayu i AliExpress. Alternatywnie można kupić wersję z dłuższym trzpieniem (Altronics, nr kat. S1119) i skrócić go do całkowitej wysokości 13 mm.

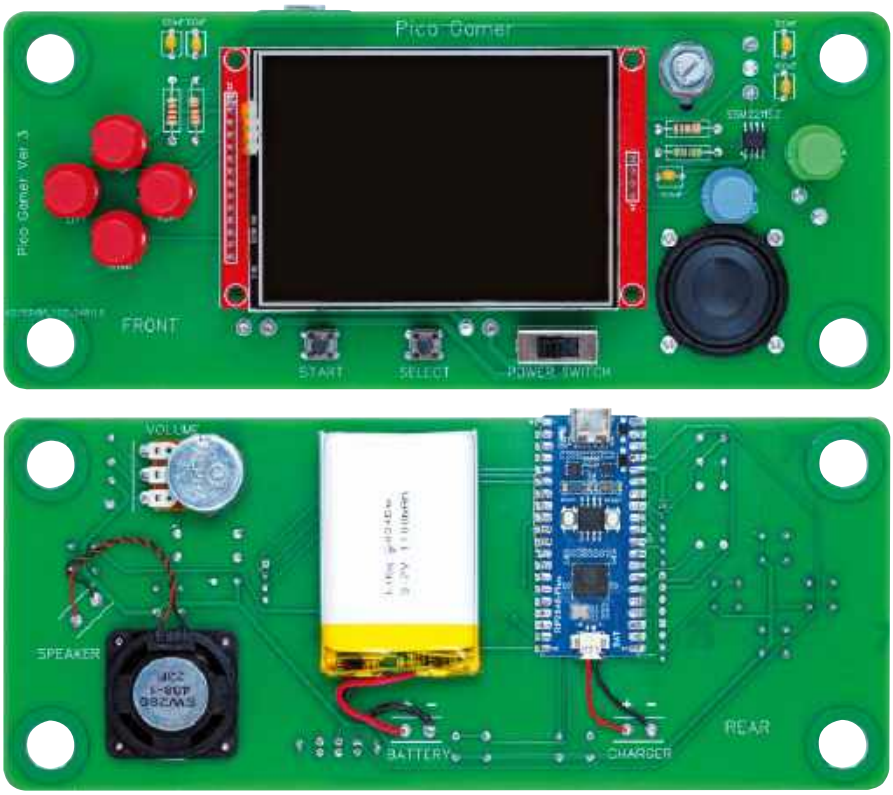
Potencjometr regulacji głośności to standardowy potencjometr logarytmiczny o średnicy 16 mm, dostępny w ofercie firmy Altronics (nr kat. R2233), a także na eBayu i AliExpress. Jego rezystancja nie jest krytyczna i może wynosić od 10 kΩ do 50 kΩ, jednak jego głębokość musi być mniejsza niż 10 mm, aby zmieścił się w obudowie. Trzpień powinien mieć długość 8 mm i być radełkowany, ponieważ w tej konstrukcji potencjometr jest używany bez pokrętła.

Głośnik zastosowany w tym projekcie to SW280408-1 firmy DB Unlimited (Mouser 497-SW280408-1, DigiKey 2104-SW280408-1-ND). Wybrano go, ponieważ mimo niewielkich rozmiarów zapewnia dobrą jakość dźwięku, a jednocześnie jest łatwy w montażu – mocuje się go za pomocą czterech śrub.

Nawet jeśli nie dysponujecie drukarką 3D, wykonanie specjalnie zaprojektowanej obudowy nie powinno sprawić trudności. Ze strony internetowej „Silicon Chip" można pobrać dwa pliki STL definiujące górną i dolną część obudowy, a następnie przesłać je do firmy wykonującej wydruki 3D. Takich usługodawców jest wielu, jednak my polecamy JLCPCB. Wystarczy przesłać pliki na stronę internetową firmy i wybrać technologię SLA z żywicą LEDO 6060 (https://jlc3dp.com/3d-printing-quote). Gotowa obudowa zostanie wykonana i wysłana w ciągu kilku dni.

Żywica LEDO 6060 jest wytrzymała, nie ulega odkształceniom, a jej powierzchnia jest gładka i ma lekko przezroczysty, złamany biały kolor. Należy jednak pamiętać, że materiał ten może z czasem nieznacznie żółknąć, dlatego warto pomalować obudowę farbą w sprayu. Żywica LEDO 6060 dobrze przyjmuje farbę. Do tego celu doskonale nadaje się farba Rust-Oleum Satin 2X Ultra Cover, dostępna w wielu kolorach w sklepach Bunnings.

Można również wybrać jeden z droższych materiałów oferowanych przez JLCPCB, barwionych lub w inny sposób odpornych na żółknięcie, na przykład „Black Resin" lub „Imagine Black". Taką opcję przewidziano również w zestawach Pico Gamera z myślą o osobach, które nie chcą malować obudowy i preferują czarne wykończenie.



Na górnej stronie płytki drukowanej znajdują się 3,2-calowy wyświetlacz LCD, przyciski, przełącznik zasilania, wzmacniacz akustyczny oraz elementy bierne. Na dolnej stronie płytki umieszczono moduł RP2040-Plus, akumulator, potencjometr regulacji głośności i głośnik. Moduł RP2040-Plus należy przylutować tak, aby przylegał równo do powierzchni płytki, dzięki czemu jego złącze USB będzie pokrywać się z wycięciem w obudowie.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Wykaz elementów:
1 dwustronna płytka drukowana, 188 × 80 mm, kod 08104241
1 specjalnie zaprojektowana obudowa wydrukowana w technologii 3D, składająca się z części górnej i dolnej, 199 × 90 × 26 mm (patrz tekst)
1 moduł Waveshare RP2040-Plus z pamięcią FLASH 4 MB lub 16 MB, bez złącza [Waveshare SKU 20290 (4 MB) lub 23503 (16 MB)]
1 wyświetlacz LCD z panelem dotykowym; 3,2 cala, 320 × 240 pikseli, sterownik ILI9341, gniazdo na kartę SD
1 akumulator LiPo 900...1100 mAh, 3,7 V [Altronics S4724]
1 wzmacniacz akustyczny SSM2211SZ, 1,5 W, SOIC-8 (IC1) [DigiKey, Mouser, RS]
6 przycisków SPST z kołpakami o średnicy 8 mm w różnych kolorach, rozstaw wyprowadzeń 5×5 mm (S1...S4, S7, S8) [Altronics S1094/5/6/8/9 lub Jaycar SP0720/1/2/3/4]
2 przyciski SPST, rozstaw wyprowadzeń 4×6 mm, wysokość trzpienia 13 mm (S5, S6)
1 miniaturowy przełącznik suwakowy DPDT do montażu na płytce drukowanej (S9) [Altronics S2060, Jaycar SS0823]
1 głośnik DB Unlimited SW280408-1, 8 W [Mouser 497-SW280408-1, DigiKey 2104-SW280408-1-ND]
1 potencjometr logarytmiczny 10 kΩ z wałkiem 8 mm [Altronics R2233]
5 wielowarstwowych kondensatorów ceramicznych (MLCC), 100 nF, 50 V, X7R, raster 5 mm
1 listwa goldpin 4-pinowa, raster 2,54 mm
1 wtyczka Molex PicoBlade 2-pinowa, raster 1,25 mm, z przewodami
4 śruby maszynowe z łbem płaskim M3 × 16 mm
4 śruby maszynowe z łbem płaskim M2 × 6 mm
1 puszka farby w sprayu (opcjonalnie; zalecenia w tekście)
1 odcinek dwustronnej taśmy piankowej [np. z Bunnings]

Rezystory (wszystkie osiowe, 1/4 W, 1% lub 5%)
1 szt. 27 kΩ 1 szt. 18 kΩ 2 szt. 330 Ω

Konstrukcja

Pico Gamer składa się z zaledwie kilku elementów, dlatego jego montaż zajmuje najwyżej godzinę lub dwie. Cztery elementy (moduł RP2040-Plus, akumulator, potencjometr regulacji głośności i głośnik) montuje się po stronie tylnej płytki drukowanej, a pozostałe – po stronie przedniej. Dla ułatwienia na płytce umieszczono oznaczenia FRONT (przód) i BACK (tył).

Płytka drukowana Pico Gamera (kod 08104241) ma wymiary 188 × 80 mm. Podczas montażu należy korzystać z **rysunków 2** i **3** oraz zdjęć pokazujących rozmieszczenie poszczególnych elementów.

Zaczynamy od montażu układu wzmacniacza akustycznego SSM2211SZ w małej 8-pinowej obudowie do montażu powierzchniowego.

Płytka drukowana jest idealnie dopasowana do obudowy wydrukowanej w technologii 3D. Po skręceniu obu połówek powstaje konsola o optymalnych wymiarach i zaokrąglonych krawędziach, wygodnie leżąca w dłoniach.

Pico Gamer swój profesjonalny wygląd zawdzięcza obudowie wydrukowanej w technologii 3D. Konsola zawiera dziewięć gier inspirowanych m.in. grami Pac-Man, Space Invaders i Tetris. Gry doskonale prezentują się na kolorowym wyświetlaczu LCD o przekątnej 3,2 cala. Wbudowany akumulator umożliwia nawet osiem godzin nieprzerwanej gry.

Znacznie łatwiej jest zamontować go, gdy nie przeszkadzają jeszcze inne elementy. Układ montujemy po przedniej stronie płytki drukowanej i lutujemy standardową techniką stosowaną do układów scalonych SMD. Nakładamy niewielką ilość topnika w postaci pasty na pady płytki drukowanej, a na jeden z narożnych padów nanosimy niewielką ilość lutowia. Umieszczamy układ scalony na padach, zwracając uwagę na oznaczenie pinu 1, i przytrzymujemy go, po czym przylutowujemy jeden z pinów, wykorzystując lutowie naniesione wcześniej na pad. Sprawdzamy i w razie potrzeby korygujemy położenie układu, a następnie przylutowujemy pin w przeciwległym rogu. Po unieruchomieniu układu nakładamy więcej topnika w postaci pasty i, mając na grocie lutownicy minimalną ilość lutowia, dotykamy kolejno końca każdego wyprowadzenia, pozwalając lutowiu swobodnie rozpłynąć się wokół wyprowadzenia i padu. Na koniec sprawdzamy jakość lutowania przez silną lupę (×10 lub ×20) i w razie potrzeby poprawiamy połączenia, używając topnika w postaci pasty oraz plecionki lutowniczej.

Następnie montujemy moduł RP2040-Plus po tylnej stronie płytki drukowanej. Moduł przylega płasko do płytki, dlatego jest montowany powierzchniowo. Przed lutowaniem upewniamy się, że jest wyśrodkowany na padach lutowniczych, a gniazdo USB znajduje się u góry i wystaje poza krawędź płytki.

Teraz można przylutować wtyczkę i przewód ładowania. Pamiętajmy, że kolory przewodów (czerwony i czarny) przy złączu mogą nie odpowiadać polaryzacji oznaczonej na module RP2040-Plus. Należy to sprawdzić i upewnić się, że przewód podłączony do styku „+” złącza jest przylutowany do pola oznaczonego „+” na płytce drukowanej, niezależnie od koloru przewodu.

Następnie montujemy rezystory i kondensatory. Jest ich w sumie dziewięć i żaden z nich nie jest elementem polaryzowanym, dlatego montaż nie powinien sprawić trudności. Lista elementów zawiera również kody barwne rezystorów, jednak przed ich wlutowaniem warto sprawdzić ich wartości multimetrem.

Montaż wyświetlacza

Kolejnym montowanym elementem jest wyświetlacz LCD. Ze względu na jego wysokość nie zastosowano podstawki. Piny listwy goldpin przechodzą przez otwory w płytce drukowanej i są lutowane po jej drugiej stronie. Wyświetlacze tego typu są bardzo wrażliwe na wyładowania elektrostatyczne, dlatego przed wyjęciem wyświetlacza z opakowania należy

eprasa.pl 17a47aa7e2

sklep.semicon.com.pl
■ Montaż elektroniki ■ Szablony SMT ■ Moduły laserowe
■ Konwerting materiałów ■ Chemia dla elektroniki ■ Podzespoły
■ Komponenty elektroniczne ■ Narzędzia
SEMICON®

się uziemić i unikać jego nadmiernego dotykania, zwłaszcza pinów połączeniowych.

Większość wyświetlaczy LCD jest dostarczana z zamontowaną główną listwą goldpin, jednak trzeba dolutować czteropinową listwę złącza karty SD w miejscu oznaczonym SD-CS itd. Następnie wkładamy wyświetlacz od górnej strony płytki drukowanej i wsuwamy go do oporu, tak aby przylegał do płytki.

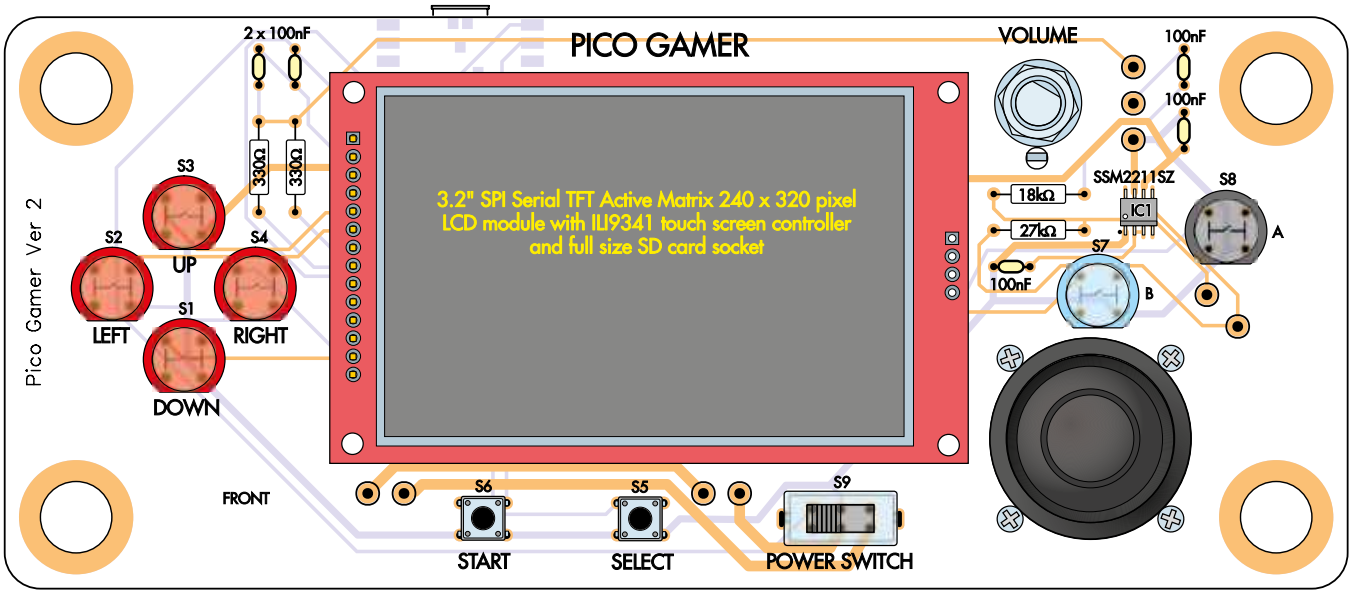
Odwracamy płytkę i tymczasowo umieszczamy ją w górnej części obudowy, upewniając się, że prawidłowo spoczywa na czterech słupkach montażowych. Następnie dociskamy piny listwy wyświetlacza, aż szklana powierzchnia wyświetlacza zrówna się z przednią ramką obudowy. Teraz można przylutować piny i odciąć ich nadmiar.

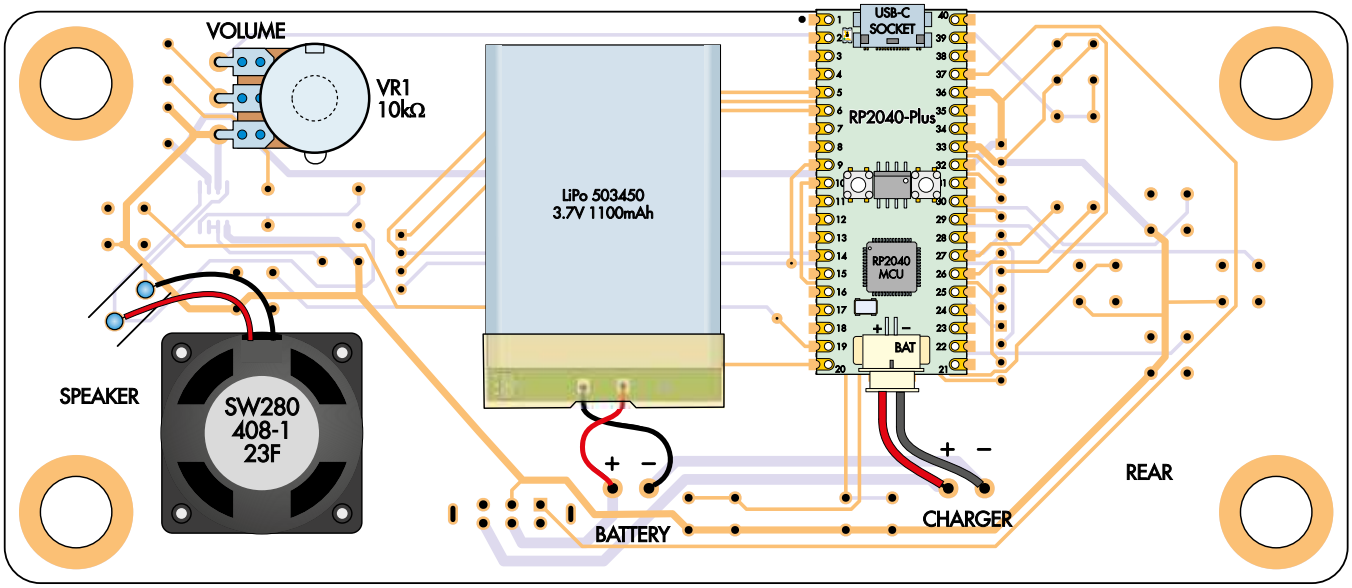
Celem całej operacji jest zapewnienie równego przylegania szkła wyświetlacza do ramki obudowy przy jednoczesnym skompensowaniu niewielkich odchyłek wymiarowych powstających podczas druku 3D. Nie dociskamy wyświetlacza zbyt mocno do obudowy, ponieważ może to pogorszyć działanie panelu dotykowego. Wystarczy, aby szkło wyświetlacza równo przylegało do ramki.

Następnie montujemy potencjometr regulacji głośności, wkładając go od dolnej strony płytki drukowanej, tak aby jego kołek pozycjonujący trafił w przeznaczony dla niego otwór. Dokręcamy nakrętkę nałożoną na podkładkę, mocując potencjometr. Następnie zaginamy jego wyprowadzenia w kierunku płytki drukowanej i lutujemy je bezpośrednio do pól lutowniczych.

Teraz od dolnej strony płytki drukowanej mocujemy głośnik tak, aby przednia strona membrany była skierowana w stronę otworu. Głośnik jest mocowany czterema śrubami maszynowymi M2, wkręcanymi od górnej strony płytki drukowanej. Śruby samogwintują się w otworach montażowych głośnika, dlatego nie są potrzebne nakrętki ani podkładki. Po zamocowaniu głośnika przylutowujemy jego dwa przewody do znajdujących się obok pól lutowniczych.

Następnie montujemy kolorowe przyciski, przyciski START i SEL z długim trzpieniem oraz przełącznik zasilania. Wszystkie te elementy montuje się od górnej strony płytki





Rysunki 2 i 3. Elementy należy zamontować po górnej i dolnej stronie płytki drukowanej. Ponieważ jest ich niewiele, montaż przebiega szybko. Wszystkie elementy są łatwe w montażu. Wzmacniacz akustyczny IC1 jest montowany powierzchniowo, jednak dzięki dużemu rozstawowi wyprowadzeń można je bez problemu lutować pojedynczo.

eprasa.pl 17a47aa7e2

drukowanej. Można użyć przycisków w dowolnych kolorach. Zestawy „Silicon Chip" zawierają przyciski w kolorach pokazanych na zdjęciu. W zestawie z ciemnoszarą lub czarną obudową czarny przycisk został zastąpiony białym, co zapewnia lepszy kontrast.

Na końcu montujemy akumulator. Mocujemy go dwustronną taśmą piankową w zaznaczonym miejscu po dolnej stronie płytki drukowanej. Do zestawów jest dołączona prostokątna podkładka z taśmy piankowej, którą w razie potrzeby można przyciąć do odpowiednich wymiarów.

Akumulator jest zazwyczaj wyposażony w złącze, które należy odciąć, a jego przewody przylutować bezpośrednio do płytki drukowanej. Pamiętajmy, że dostarczany akumulator jest częściowo naładowany, dlatego podczas przycinania przewodów nie wolno ich przypadkowo zewrzeć. Należy przecinać je pojedynczo. Przed przylutowaniem przewodów upewniamy się również, że przełącznik zasilania znajduje się w położeniu wyłączonym. Podczas lutowania należy także uważać, aby żaden z przewodów akumulatora nie zetknął się przypadkowo z drugim przewodem ani z odpowiadającym mu polem lutowniczym.

Jeśli obudowa została wykonana z żywicy 6060 w kolorze złamanej bieli, przed zamontowaniem płytki drukowanej obie jej połówki można pomalować farbą w sprayu na wybrany kolor. Pozwala to nadać konsoli indywidualny wygląd, a jednocześnie chroni tworzywo przed wpływem środowiska, ograniczając jego żółknięcie z upływem czasu.

Połówki obudowy są skręcane czterema śrubami maszynowymi M3 o długości 16 mm. Śruby są wkręcane od dolnej części obudowy i samogwintują się w tworzywie górnej części. Rozwiązanie to sprawdza się dobrze, jednak nie jest na tyle wytrzymałe, aby przetrwać wielokrotny demontaż. Dlatego przed skręceniem obudowy należy przetestować zmontowaną płytkę drukowaną.

Z tyłu Pico Gamera znajdują się złącze USB typu C, służące do ładowania akumulatora oraz podłączania konsoli do komputera w celu aktualizacji oprogramowania lub instalowania nowych gier, a także pełnowymiarowe gniazdo karty SD, umożliwiające rozszerzenie pamięci na gry. Można również używać kart microSD z odpowiednim adapterem.

Wgranie oprogramowania

Instalacja oprogramowania Pico Gamera jest bardzo prosta. Wystarczy nacisnąć lewy przycisk (oznaczony „BOOT") na module RP2040-Plus i, przytrzymując go, podłączyć moduł do komputera za pomocą przewodu USB. Moduł RP2040-Plus zostanie rozpoznany przez komputer jako pamięć masowa USB. Na większości komputerów automatycznie otworzy się okno menedżera plików z zawartością tego dysku, które można zignorować.

Plik z oprogramowaniem Pico Gamera można pobrać ze strony www.siliconchip.au/Shop/6/370. Jego nazwa będzie podobna do PicoGamerV1-2.uf2. Dostępne są dwie wersje – dla modułów z pamięcią FLASH 4 MB i 16 MB. Wybieramy wersję odpowiednią dla używanego modułu. Następnie przeciągamy plik na dysk USB udostępniony przez moduł RP2040-Plus. Po zakończeniu kopiowania Pico Gamer automatycznie uruchomi się ponownie i wyświetli menu główne.

Wgrany plik oprogramowania zawiera wszystko, co jest niezbędne do działania konsoli, w tym interpretator języka BASIC ze wszystkimi wymaganymi ustawieniami, program menu zapisany w gnieździe 1 pamięci FLASH oraz wewnętrzny system plików zawierający wszystkie gry i pliki pomocnicze (grafikę i muzykę). Nie trzeba już niczego instalować ani konfigurować. Można od razu rozpocząć grę!

W przyszłości oprogramowanie konsoli będzie można aktualizować bez otwierania obudowy. Wystarczy podłączyć moduł do komputera za pomocą przewodu USB i, korzystając z programu terminalowego (na przykład Tera Term; przypis redaktora), przerwać działający program, naciskając kombinację klawiszy Ctrl+C, a następnie wydać polecenie:

```
UPDATE FIRMWARE
```

Spowoduje to taki sam efekt, jak otwarcie obudowy i przytrzymanie przycisku BOOT na module RP2040-Plus.

Użytkowanie Pico Gamera

Pierwszą czynnością jest naładowanie akumulatora. W tym celu podłączamy gniazdo USB znajdujące się z tyłu konsoli do ładowarki za pomocą przewodu USB-C i włączamy konsolę. Całkowite naładowanie rozładowanego akumulatora trwa około czterech godzin.

Gdy Pico Gamer pracuje z zasilania akumulatorowego i jest wyświetlane menu główne, w jego dolnym wierszu pokazywany jest przybliżony poziom naładowania akumulatora (wysoki, średni lub niski).

Po wyłączeniu Pico Gamera akumulator zostaje całkowicie odłączony, dzięki czemu może zachować swój poziom naładowania przez bardzo długi czas, nawet rok lub dwa. Ponieważ po wyłączeniu urządzenia akumulator jest odłączany, będzie się on ładował tylko wtedy, gdy konsola jest włączona i podłączona do zasilania.

Z tyłu obudowy znajduje się gniazdo pełnowymiarowej karty SD. Można używać kart o pojemności do 32 GB, sformatowanych w systemie plików FAT16 lub FAT32. Po włożeniu karty do gniazda w menu głównym pojawi się możliwość jej wybrania (przycisk B). Po wybraniu karty SD menu wyświetli znajdujące się na niej katalogi oraz pliki wykonywalne w takim samym formacie, jak

Obudowa w wersji podstawowej ma kolor złamanej bieli, jak widać na zdjęciu. Obudowa pokazana na zdjęciu tytułowym została pomalowana farbą w sprayu w kolorze satynowego bordo. Kolory przycisków można dobrać według własnych upodobań.
Na zdjęciu przedstawiono menu główne wyświetlane po włączeniu Pico Gamera. Przyciskami GÓRA i DÓŁ wybiera się jedną z gier, a przyciskiem SEL uruchamia wybraną pozycję. Po wybraniu katalogu („<DIR>") zostanie wyświetlona jego zawartość. Po włożeniu karty SD będzie również można uruchamiać gry zapisane na tej karcie.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Firma Piekarz Sp. J.
Hurtownia Części Elektronicznych
Tel.: 22-835-50-37
Tel.: 22-835-50-41

w wewnętrznym systemie plików. Do wewnętrznego systemu plików można w każdej chwili powrócić, naciskając przycisk A.

Po włączeniu zasilania konsola uruchamia program menu zapisany w gnieździe 1 pamięci FLASH i wyświetla menu główne. Obsługa menu jest intuicyjna – przyciskami GÓRA i DÓŁ wybiera się grę lub program, a przyciskiem SEL uruchamia wybraną pozycję. Na liście wyświetlane są również podkatalogi, a po wybraniu jednego z nich pokazywana jest jego zawartość.

W większości gier oraz w menu przycisk SEL znajdujący się z przodu, pod wyświetlaczem, służy do wybierania opcji lub wyjścia z bieżącego trybu. Przycisk START służy zazwyczaj do rozpoczynania gry lub wstrzymywania rozgrywki, chociaż jego działanie może się różnić w zależności od gry.

Funkcje pozostałych przycisków zależą od gry. Cztery przyciski kierunkowe po lewej stronie służą zazwyczaj do poruszania się w różnych kierunkach, natomiast przyciski A i B po prawej stronie służą do strzelania, zrzucania bomb lub wykonywania innych podobnych czynności.

Najprostszym sposobem trwałego zainstalowania nowej gry jest skopiowanie jej na kartę SD i włożenie jej do gniazda w Pico Gamerze. Następnie podłączamy moduł do komputera za pomocą przewodu USB i, korzystając z programu terminalowego, przerywamy działanie programu na Pico Gamerze, naciskając kombinację klawiszy Ctrl+C (pełny opis znajduje się w instrukcji modułu PicoMite). Spowoduje to powrót do wiersza poleceń, z którego można skopiować grę do wewnętrznego systemu plików Pico Gamera poleceniem:

```
COPY „B:nazwa_pliku” TO „A:”
```

Aby powrócić do menu, wpisujemy:

```
FLASH RUN 1
```

Skopiowana gra pojawi się w menu.

Tworzenie nowych gier

Jedną z największych zalet Pico Gamera jest możliwość tworzenia własnych gier. Nie jest to trudne, a przy tym może być doskonałą okazją do nauki programowania.

Programy są pisane w języku BASIC, który został zaprojektowany tak, aby był łatwy do nauki. Wersja języka BASIC działająca na Pico Gamerze (MMBasic) udostępnia wiele funkcji służących do wyświetlania grafiki i tekstu oraz odtwarzania dźwięków, w tym muzyki. Aby dowiedzieć się więcej, należy

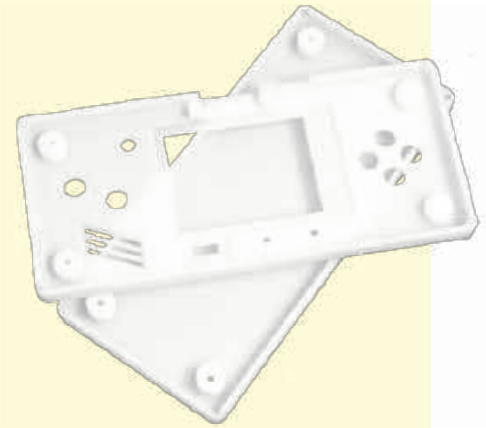
Obudowa wydrukowana w 3D

Takie obudowy wydrukowane w technologii 3D wykorzystano już wcześniej w kilku projektach opublikowanych na łamach czasopisma „Silicon Chip”. Obudowa opisywanej konsoli jest jednak największą i najbardziej złożoną spośród wszystkich dotychczasowych konstrukcji.

Dobra wiadomość jest taka, że obudowę można nie tylko kupić w ramach zestawu oferowanego przez „Silicon Chip”, ale także zamówić w jednej z firm świadczących usługi druku 3D. Firmy te korzystają z profesjonalnych urządzeń oraz szerokiej gamy materiałów, dzięki czemu mogą zapewnić bardzo wysoką jakość wykonania.

Dawniej płytki drukowane wykonywaliśmy samodzielnie, wycinając je, trawiąc i wiercąc otwory. Obecnie robi to już niewiele osób, ponieważ wyspecjalizowane firmy oferują płytki drukowane wysokiej jakości w bardzo konkurencyjnych cenach. Tą samą drogą zaczyna podążać również technologia druku 3D.

Obudowa wykonana na zamówienie ma wiele zalet w porównaniu z typową obudową z tworzywa ABS. Przede wszystkim ma wymiary idealnie dopasowane do konkretnego projektu. Może mieć zaokrąglony, ergonomiczny kształt. Można w niej również precyzyjnie wykonać wszystkie otwory i wycięcia, uzyskując ich idealny kształt. Nie ma postrzępionych krawędzi, jakie często powstają podczas ręcznej obróbki. Kolejną zaletą jest możliwość wykonania cienkiej ramki otaczającej wyświetlacz LCD w sposób zapewniający profesjonalny wygląd. Wykonanie takiej ramki metodami ręcznymi od dawna stanowiło problem. Uzyskanie idealnie cienkiej prostokątnej ramki jest trudne, natomiast przy zastosowaniu technologii druku 3D można to osiągnąć bez większych trudności.



Obudowa wykonana przez firmę JLCPCB w technologii stereolitografii (SLA) z żywicy LEDO 6060.

Wydrukowanie średniej wielkości obudowy w technologii 3D kosztuje zazwyczaj 20...50 dolarów. Jest to rozsądna cena, biorąc pod uwagę, że otrzymujemy obudowę dokładnie odpowiadającą naszym wymaganiom, z wszystkimi otworami i pozostałymi elementami wykonanymi zgodnie z projektem.

Oprogramowanie do projektowania 3D

Jeśli chcecie samodzielnie zaprojektować obudowę, musicie najpierw zdecydować, z jakiego programu do modelowania 3D będziecie korzystać. Do wyboru jest wiele darmowych programów. Niestety wiele z nich nie jest tak intuicyjnych w obsłudze ani tak dopracowanych jak nowoczesne programy do projektowania płytek drukowanych. Wśród godnych polecenia programów można wymienić Tinkercad, działający w przeglądarce i przeznaczony dla początkujących oraz do zastosowań edukacyjnych, a także bardziej zaawansowany Blender. Jest to darmowy program typu open source. Oferuje ogromne możliwości i pozwala praktycznie na wszystko, jednak jego opanowanie wymaga sporo wysiłku. Początkujący użytkownicy szybko natrafią na liczne pułapki i mało intuicyjne operacje.

Ostatecznie zdecydowaliśmy się na Blendera, ponieważ chcieliśmy wykonać płynne zaokrąglenia narożników obudowy oraz rozmieszczać jej elementy z dokładnością do ułamka milimetra. Opanowanie obsługi tego programu kosztowało nas jednak sporo wysiłku.

Jeśli planujecie zaprojektować obudowę konsoli w Blenderze, polecamy film instruktażowy: https://youtu.be/rN-HMVTB7nk. Obejmuje on większość zagadnień, które warto poznać na początku pracy z tym programem.

Wykonywanie obudowy

Po zakończeniu projektowania obudowę można wyeksportować do pliku STL i przesłać go do wybranego usługodawcy. Firm oferujących druk 3D jest wiele i działają one w różnych krajach.

My skorzystaliśmy z usług chińskiej firmy JLCPCB, znanej przede wszystkim z produkcji płytek drukowanych, która obecnie oferuje również usługi druku 3D. W jej ofercie znajdują się różne technologie i materiały, w tym także druk 3D w metalu.

Do wykonania prototypu wybraliśmy technologię stereolitografii (SLA) z wykorzystaniem żywicy LEDO 6060. Jest to jedna z najbardziej ekonomicznych technologii. Uzyskaliśmy bardzo dobry rezultat – wszystkie specjalne elementy obudowy zostały wykonane z dużą precyzją.

eprasa.pl 17a47aa7e2

pobrać instrukcję PicoMite, dostępną na dole strony https://geoffg.net/picomite.html.

Na forum The Back Shed działa aktywna społeczność osób tworzących gry dla Game*Mite i Pico Gamera oraz udostępniających je innym użytkownikom (www.thebackshed.com/forum/Microcontrollers). Jeśli napiszecie własną grę, koniecznie dołączcie do forum i opublikujcie ją, aby inni również mogli z niej skorzystać.

Najwygodniejszym sposobem tworzenia gier jest podłączenie Pico Gamera do komputera za pomocą przewodu USB. Następnie, korzystając z programu terminalowego (na przykład Tera Term), uzyskujemy dostęp do konsoli PicoMite i wprowadzamy program za pomocą edytora wbudowanego w MMBasic. Więcej informacji o korzystaniu z edytora znajduje się w podręczniku użytkownika PicoMite. Jest to bardzo wygodny sposób tworzenia programów, umożliwiający szybkie przełączanie między ich edytowaniem i uruchamianiem.

Innym rozwiązaniem jest program MMEdit działający na komputerach PC. Umożliwia on edycję programu na komputerze, a następnie przesłanie go przez USB do Pico Gamera i uruchomienie jednym naciśnięciem klawisza. Program MMEdit, napisany przez Jima Hileya z Tasmanii, można pobrać ze strony www.c-com.com.au/MMedit.htm.

Wykrywanie naciśnięć przycisków

Podczas pisania gier dla Pico Gamera należy pamiętać o kilku kwestiach. Pierwszą z nich jest sposób wykrywania naciśnięć przycisków.

Osiem przycisków konsoli jest podłączonych do linii wejścia/wyjścia GP8...GP15 (fizyczne piny 11...20). Po naciśnięciu przycisku odpowiadająca mu linia zostaje zwarta do masy, czyli przyjmuje stan niski (logiczne zero). Pierwszą czynnością wykonywaną przez program powinno być skonfigurowanie tych linii jako wejść cyfrowych z włączonymi wewnętrznymi rezystorami podciągającymi. Na przykład:

```
For i = 11 To 20
 On Error Skip
 SetPin i, Din, PullUp
Next i
```

Polecenie On Error Skip („pomiń błąd") jest niezbędne, ponieważ niektóre fizyczne piny w tym zakresie są połączone z masą i MMBasic zgłosi błąd, jeśli program będzie próbował skonfigurować je jako wejścia. Można również zmodyfikować program tak, aby pomijał instrukcję SetPin dla wartości i = 13 oraz i = 18.

Aby łatwo sprawdzać, który przycisk został naciśnięty, warto zdefiniować zestaw stałych odpowiadających numerom fizycznych pinów:

```
Const bDOWN = 11
Const bLEFT = 12
Const bUP = 14
Const bRIGHT = 15
Const bSELECT = 16
Const bSTART = 17
Const bB = 19
Const bA = 20
```

Dzięki temu w programie można w prosty sposób sprawdzać stan poszczególnych przycisków (stan niski oznacza, że przycisk został naciśnięty). Na przykład:

```
If Pin(bDOWN) = 0 Then , down
button pressed
If Pin(bLEFT) = 0 Then , left
button pressed
```

Powrót do menu głównego

Drugą funkcją, którą muszą realizować wszystkie programy, jest powrót do menu głównego po zakończeniu gry. W tym celu należy umieścić w odpowiednim miejscu programu następujące polecenie:

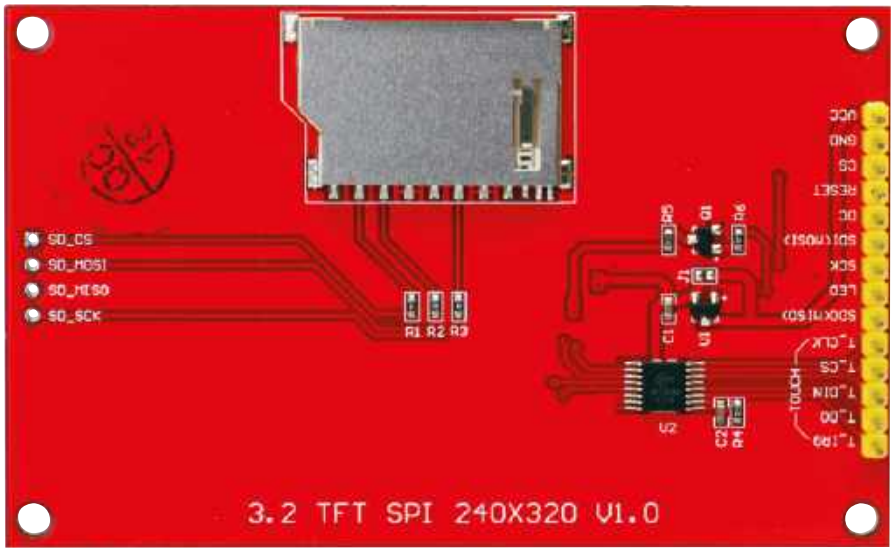
```
Flash Run 1
```

Po wykonaniu tego polecenia MMBasic natychmiast przekaże sterowanie programowi menu zapisanemu w gnieździe 1 pamięci FLASH.

Ostatnim etapem tworzenia gry jest zainstalowanie jej na konsoli. W tym celu wystarczy skopiować plik programu do katalogu /GameMite na dysku A:, czyli do wewnętrznego systemu plików. Można użyć polecenia XModem lub skopiować plik na kartę SD, a następnie przenieść go do pamięci wewnętrznej konsoli. Po uruchomieniu program menu przeskanuje dysk A:, wykryje nowy program i doda go do listy menu.

I oto otrzymaliśmy nowoczesną przenośną konsolę do gier, która wręcz zachęca do tworzenia własnych gier. Aktualizacje oprogramowania są dostępne na stronie http://geoffg.net/picogamer.html. ■

Geoff Graham



Rysunek 4. Tak powinien wyglądać wyświetlacz LCD przeznaczony do Pico Gamera. Wyświetlacze tego typu można kupić na eBayu i AliExpress. Przed zakupem należy jednak sprawdzić, czy zdjęcie zamieszczone przez sprzedawcę odpowiada przedstawionemu wyżej wyświetlaczowi. Niektóre wersje różnią się konstrukcją i nie będą pasować do tej płytki drukowanej. W górnej części naszego wyświetlacza, wzdłuż panelu dotykowego, znajduje się napis „HR4 8637S G6/2".

Materiały dodatkowe dostępne są na stronie Silicon Chip:
https://www.siliconchip.com.au/Shop/20/6911

Materiały dodatkowe są również dostępne na stronie elportal.pl/do-pobrania

Artykuł reprodukowano na podstawie umowy z magazynem „Silicon Chip", 2022.
www.siliconchip.com.au

eprasa.pl 17a47aa7e2

TAWOIA Glass (szkło kwarcowe)

https://sklep.avt.pl/pl/menu/tawoia-glass-4505.html

BESTSELLERY sklepu AVT – sklep.avt.pl

3 unikalne serie gniazdek i włączników

Rabat dla Czytelników EdW
przy zakupie podaj kod EdW2505GW

Kod ważny do 30.09.2025

-5%

Rabat dla Prenumeratorów EdW
przy zakupie podaj numer prenumeraty

-10%

Ceramic Loft (ceramika)

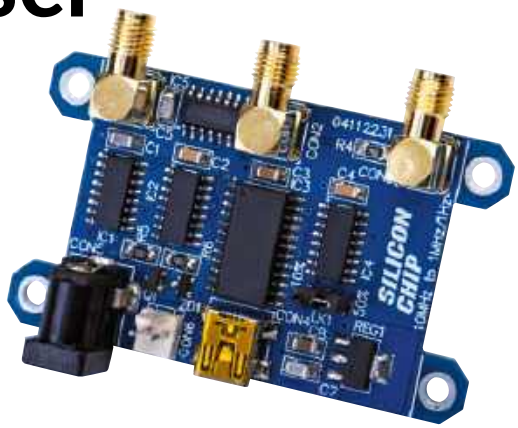
https://sklep.avt.pl/pl/menu/seria-ceramic-loft-4190.html

Retro PRL (bakelit)

https://sklep.avt.pl/pl/series/retro-prl-3237.html

eprasa.pl 17a47aa7e2

Dzielnik częstotliwości wzorcowej 10 MHz



Przedstawiony układ to niewielka płytka, która przekształca sygnał wzorcowy o częstotliwości 10 MHz (pochodzący np. z oscyloskopu) na sygnały o częstotliwościach 1 MHz i 1 Hz. Ten drugi, o współczynniku wypełnienia 10% lub 50%, symuluje sygnał 1PPS dostępny na wyjściu odbiornika GPS.

Jest to prosty układ, który z sygnału o częstotliwości 10 MHz wytwarza precyzyjny sygnał 1 Hz, cechujący się wyjątkowo małym jitterem (wahaniami fazy). Znajdzie wiele zastosowań, na przykład podczas testowania zegarów i innych urządzeń synchronizowanych sygnałem GPS. Można go również wykorzystać do taktowania kilku układów z jednego dokładnego źródła sygnału wzorcowego lub do uzyskania bardzo dokładnego sygnału 1 Hz z niedrogiego generatora kwarcowego z kompensacją temperaturową (TCXO) o częstotliwości 10 MHz.

W dzielniku zastosowano jedynie cztery scalone układy logiczne, w tym nieco nietypowy układ 74HC4059, a ponadto ultraszybki komparator oraz bufor wyjściowy. Układ może być zasilany napięciem 5 V z portu USB lub napięciem 6,6 V...12 V z zasilacza napięcia stałego. Pobiera jedynie około 10 mA. Zawiera zabezpieczenia przed odwróceniem polaryzacji zasilania oraz przed przeciążeniem wejścia. Sygnał wyjściowy nie jest generowany, jeśli na wejściu nie ma sygnału.

Współczynnik wypełnienia sygnału wyjściowego o częstotliwości 1 Hz – 10% lub 50% – można wybrać zworką. Jitter tego sygnału jest wyjątkowo mały, o ile sygnał wejściowy jest dostatecznie czysty. Wyjściem 10 MHz dysponuje wiele przyrządów pomiarowych. Można też użyć jednego z generatorów synchronizowanych sygnałem GPS, prezentowanych na łamach „Silicon Chip":

- „Generator synchronizowany sygnałem GPS"; Silicon Chip, maj 2023 r.; www.siliconchip.au/Article/15781
- „Źródło częstotliwości odniesienia synchronizowane z GPS"; Silicon Chip, październik i listopad 2021 r.; www.siliconchip.au/Series/326
- „Źródło częstotliwości odniesienia oparte na GPS"; Silicon Chip, marzec...maj 2007 r. i wrzesień 2011 r.; www.siliconchip.au/Series/57

Szczegóły układu

Schemat układu przedstawiono na **rysunku 1**. Staraliśmy się, aby układ był prosty i tani, a jednocześnie zapewniał dobre parametry. Sygnał 10 MHz jest doprowadzany do złącza SMA (CON1), skąd trafia do stopnia wejściowego opartego na ultraszybkim komparatorze IC6 (TLV3501).

TLV3501 to interesujący układ. Pracuje przy napięciu zasilania 2,7 V...5,5 V, pobierając zaledwie 3,2 mA prądu, a mimo to charakteryzuje się wyjątkowo małym prądem polaryzacji wejść (typowo ±2 pA), niewielkim napięciem niezrównoważenia wejść (typowo ±1 mV) oraz bardzo dużą szybkością działania – jego maksymalna częstotliwość przełączania wynosi 80 MHz. Dzięki tym właściwościom nadaje się do wielu zastosowań.

W naszym układzie zadaniem tego komparatora jest przekształcenie sygnału wejściowego (np. sinusoidalnego) o stosunkowo małej amplitudzie w sygnał prostokątny o amplitudzie 5 V. Układ dzielnika nie jest zatem zbyt wrażliwy na kształt sygnału wejściowego. Musi to być sygnał o częstotliwości 10 MHz i wartości skutecznej co najmniej 10 mV (35 mV międzyszczytowej). Najczęściej będzie to przebieg sinusoidalny lub prostokątny.

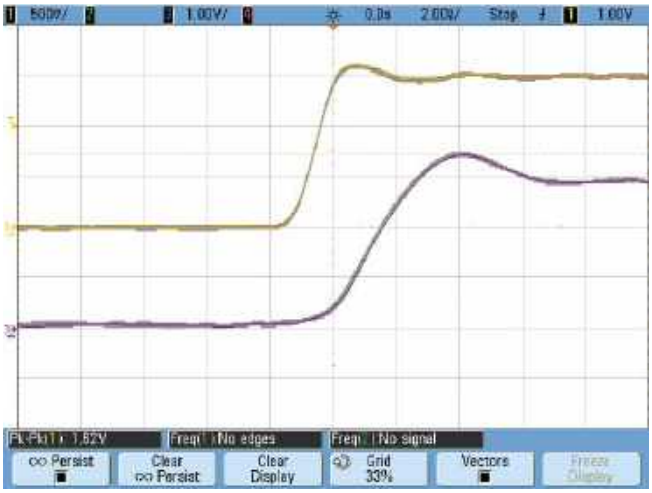
Układ został zaprojektowany dla źródła i odbiornika o impedancji 75 Ω, choć w razie potrzeby można to zmienić

Parametry dzielnika częstotliwości:

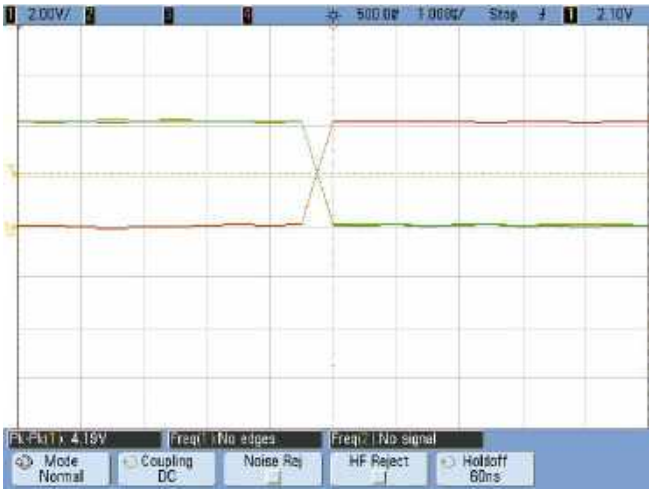
- podział częstotliwości wejściowej (znamionowo 10 MHz) przez 10 (1 MHz) i 10^7 (1 Hz)
- wyjście 1 Hz: współczynnik wypełnienia 10% lub 50%, napięcie wyjściowe 5 V_{pp} (bez obciążenia)
- poziom sygnału wejściowego:
- dopuszczalny: 10 mV_{sk}...3,2 V_{sk} (28 mV_{pp}...9 V_{pp})
- zalecany: 35 mV_{sk}...2 V_{sk} (100 mV_{pp}...5,6 V_{pp})
- jitter: szacunkowo 0,1 ns przy czystym sygnale wejściowym (oscylogram 1)
- opóźnienie propagacji: około 100 ns
- wysoka odporność na zakłócenia dzięki histerezie wejściowej 23,5 mV
- sygnały wyjściowe są zgodne w fazie z sygnałem wejściowym
- na wyjściach nie ma sygnału, jeśli wejście nie jest wysterowane
- złącza SMA na wejściu i wyjściach
- możliwość wyboru impedancji wejściowej i wyjściowej: 50 Ω lub 75 Ω
- zasilanie: 5 V...12 V napięcia stałego, pobór prądu około 10 mA
- złącza zasilania: USB typu C, gniazdo zasilania DC 2,1 mm/2,5 mm, złącze pinowe (polaryzowane)
- cztery otwory montażowe o średnicy 3 mm (płytkę można zmniejszyć, odcinając je)

Płytka prototypowa. Jest bardzo zbliżona do wersji ostatecznej. Brakuje na niej jedynie diody LED sygnalizującej zasilanie, a zamiast obecnie bardziej rozpowszechnionego złącza USB typu C zastosowano gniazdo mini USB typu B.

eprasa.pl 17a47aa7e2



Oscylogram 1. Przebieg żółty przedstawia sygnał wyjściowy 1 Hz (o amplitudzie zmniejszonej z powodu niższego napięcia zasilania i obciążenia rezystancją 50 Ω), a przebieg fioletowy – sygnał odniesienia 10 MHz z oscyloskopu. Rozmycie przebiegów wynika z wyświetlenia około 50 ostatnich przebiegów. Przypis redaktora: użyto funkcji „persistence" („trwałość") oscyloskopu. Niewielkie rozmycie wskazuje na bardzo małe wahania przesunięcia fazowego między przebiegami, a więc niewielki jitter. Może się wydawać, że zbocze sygnału wyjściowego pojawia się wcześniej. Wynika to z tego, że opóźnienie propagacji jest nieco mniejsze od okresu sygnału wejściowego (100 ns), a wyzwalanie oscylogramu nastąpiło od poprzedniego zbocza tego sygnału.



Oscylogram 2. Aby sprawdzić, czy podział częstotliwości jest prawidłowy, na oscyloskopie zarejestrowaliśmy trzykrotnie sygnał wyjściowy w przedziale dwóch sekund, a następnie zmierzyliśmy odstęp czasu między zboczami. Widzimy trzy przebiegi nałożone na siebie, wyzwolone z różnymi opóźnieniami: żółty (–500 ms), czerwony (0 ms) i zielony (+500 ms). Przebiegi żółty i zielony idealnie się pokrywają, co dowodzi, że dzieli je dokładnie jedna sekunda odmierzona przez podstawę czasu oscyloskopu (czyli częstotliwość odniesienia 10 MHz). Ponieważ każdorazowo rejestrowaliśmy przebieg przez dwie sekundy, rozdzielczość czasowa jest mniejsza niż w przypadku oscylogramu 1.

(np. stosując zamiast rezystorów 75 Ω rezystory 49,9 Ω lub 51 Ω). Na wejściu zastosowano rezystor dopasowujący 75 Ω. Sygnał jest następnie doprowadzany do komparatora IC6 przez kondensator 1 nF blokujący składową stałą oraz rezystor szeregowy 220 Ω.

Podwójna dioda Schottky'ego D1 ogranicza sygnał wejściowy do zakresu ±0,3 V względem napięć zasilających, chroniąc układ scalony IC6 przed zbyt wysokim napięciem wejściowym oraz przed skutkami podania sygnału przy wyłączonym zasilaniu. Rezystor 220 Ω służy przede wszystkim do ograniczenia prądu płynącego przez diodę D1, chroniąc ją oraz pozostałą część układu przed nadmiernym „wpompowywaniem" prądu do linii zasilania 5 V.

Ponieważ sygnał wejściowy jest sprzężony z układem IC6 przez kondensator, wejście tego układu jest polaryzowane napięciem stałym równym połowie napięcia zasilania 5 V. Realizuje to dzielnik złożony z dwóch rezystorów 10 kΩ oraz rezystora polaryzującego 47 kΩ. Kondensator 100 nF w tym dzielniku zapobiega przedostawaniu się tętnień zasilania do sygnału wejściowego, co mogłoby spowodować wzrost jitteru.

Rezystor o wartości 10 MΩ, połączony między wyjściem 6 układu IC6 a jego wejściem nieodwracającym (pin 3), zapewnia histerezę o wartości około 23,5 mV, co zwiększa odporność układu na zakłócenia. Wraz z rezystorem polaryzującym 47 kΩ tworzy on dzielnik napięcia. Na rezystorze histerezy występuje spadek napięcia około 2,5 V (niezależnie od tego, czy na wyjściu komparatora IC6 jest 5 V, czy 0 V), dlatego płynie przez niego prąd o natężeniu około 0,25 μA. Prąd ten, przepływając następnie przez rezystor 47 kΩ, powoduje spadek napięcia przesuwający potencjał wejścia o około 11,75 mV.

Przesunięcie to zmienia znak przy każdej zmianie stanu wyjścia układu IC6. Oznacza to, że zakłócenie nałożone na sygnał wejściowy musiałoby przekroczyć 23,5 mV_{pp}, aby spowodować niepożądaną zmianę stanu wyjścia komparatora. Jednocześnie do układu musi być doprowadzony sygnał o wartości międzyszczytowej co najmniej 23,5 mV_{pp}, w przeciwnym razie wyjście komparatora nie będzie się przełączać. Dzięki temu przy braku sygnału na złączu CON1 układ dzielnika nie będzie pasożytniczo oscylował.

Za sprawą filtru dolnoprzepustowego utworzonego przez rezystor 220 Ω, pojemność wejściową układu IC6 oraz pojemność obu diod układu D1 minimalny sygnał na wejściu CON1, przy którym układ zacznie reagować, wynosi około 30 mV_{pp}. Aby zapewnić pracę bez dodatkowego jitteru, zaleca się jednak stosowanie sygnału o większej amplitudzie. Osiągnięcie wartości 30 mV_{pp} na złączu CON1 oznacza, że napięcie źródła sygnału musi być większe i przy impedancji wyjściowej 75 Ω wynosić około 60 mV_{pp}.

Dzielnik częstotliwości

Za układem scalonym IC6 mamy już czysty sygnał prostokątny o częstotliwości 10 MHz. Jest on podawany na wejście pierwszego dzielnika częstotliwości (IC1). Jest to dziesiętny licznik Johnsona 74HC4017 – wersja starego, dobrego układu 4017, przystosowana do pracy przy niższym napięciu zasilania i większej częstotliwości. Ten tani układ może być zasilany napięciem od 2 V do 6 V, a przy zasilaniu 5 V pracuje z częstotliwością do 77 MHz. Zawiera dziesięć wyjść, na których występują przebiegi o wypełnieniu 10% i różnych przesunięciach fazowych. Ma także jedno wyjście o wypełnieniu 50% i fazie zgodnej z fazą sygnału wejściowego (oraz fazą wyjścia Q0). W naszym układzie na wejście zegarowe tego licznika (pin 14) podajemy sygnał 10 MHz i na wyjściu Q5-Q9 uzyskujemy czysty przebieg prostokątny o częstotliwości 1 MHz. Wejście MR (Master Reset) jest stale utrzymywane w stanie niskim, co zapewnia ciągłą pracę licznika. Nie używamy wejścia odwracającego sygnału zegarowego (pin 13), dlatego również jest ono utrzymywane w stanie niskim. Wyjścia o różnych przesunięciach fazowych (Q0...Q9) nie są w tym układzie wykorzystywane.

Sygnał o częstotliwości 1 MHz z pinu 12 jest kierowany w dwa miejsca. Po pierwsze do trzech z sześciu buforów układu IC5, połączonych równolegle, a następnie, poprzez rezystor 75 Ω dopasowujący impedancję, do wyjścia 1 MHz w złączu SMA (CON2). Układ MC74VHCT50A ma taki sam układ wyprowadzeń jak sześciokrotny inwerter 74HC04, z tą różnicą, że nie odwraca sygnałów, lecz jedynie je buforuje. Dzięki

eprasa.pl 17a47aa7e2

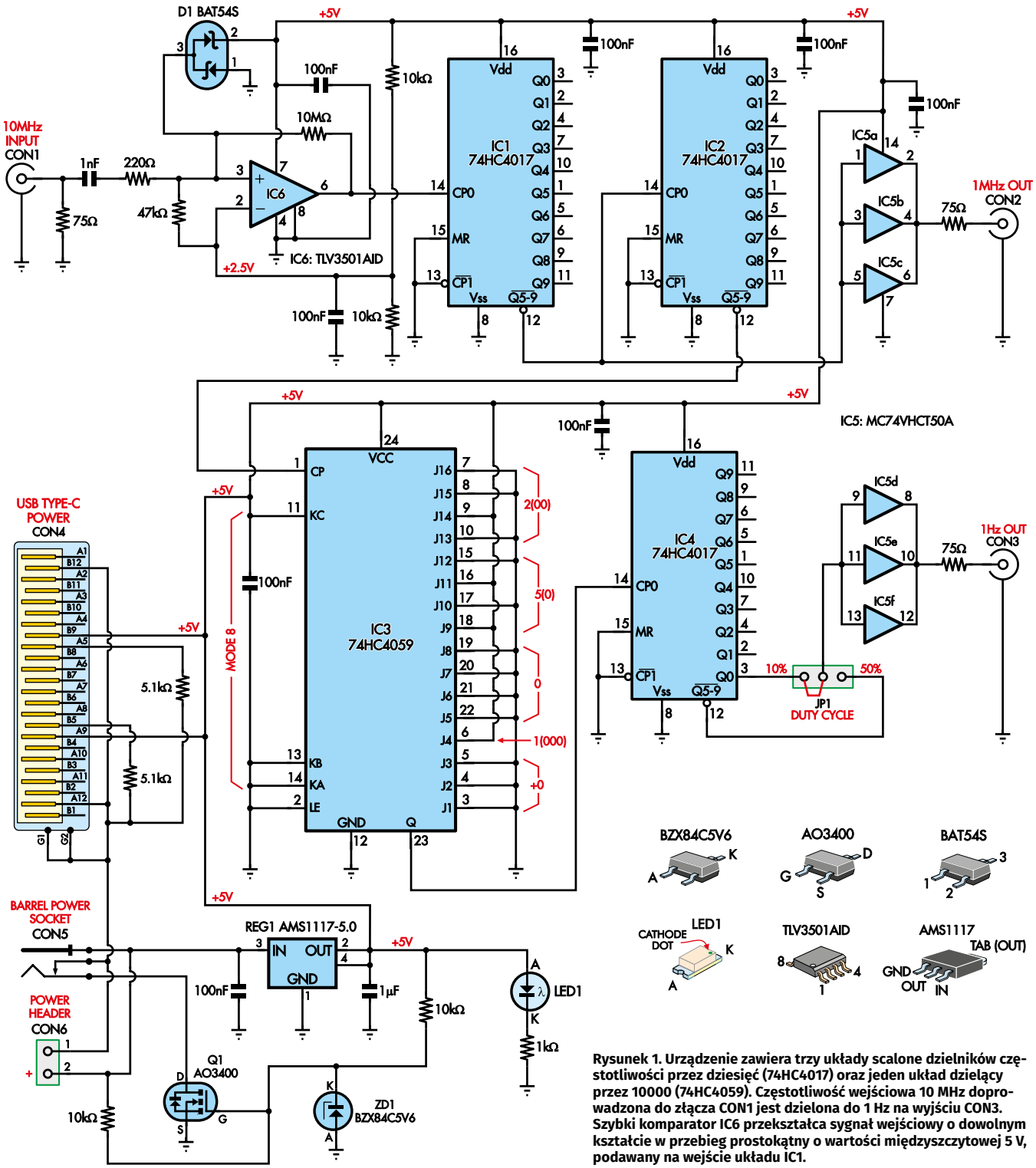
temu sygnały wyjściowe są zgodne w fazie z sygnałem wejściowym 10 MHz.

Po drugie, sygnał 1 MHz z układu IC1 trafia do drugiego licznika 74HC4017 (IC2), podłączonego identycznie jak IC1. Licznik wytwarza na wyjściu (pin 12) przebieg prostokątny o częstotliwości 100 kHz, który trafia na wejście zegarowe (CP, pin 1) układu scalonego 74HC4059 (IC3).

Ten układ stanowi „gwóźdź programu". Jest skonfigurowany do dzielenia częstotliwości wejściowej przez 10000. Jest większy od pozostałych układów – ma 24 piny zamiast 16 – i nieco droższy (choć nadal stosunkowo niedrogi). Zajmuje jednak mniej miejsca niż cztery układy 74HC4017 i charakteryzuje się znacznie mniejszym opóźnieniem propagacji.

Stanami logicznymi na pinach KA...KC i J1...J16 można skonfigurować ten układ na tysiące sposobów, uzyskując różne współczynniki podziału częstotliwości. Sposób, w jaki zastosowana konfiguracja zapewnia współczynnik podziału 10000:1, wyjaśniono w ramce.

Można było zastosować na tej płytce mikrokontroler, który sterowałby wspomnianymi



Rysunek 1. Urządzenie zawiera trzy układy scalone dzielników częstotliwości przez dziesięć (74HC4017) oraz jeden układ dzielący przez 10000 (74HC4059). Częstotliwość wejściowa 10 MHz doprowadzona do złącza CON1 jest dzielona do 1 Hz na wyjściu CON3. Szybki komparator IC6 przekształca sygnał wejściowy o dowolnym kształcie w przebieg prostokątny o wartości międzyszczytowej 5 V, podawany na wejście układu IC1.

eprasa.pl 17a47aa7e2

pinami i umożliwiał wybór kilku różnych współczynników podziału. Uznaliśmy jednak, że lepiej zachować prostotę układu i uniknąć programowania.

Układ IC3 zawiera na wyjściu przerzutnik typu latch („zatrzask"). Nie jest on wykorzystywany, dlatego wejście zatrzaskujące (LE, pin 2) jest dołączone do masy. Na pinie 23 (Q) pojawia się sygnał o częstotliwości 10 Hz. Należy jednak pamiętać, że na tym wyjściu stan wysoki trwa tylko przez jeden okres sygnału wejściowego. Przy częstotliwości 100 kHz na wejściu impulsy wyjściowe mają szerokość 10 µs. Dlatego wcześniej podzieliliśmy częstotliwość 10 MHz przez 100 – w przeciwnym razie impulsy wyjściowe miałyby szerokość zaledwie 100 ns.

Aby krótkie impulsy stały się użyteczne, podajemy je na wejście końcowego licznika (IC4), czyli kolejnego układu 74HC4017 skonfigurowanego podobnie jak pozostałe. Układ ten wykonuje końcowy podział częstotliwości, uzyskując sygnał o częstotliwości 1 Hz, a jednocześnie przekształca krótkie impulsy w przebieg prostokątny o współczynniku wypełnienia 50% na wyjściu (pin 12).

Sygnał ten, a także drugi o tej samej częstotliwości, lecz krótszych impulsach (wypełnienie 10%), z wyjścia Q0 podajemy do trzypinowego złącza typu goldpin. Za pomocą zworki można wybrać pożądany współczynnik wypełnienia. Sygnał ze złącza jest podawany do drugiego trzykrotnego bufora (IC5d...IC5f), a następnie, poprzez rezystor 75 Ω dopasowujący impedancję, do złącza SMA (CON3).

Przebieg o wypełnieniu 10% lepiej odwzorowuje sygnał 1PPS odbiornika GPS, natomiast symetryczny przebieg o wypełnieniu 50% doskonale nadaje się do taktowania układów cyfrowych.

Programowany dzielnik częstotliwości CD74HC4059

Układ ten jest dość złożony. Składa się z podzielnika wstępnego (preskalera) oraz licznika głównego (dziesiętnego, trzy- lub czterocyfrowego), które można konfigurować na różne sposoby.

Preskaler może pracować w jednym z pięciu trybów, dzieląc częstotliwość przez współczynnik od 1 do 10. Wybór trybu pracy preskalera wpływa jednak na dopuszczalne wartości najwyższej cyfry (tysięcy) licznika głównego.

Jeśli na przykład preskaler dzieli przez 10, licznik główny ma tylko trzy cyfry (maksymalny współczynnik podziału wynosi wtedy 999). Przy pozostałych współczynnikach podziału preskalera licznik główny jest czterocyfrowy. Im mniejszy współczynnik podziału preskalera, tym większa liczba dostępnych konfiguracji.

Trzy najmłodsze cyfry licznika głównego mogą zawsze przyjmować wartości z zakresu 0...9. W zależności od wybranego trybu maksymalny współczynnik podziału wynosi 9999 (gdy preskaler pracuje z podziałem przez 10) lub 15999 (gdy preskaler dzieli przez potęgę dwójki).

W rzeczywistości możliwe jest uzyskanie znacznie większego współczynnika podziału, ponieważ stopnie licznika dziesiętnego (BCD – binary coded decimal), które na pierwszy rzut oka wydają się zliczać tylko do 10, są w rzeczywistości pełnymi licznikami dwójkowymi i mogą zliczać do 16. Układ można skonfigurować tak, aby dzielił przez współczynnik o maksymalnej wartości 21327, choć jego konfiguracja jest nieco skomplikowana.

Używany przez nas współczynnik podziału 10000 jest na szczęście stosunkowo łatwy do uzyskania. Mogliśmy na przykład zastosować preskaler o współczynniku podziału 10, co dawałoby trzy cyfry licznika głównego. Podział przez 1000 przy użyciu trzycyfrowego licznika dziesiętnego wydaje się niemożliwy. Mogliśmy jednak ustawić najwyższą „cyfrę" na 10 (choć w rzeczywistości może ona przyjmować wartości do 15) i w ten sposób uzyskać pożądany współczynnik podziału.

Ostatecznie zastosowaliśmy preskaler o współczynniku podziału 8, co daje cztery cyfry licznika głównego. Co prawda najwyższa cyfra może przyjmować tylko wartości 0 lub 1, nie ma to jednak znaczenia, ponieważ licznik główny ustawiamy na podział przez 1250 (8 × 1250 = 10000).

Preskaler o współczynniku podziału 8 wybiera się, ustawiając niski poziom na wejściach KA i KB oraz wysoki poziom na wejściu KC (**tabela 1**). Najwyższą cyfrę licznika głównego programujemy, ustawiając wejście J4 w stan wysoki (1). Pozostałe trzy cyfry licznika ustawiamy na wartości 2, 5 i 0, jak pokazano w **tabeli 2**.

Z konfigurowaniem licznika wiąże się pewna pułapka. Cyfrę tysięcy ustawia się za pomocą wejść o najniższych numerach (J2...J4), natomiast cyfrę setek – za pomocą wejść o numerach najwyższych (J13...J16). Oznacza to, że cyfry nie są przypisane do wejść w naturalnej kolejności, z wyjątkiem trybu, w którym preskaler może dzielić przez maksymalnie 10.

Zasilanie

Są trzy możliwości zasilania układu. Najprostsza polega na wykorzystaniu gniazda USB typu C (CON4), ponieważ doprowadza ono do układu napięcie 5 V bezpośrednio z portu USB. Należy jednak pamiętać, że połączenie masy tego gniazda jest prowadzone przez przełącznik wbudowany w gniazdo zasilania CON5. Dzięki temu, jeśli oba źródła zasilania zostaną podłączone jednocześnie, napięcie nie będzie podawane do urządzenia podłączonego do gniazda USB.

Gniazdo USB typu C, w przeciwieństwie do typu B, wymaga dołączenia dwóch rezystorów ściągających do masy o wartości 5,1 kΩ, aby źródło zasilania podało napięcie 5 V. Jeśli gniazda tego nie montujemy, rezystorów tych również nie trzeba montować. W naszym przypadku wykorzystujemy jedynie sześć pinów niezbędnych do zasilania i nie korzystamy z pinów służących do przesyłania danych. Nawiasem mówiąc, stosujemy typ C zamiast typu B, ponieważ obecnie jest on standardem i można się spodziewać, że w przyszłości będzie stosowany coraz powszechniej.

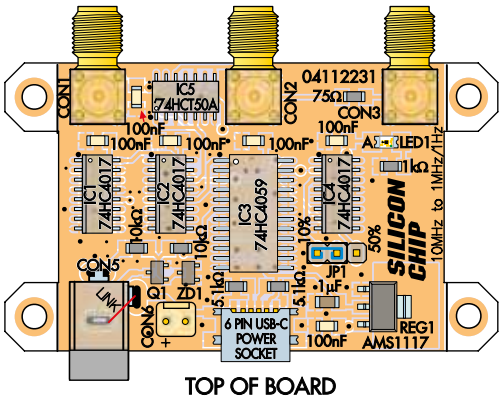
Połączenie masy z gniazda CON4 po przejściu przez wewnętrzny przełącznik w gnieździe CON5 prowadzi również

Tabela 1. Tryby pracy układu 74HC4059

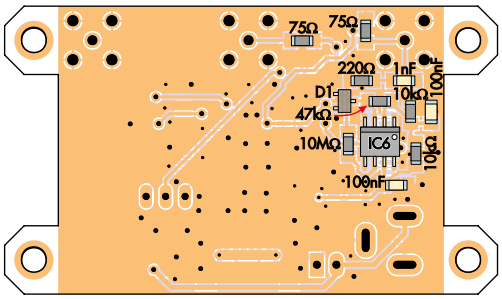
KA	KB	KC	Współczynnik preskalera	Wejścia programujące	Cyfra tysięcy licznika	Wejścia programujące	Maksymalny współczynnik podziału
1	1	1	2:1...1:1	J1	0...7	J2...J4	15999 (rozszerzony: 17 331)
0	1	1	4:1...1:1	J1, J2	0...3	J3, J4	15999 (rozszerzony: 18 663)
1	0	1	5:1...1:1 ◆	J1...J3	0...1	J4	9999 (rozszerzony: 13 329)
0	0	1	8:1...1:1	J1...J3	0...1	J4	15999 (rozszerzony: 21 327)
1	1	0	10:1...1:1	J1...J4	0	-	9999 (rozszerzony: 16 659)

◆ Licznik należy najpierw przełączyć w tryb Master Preset. Po włączeniu zasilania wejścia KB i KC muszą pozostawać w stanie niskim przez trzy okresy sygnału zegarowego.

eprasa.pl 17a47aa7e2



TOP OF BOARD



UNDERNEATH BOARD

Rysunki 2 i 3. Zalecamy najpierw zamontować wszystkie elementy SMD na górnej stronie płytki. Należy przy tym zwrócić szczególną uwagę na prawidłową orientację wszystkich układów scalonych. Montaż złączy SMA, gniazda zasilania oraz pozostałych złączy pozostawiamy na później, gdy zamontujemy elementy na spodniej stronie płytki. Znajduje się na niej mniej elementów – jedynie komparator, elementy bierne i podwójna dioda.

przez tranzystor MOSFET Q1, zanim dotrze do masy całego układu. Zapewnia to zabezpieczenie przed odwróceniem polaryzacji zasilania. W przypadku zasilania z gniazda USB nie byłoby to konieczne, ponieważ samo gniazdo gwarantuje prawidłową polaryzację. Zabezpieczenie jest jednak przydatne przy zasilaniu z gniazda CON5 lub złącza CON6.

Bramka tranzystora Q1 jest dołączona do linii +5 V oraz wejścia zasilania przez rezystory 10 kΩ. Tranzystor przewodzi tylko wtedy, gdy napięcie zasilania ma prawidłową polaryzację. Jeśli polaryzacja zostanie odwrócona, na bramce Q1 pojawi się napięcie ujemne, tranzystor pozostanie wyłączony, a cały układ nie będzie zasilany. Rezystory 10 kΩ w obwodzie bramki zapewniają załączenie tranzystora Q1 niezależnie od tego, czy zasilanie jest doprowadzane przez złącze USB (bezpośrednio napięciem 5 V), czy z jednego z pozostałych wejść poprzez stabilizator LDO 5 V (REG1). Dioda Zenera ZD1 chroni tranzystor Q1 przed uszkodzeniem, ponieważ maksymalne dopuszczalne napięcie między jego bramką a źródłem wynosi ±12 V.

Metoda z wykorzystaniem tranzystora MOSFET charakteryzuje się znacznie mniejszym spadkiem napięcia (kilka miliwoltów) niż zastosowanie diody połączonej szeregowo (300 mV lub więcej). Dzięki temu można zastosować źródło zasilania o napięciu niewiele większym niż 5 V, uzyskując stabilizowane napięcie 5 V na wyjściu stabilizatora REG1.

Konstrukcja

W układzie zastosowano głównie elementy SMD. Pomimo to montaż płytki jest stosunkowo łatwy, ponieważ wszystkie elementy są dość duże. Do dzielnika częstotliwości przygotowano dwustronną płytkę drukowaną (kod 04112231) o wymiarach 64 × 37,5 mm. Elementy należy lutować zgodnie z rysunkami montażowymi (**rysunki 2** i **3**). Proponujemy rozpocząć od zamontowania wszystkich elementów SMD – najpierw po jednej stronie płytki, a następnie po drugiej. Potem montujemy elementy przewlekane, najlepiej zaczynając od strony górnej, ponieważ znajduje się na niej więcej elementów.

Zalecamy montowanie układów IC1...IC5 w kolejności ich numerów. Następnie lutujemy ZD1, Q1, REG1, gniazdo USB (jeśli jest montowane), a na końcu kondensatory i rezystory znajdujące się na górnej stronie płytki.

W przypadku układów scalonych należy przed lutowaniem starannie sprawdzić, czy każdy z nich jest właściwie zorientowany. Większość z nich ma pin 1 oznaczony kropką lub kreską. W razie potrzeby warto posłużyć się lupą. Jak pokazano na rysunku 2 oraz na płytce drukowanej, pin 1 każdego układu jest skierowany ku górnej krawędzi płytki lub – w przypadku układu IC5 – w lewo.

Na stronie górnej znajduje się jeden kondensator o pojemności 1 µF. Pozostałe mają pojemność 100 nF. Jak już wspominaliśmy, rezystorów 5,1 kΩ nie trzeba montować, jeśli nie stosujemy gniazda USB. Pamiętajmy również, że w przeciwieństwie do stosowanych wcześniej gniazd USB typu B, gniazda typu C nie mają pinów pozycjonujących wchodzących w otwory płytki drukowanej. Dlatego przed przylutowaniem więcej niż jednego wyprowadzenia należy starannie ustawić gniazdo względem pól lutowniczych.

Istnieje kilka sposobów lutowania elementów SMD – przy użyciu pasty lutowniczej i gorącego powietrza, pasty lutowniczej i pieca do lutowania rozpływowego, pasty lutowniczej i płyty grzejnej lub wreszcie zwykłej cyny i lutownicy (tak jak robiliśmy to my). Jeśli używamy zwykłej lutownicy, zdecydowanie zalecamy zaopatrzenie się w wysokiej jakości topnik w postaci pasty oraz plecionkę lutowniczą. Bardzo ułatwiają one pracę.

Nie ma jednej „właściwej" metody ręcznego lutowania układów scalonych SMD. My robiliśmy to następująco. Nanosiliśmy niewielką ilość cyny na jedno z pól lutowniczych, a następnie ustawialiśmy na nim układ scalony, cały czas podgrzewając cynę i utrzymując ją w stanie płynnym. Po odłożeniu lutownicy sprawdzaliśmy, czy wszystkie wyprowadzenia układu są wyśrodkowane względem swoich pól lutowniczych. Jeśli nie, ponownie podgrzewaliśmy cynę i delikatnie przesuwaliśmy układ scalony, sprawdzając po każdym przesunięciu jego położenie.

Po ustawieniu układu scalonego przylutowywaliśmy jeszcze kilka wyprowadzeń, a następnie nakładaliśmy cienką warstwę topnika w postaci pasty wzdłuż obu rzędów wyprowadzeń, nabieraliśmy trochę cyny na grot lutownicy i przeciągaliśmy nim wzdłuż wyprowadzeń. Każde z nich pokrywało się odpowiednią ilością cyny, dzięki czemu szybko wykonywaliśmy wszystkie połączenia. Tylko w kilku miejscach pojawił się jej nadmiar, powodując zwarcie między sąsiednimi pinami. Usuwaliśmy je, nakładając nieco więcej topnika w postaci pasty i przykładając plecionkę lutowniczą.

Można również zastosować nieco inną technikę, polegającą na unieruchomieniu układu we właściwym położeniu za pomocą spinacza do bielizny, kleszczyków medycznych lub podobnego narzędzia, a następnie przylutowaniu pozostałych wyprowadzeń. Technika ta wymaga więcej czasu na przygotowanie, ale pozwala uniknąć wielokrotnego poprawiania położenia układu.

Tabela 2. Nasza konfiguracja układu 74HC4059

KA	KB	KC	Ustawienie preskalera (J1-J3)	Tysiące (J4)	Setki (J13-J15)	Dziesiątki (J9-J12)	Jednostki (J5-J8)
0	0	1	0002 (0)	12 (1)	00102 (2)	01012 (5)	00002 (0)

eprasa.pl 17a47aa7e2

Gdy układy scalone są już na miejscu, można tą samą techniką przylutować pozostałe elementy o dwóch i trzech wyprowadzeniach. Należy tylko upewnić się, że pierwsze połączenie zdążyło ostygnąć (co trwa kilka sekund), zanim wykonamy drugie. W przeciwnym razie element może się przypadkowo przesunąć.

Po zamontowaniu wszystkich elementów czyścimy płytkę środkiem do usuwania pozostałości topnika (lub, jeśli go nie mamy, czystym alkoholem), pozostawiamy ją do wyschnięcia, a następnie sprawdzamy wszystkie połączenia lutowane, aby upewnić się, że nie ma niepełnych połączeń ani zwarć między sąsiednimi wyprowadzeniami.

Następnie odwracamy płytkę i lutujemy elementy po drugiej stronie w taki sam sposób.

Na spodzie płytki znajduje się tylko jeden układ scalony (IC6), a ponadto jedna podwójna dioda w trzywyprowadzeniowej obudowie SOT-23 oraz 10 elementów biernych – rezystorów i kondensatorów. Należy zwrócić uwagę na prawidłowe zorientowanie układu IC6. Jego pin 1 powinien być skierowany w stronę najbliższej krawędzi płytki. W pobliżu IC6 znajdują się inne elementy, dlatego najlepiej przylutować najpierw układ IC6, następnie elementy znajdujące się bezpośrednio obok niego, a na końcu te położone dalej. Po zakończeniu ponownie usuwamy pozostałości topnika i sprawdzamy jakość montażu.

Na końcu odwracamy płytkę i przylutowujemy złącza koncentryczne SMA, trzypinowe złącze JP1 oraz gniazdo CON5 lub złącze CON6, w zależności od tego, które z nich będzie wykorzystywane. Jeśli nie montujemy gniazda CON5, należy przylutować krótki przewód łączący, pokazany na czerwono na rysunku 2 i oznaczony na płytce nadrukiem „LINK", w przeciwnym razie płytka nie będzie zasilana.

Pamiętajmy, że jeśli nie potrzebujemy wyjścia 1 MHz, możemy również nie montować złącza CON2.

Wykaz elementów:

1 dwustronna płytka drukowana, 64 × 37,5 mm, kod 04112231
3 złącza SMA, kątowe lub pionowe, do montażu przewlekanego (CON1...CON3)
1 gniazdo USB typu C, SMD, sześciopinowe, wyłącznie do zasilania (CON4) ★
1 gniazdo zasilania DC do montażu na płytce drukowanej (CON5) ★
1 dwupinowe złącze z polaryzacją, raster 2,54 mm (CON6) ★
1 trzy-pinowe złącze „goldpin", raster 2,54 mm (JP1)
1 zworka (JP1)
★ montuje się tylko jedno z tych złączy zasilania

Półprzewodniki

3 szt. (CD)74HC4017 – szybkie dziesiętne liczniki Johnsona CMOS, obudowa SOIC-16 (wąska) (IC1, IC2, IC4)
1 szt. (CD)74HC4059 – szybki programowany licznik CMOS dzielący przez N, obudowa SOIC-24 (szeroka) (IC3)
1 szt. MC74VHCT50A – sześciokrotny nieodwracający bufor CMOS, obudowa SOIC-14 (IC5)
1 szt. TLV3501AID – szybki komparator rail-to-rail, obudowa SOIC-8 (IC6)
1 szt. AMS1117-5.0 lub zgodny – liniowy stabilizator LDO 5 V/1 A, obudowa SOT-223 (REG1)
1 szt. tranzystor MOSFET z kanałem N AO3400 lub równoważny, 30 V/5,8 A, o niskim napięciu progowym bramki, obudowa SOT-23 (Q1)
1 szt. dioda LED, SMD, rozmiar SMA/M3216/1206, dowolnego koloru (LED1)
1 szt. dioda Zenera BZX84C5V6, 5,6 V, tolerancja 1%, obudowa SOT-23 (ZD1)
1 szt. podwójna dioda Schottky'ego BAT54S, obudowa SOT-23 (D1)

Kondensatory (wszystkie ceramiczne, 50 V, dielektryk X7R, SMD, rozmiar M3216/1206)
1 szt. 1 µF 8 szt. 100 nF 1 szt. 1 nF

Rezystory (wszystkie 1%, SMD, rozmiar M3216/1206)
1 szt. 10 MΩ 1 szt. 47 kΩ 4 szt. 10 kΩ 2 szt. 5,1 kΩ (tylko przy montażu gniazda USB)
1 szt. 1 kΩ 1 szt. 220 Ω 3 szt. 49,9 Ω, 51 Ω lub 75 Ω (w zależności od wymaganej impedancji wejściowej i wyjściowej)

Testowanie

Po włączeniu zasilania płytka powinna pobierać prąd mniejszy niż 20 mA. Jeśli dysponujemy zasilaczem laboratoryjnym z ograniczeniem prądu, ustawiamy napięcie 6 V oraz ograniczenie prądu na co najmniej 30 mA, a następnie podłączamy go do CON5 lub CON6. Jeśli zadziała ograniczenie prądu, wyłączamy zasilacz i sprawdzamy, czy nie ma błędów montażowych. Jeśli nie mamy zasilacza laboratoryjnego, używamy zwykłego zasilacza napięcia stałego, włączając w jego obwód multimetr ustawiony na pomiar prądu. Zasilacz wyłączamy, jeśli po włączeniu zasilania prąd gwałtownie wzrośnie.

Jeśli nie dysponujemy również takim zestawem, pozostaje zaryzykować – podłączyć odpowiedni zasilacz i sprawdzić, czy zaświeci się dioda LED1. Jeśli nie, odłączamy zasilanie i próbujemy ustalić przyczynę. Jeśli dioda LED1 świeci, przechodzimy do kolejnego etapu.

Jeśli pobór prądu układu jest prawidłowy, sprawdzamy napięcie między obudową jednego ze złączy SMA (masa) a największym wyprowadzeniem stabilizatora REG1. Powinno ono wynosić około 5 V. Jeśli jest mniejsze niż 4,75 V lub większe niż 5,25 V, sprawdzamy jakość lutowania układu REG1 oraz sąsiadujących z nim kondensatorów odsprzęgających i filtrujących.

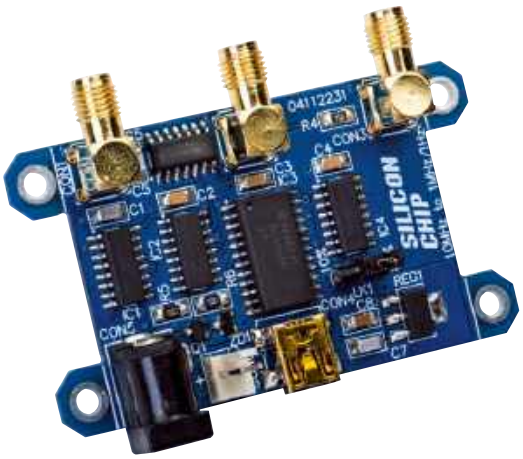
Jeśli układ nie pobiera prądu i dioda LED nie świeci, to prawdopodobnie nie przewodzi tranzystor Q1. Można to sprawdzić, mierząc napięcie między ujemnym biegunem zasilania a obudową jednego ze złączy SMA. Powinno ono być bardzo małe. Jeśli natomiast zmierzymy pełne napięcie zasilania, sprawdzamy, czy zasilanie zostało podłączone z zachowaniem właściwej polaryzacji. Jeśli tak, usterki należy szukać w obwodzie tranzystora Q1 lub diody ZD1.

I w końcu, jeśli pobór prądu jest prawidłowy, a napięcie linii zasilania +5 V jest bliskie 5 V, podajemy do złącza CON1 sygnał o znanej częstotliwości i sprawdzamy, czy na złączu CON2 występuje sygnał o częstotliwości dziesięciokrotnie mniejszej. Jeśli złącze CON2 nie zostało zamontowane, sygnał można zmierzyć na jego środkowym styku. Jeżeli wszystko się zgadza, podajemy do CON1 sygnał 10 MHz i sprawdzamy, czy na złączu CON3 pojawia się sygnał o częstotliwości 1 Hz. Jeśli go nie ma, upewniamy się, że zworka JP1 jest założona w jednym z dwóch możliwych położeń. Nie zapominajmy, że w zależności od używanego przyrządu pomiarowego wskazanie tak niskiej częstotliwości może pojawić się dopiero po kilku sekundach.

Jeśli układ nie działa prawidłowo, najczęstszymi przyczynami są zwarcia między wyprowadzeniami, brak połączenia lutowanego między wyprowadzeniem a polem lutowniczym lub nieprawidłowo zorientowany układ scalony (ostrzegaliśmy!).

Użytkowanie

Tutaj nie ma nic niezwykłego. Podłączamy źródło sygnału odniesienia do złącza CON1, a sygnał wyjściowy z CON3 podajemy do zegara GPS lub innego urządzenia wymagającego impulsów 1 Hz. W razie potrzeby można zmienić położenie zworki JP1, wybierając odpowiedni współczynnik



W prototypie zastosowano kątowe złącza SMA.

eprasa.pl 17a47aa7e2

wypełnienia. Jednak niemal każde urządzenie wymagające sygnału 1PPS powinno poprawnie działać przy obu położeniach zworki.

Zalecamy umieszczenie płytki w niewielkiej obudowie z odlewanego aluminium. Aby zminimalizować podatność na zakłócenia elektromagnetyczne, obudowę należy połączyć z masą układu. My testowaliśmy urządzenie jako „gołą płytkę" i w naszym laboratorium działało ono bez zarzutu. Złącza SMA rozmieszczono wzdłuż jednej krawędzi płytki, dzięki czemu można ją zamontować tak, aby złącza wystawały przez otwory w obudowie, a następnie dołączyć gniazdo zasilania przeznaczone do montażu na panelu i połączyć je ze złączem CON6.

Wygodne zamocowanie płytki wewnątrz obudowy umożliwiają cztery otwory montażowe w jej rogach. Jeśli chcecie maksymalnie zmniejszyć wymiary płytki, możecie piłą do metalu odciąć występy, na których znajdują się te otwory. Cięcie najlepiej wykonywać na wolnym powietrzu lub w dobrze wentylowanym pomieszczeniu, aby nie wdychać powstającego przy tym pyłu.

Wyjście sygnału 10 MHz o dobrej dokładności ma większość oscyloskopów, analizatorów widma, wysokiej klasy liczników częstotliwości i podobnych przyrządów. Dokładność częstotliwości wynosi zazwyczaj ±1 ppm. Nie jest ona tak dobra jak w przypadku generatora synchronizowanego sygnałem GPS, ale nadal jest bardzo wysoka. Prawdopodobnie potrzebny będzie przewód BNC–SMA. Drugi podobny przewód może być potrzebny do wyjścia 1 Hz, w zależności od tego, do czego zostanie ono podłączone.

W przypadku braku specjalnego wyjścia 10 MHz możemy skorzystać z wyjścia generatora przebiegów, w które są wyposażone niektóre nowsze oscyloskopy cyfrowe (DSO). Generator taki może wytwarzać przebieg sinusoidalny lub prostokątny o częstotliwości 10 MHz (oba są odpowiednie). Przebiegi te charakteryzują się z reguły znacznie mniejszą stabilnością i większym jitterem niż specjalne wyjście 10 MHz. Jednak rzeczywisty sygnał 1PPS z odbiornika GPS również cechuje się pewnym jitterem. Jeśli więc używacie opisywanej płytki do symulacji takiego sygnału, nie trzeba się tym zazwyczaj zbytnio przejmować.

Jeśli zamierzacie doprowadzić sygnał 1PPS do złącza typu goldpin lub podobnego, możecie użyć przejściówki z gniazda BNC na zaciski śrubowe.

Jeśli chcecie doprowadzić sygnał wyjściowy 1 Hz z układu do kilku wejść zegarowych jednego lub kilku urządzeń, to ze względu na małą częstotliwość oraz dużą impedancję większości wejść 1PPS zwykle wystarczy po prostu rozgałęzić ten sygnał. Można nawet nie montować złącza CON3 i przylutować przewody bezpośrednio do jego pól lutowniczych. Złącze to zamontowaliśmy głównie po to, aby ułatwić podłączanie układu do gotowych urządzeń pomiarowych.

Jeśli natomiast chcecie rozdzielić sygnał 10 MHz z płytki do wielu odbiorników, proponujemy zbudowanie rozdzielacza sygnału odniesienia („Silicon Chip", kwiecień 2020; www.siliconchip.au/Article/13810). Pamiętajmy jednak, że układ ten nie będzie działał bez modyfikacji z sygnałem o częstotliwości 1 Hz, ponieważ zarówno na wejściu, jak i na wyjściach zastosowano sprzężenie zmiennoprądowe. ■

Nicholas Vinen

Materiały dodatkowe dostępne są na stronie Silicon Chip:
https://www.siliconchip.com.au/Shop/8/6879

Materiały dodatkowe są również dostępne na stronie elportal.pl/do-pobrania

Artykuł reprodukowano na podstawie umowy z magazynem „Silicon Chip", 2022.
www.siliconchip.com.au

REKLAMA

eprasa.pl 17a47aa7e2

AT-AD269S
Mikroskop cyfrowy
z ekranem 10 cali,
powiększenie do 5000×,
5 obiektywów i endoskop
ANDONSTAR AD269S-M

AT-AD409PRO
Mikroskop do lutowania
z profesjonalnym
metalowym stojakiem,
ekran 10,1 cala,
powiększenie do 300×, HDMI
ANDONSTAR AD409Pro

BESTSELLERY sklepu AVT – sklep.avt.pl

Mikroskopy cyfrowe dla elektroników

Rabat dla Czytelników EdW
przy zakupie podaj kod **EdW2505MC**

-3%

Rabat dla Prenumeratorów EdW
przy zakupie podaj numer prenumeraty

-6%

AT-AD246S-M
Mikroskop cyfrowy 7 cali
z powiększeniem:
60...240×, 18...720×,
1560...2040×
ANDONSTAR AD246S-M

AT-AD407
Mikroskop cyfrowy 7 cali,
powiększenie do 270×
ANDONSTAR AD407

AT-AD249S-M
Mikroskop cyfrowy 10 cali
z powiększeniem:
60...240×, 18...720×, 1560...2040×
ANDONSTAR AD249S-M

AT-AD210
Mikroskop cyfrowy 5...260×
z wyświetlaczem 10,1 cala
ANDONSTAR AD210

Cyfrowy terminal wideo z Raspberry Pi Pico, część 1

Opisywany cyfrowy terminal wideo umożliwia komunikację z urządzeniami pracującymi pod kontrolą Micromite, PicoMite i WebMite oraz sterowanie nimi za pomocą klawiatury USB, a wyniki wyświetla na monitorze lub wyświetlaczu z wejściem HDMI.

Przypis redaktora: Micromite to platforma oparta na mikrokontrolerach PIC32 firmy Microchip z wgranym interpreterem MMBasic. Umożliwia łatwe tworzenie urządzeń elektronicznych współpracujących z czujnikami, wyświetlaczami i innymi elementami peryferyjnymi. Programy tworzy się w języku MMBasic, będącym odmianą języka BASIC.

Urządzenia typu „Boot-to-BASIC", takie jak Micromite i PicoMite, są prostym sposobem nauki programowania. Nadal jednak wymagają do komunikacji z użytkownikiem pełnoprawnego komputera. Istnieją wprawdzie rozwiązania umożliwiające pracę samodzielną, takie jak VGA PicoMite, ale wymagają one starszego sprzętu, na przykład monitora VGA. Dzięki opisywanemu projektowi monitor VGA ani klawiatura PS/2 nie będą już potrzebne.

Opisywany Cyfrowy Terminal Wideo oparty na Raspberry Pi Pico jest zmodernizowaną wersją projektu Terminal Wideo ASCII, opublikowanego w „Silicon Chip" w lipcu 2014 roku (www.siliconchip.au/Article/7925). Projekt ten umożliwiał podłączenie do mikrokontrolera z interfejsem szeregowym klawiatury PS/2 oraz monitora VGA lub odbiornika wyposażonego w wejście zespolonego sygnału wizyjnego.

Cyfrowy terminal wideo spełnia podobne funkcje, ale wykorzystuje nowocześniejsze interfejsy. Jest również wyposażony w wirtualny port szeregowy USB, dzięki czemu mikrokontroler można łatwo połączyć z programem terminalowym, takim jak TeraTerm lub minicom. Modułowa budowa układu pozwala zrezygnować z niektórych funkcji lub dostosować je do własnych potrzeb. Zamiast klawiatury PS/2 zastosowano klawiaturę USB. Takie klawiatury są dziś tanie i powszechnie dostępne, również w wersjach bezprzewodowych, dzięki czemu można łatwo zrezygnować z połączenia przewodowego.

Terminal ma także wyjście sygnału wideo zgodne z HDMI, dzięki czemu można go podłączyć do większości współczesnych telewizorów i monitorów. Współpracuje również z niewielkimi monitorami HDMI przeznaczonymi do mikrokomputerów, takich jak Raspberry Pi. Wytwarzany sygnał nie jest jednak w pełni zgodny ze standardem HDMI. Wykorzystuje zgodny z HDMI standard Digital Visual Interface (DVI), który powinien współpracować ze wszystkimi wyświetlaczami wyposażonymi w wejście HDMI.

Ściśle rzecz biorąc, nie powinniśmy nazywać tego interfejsu HDMI. Korzystanie ze standardu HDMI i znaków towarowych z nim związanych podlega ograniczeniom

Terminal jest zwartym urządzeniem mieszczącym się w niewielkiej obudowie z tworzywa ABS. Trzy moduły Raspberry Pi Pico komunikują się z klawiaturą USB, udostępniają interfejs hosta USB oraz generują cyfrowy sygnał wideo. Można zastosować moduły Pico lub Pico H (na zdjęciu pokazano obie wersje).

eprasa.pl 17a47aa7e2

licencyjnym. Mimo to terminal działał bez problemów ze wszystkimi wyświetlaczami wyposażonymi w wejście HDMI, które sprawdziliśmy. Zastanawialiśmy się nawet, czy nie nazwać go: „Nie do wiary – to nie HDMI!".

Zastosowaliśmy również interfejs hosta USB, umożliwiający komunikację z wirtualnym portem szeregowym USB na płytkach Micromite i PicoMite. Terminal jest także wyposażony w interfejs wirtualnego portu szeregowego USB po stronie komputera („upstream"), którego dane są bez zmian przekazywane do interfejsu wirtualnego portu szeregowego USB po stronie urządzenia („downstream"), podłączonego do złącza CON2. Dzięki temu płytki zachowują się tak, jakby były podłączone bezpośrednio do komputera, mimo że pomiędzy nimi znajduje się terminal. Takie rozwiązanie umożliwia przesyłanie danych z podłączonej klawiatury do modułu Micromite lub PicoMite. Z kolei dane wysyłane przez Micromite lub PicoMite mogą być wyświetlane na wyjściu wideo i jednocześnie odbierane przez komputer.

Terminal współpracuje również z wieloma tanimi adapterami USB/UART, umożliwiając komunikację z komputerem. Sprawdziliśmy to z adapterami opartymi na układzie CP2102.

Porównanie z PicoMite VGA

Być może zastanawiacie się, czym opisywany terminal różni się od VGA PicoMite (opisanego w „Silicon Chip" z lipca 2022 roku; www.siliconchip.au/Article/15382). VGA PicoMite obsługuje kilka zaawansowanych funkcji graficznych, których terminal nie zapewnia. Poza tym praca ze zwykłym PicoMite lub WebMite z wykorzystaniem terminala jest bardzo podobna do pracy z VGA PicoMite. Główna różnica polega na tym, że VGA PicoMite wymaga klawiatury PS/2 oraz monitora VGA lub odpowiedniego adaptera, natomiast terminal współpracuje z klawiaturą USB i monitorem HDMI.

W „Silicon Chip" opublikowaliśmy niedawno adapter umożliwiający podłączenie klawiatury USB do interfejsu PS/2 (styczeń 2024; www.siliconchip.au/Article/16090). Dzięki niemu z VGA PicoMite można używać klawiatury USB. Nadal jednak konieczny jest monitor VGA lub adapter VGA-HDMI.

Możliwe jest również połączenie VGA PicoMite z opisywanym terminalem. Pozwala to utworzyć system PicoMite z dwoma ekranami i klawiaturą USB. Jeśli dodatkowo do PicoMite zostanie podłączony wyświetlacz LCD, otrzymamy konfigurację z trzema ekranami.

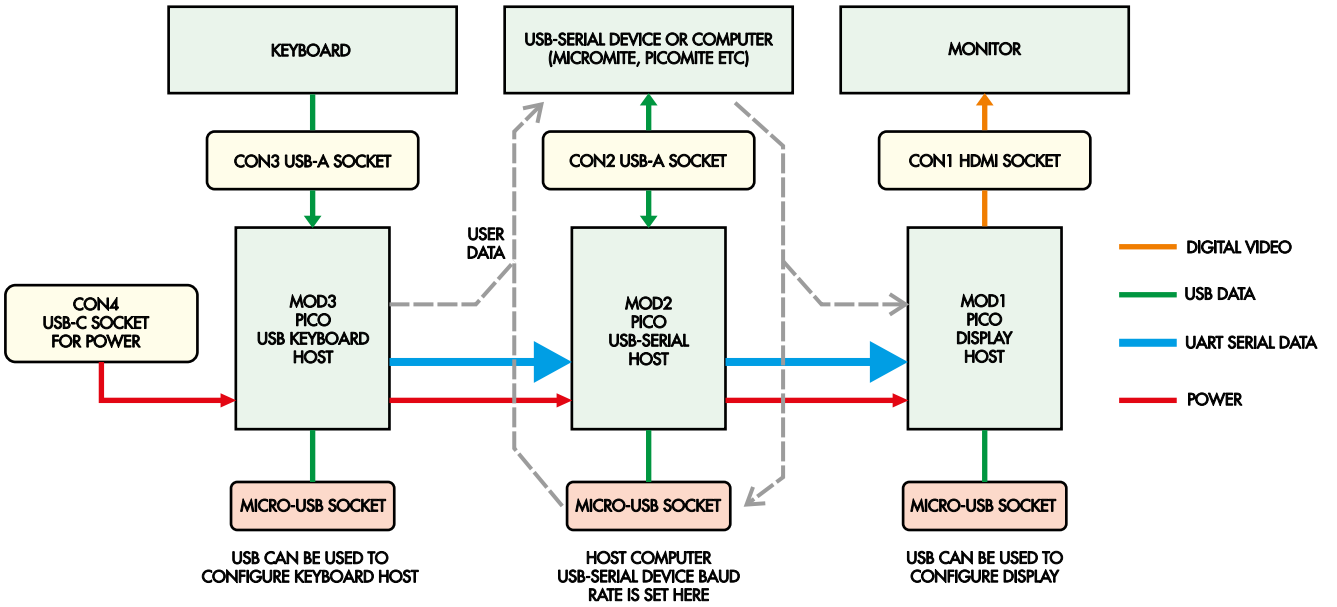
Terminal będzie współpracował z wieloma typami płytek rozwojowych, nie tylko z serii „Mite". Współpracują z nim również niektóre płytki Arduino, a także płytki umożliwiające uruchamianie programów w językach MicroPython i CircuitPython.

Terminal nie musi być oddzielnym urządzeniem. Można go zbudować razem z modułem PicoMite lub WebMite na jednej płytce drukowanej i zamknąć całość w niewielkiej obudowie!

Nie zdziwimy się, jeśli niektórzy Czytelnicy zmodyfikują nasze oprogramowanie i stworzą kompletne, samodzielne urządzenie,

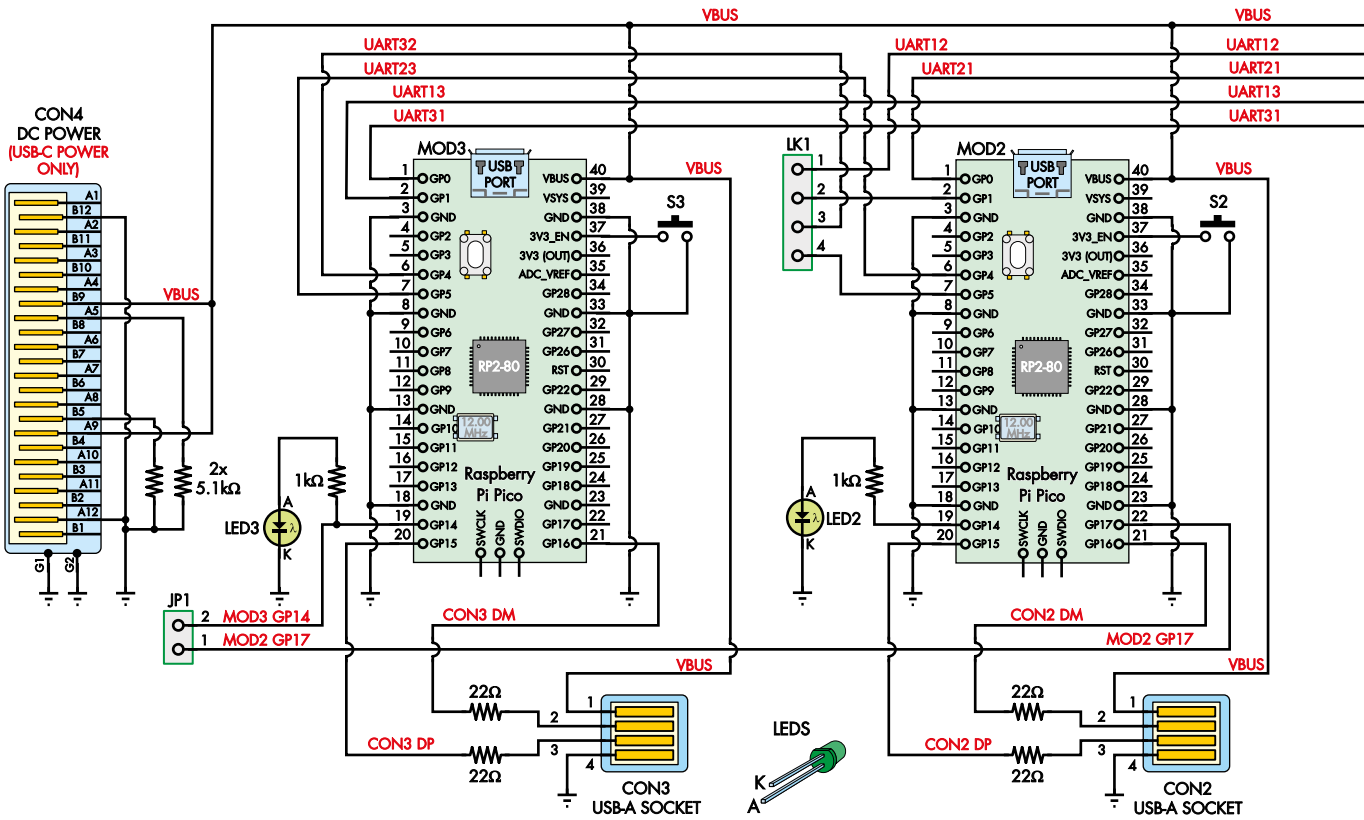
Funkcje i parametry Terminala:

- tryb monochromatyczny o rozdzielczości 640×240 pikseli (80×30 znaków)
- tryb kolorowy o rozdzielczości 320×240 pikseli (53×20 znaków)
- gniazdo HDMI z cyfrowym sygnałem wideo zgodnym ze standardem DVI
- gniazdo USB-A do podłączenia klawiatury (również bezprzewodowej)
- zgodność ze standardem terminala VT100
- gniazdo USB-C do zasilania napięciem 5 V
- trzy diody LED sygnalizujące stan pracy
- niewielka obudowa (105 × 80 × 25 mm)
- sprawdzona współpraca z systemami Micromite, PicoMite i WebMite
- przekształca płytkę rozwojową w samodzielny komputer
- współpracuje z innymi płytkami wyposażonymi w interfejs wirtualnego portu szeregowego USB, m.in. Raspberry Pi Pico/Pico W (CircuitPython i MicroPython) oraz Arduino Leonardo
- współpracuje z adapterami USB/UART opartymi na układzie CP2102 oraz z modułami Micromite/Microbridge
- sygnał wideo DVI jest wyprowadzony na złącze HDMI
- host USB dla klawiatury
- modułowa budowa ułatwiająca rozbudowę i modyfikacje



Rysunek 1. Schemat blokowy pokazujący sposób współpracy trzech modułów Raspberry Pi Pico (MOD1...MOD3) oraz ich interfejsy zewnętrzne. Moduł MOD1 generuje cyfrowy sygnał wideo DVI dostępny na złączu CON1, moduł MOD2 komunikuje się z urządzeniem podłączonym do złącza CON2, natomiast komputer można podłączyć do jego gniazda micro-USB. Moduł MOD3 współpracuje z klawiaturą USB podłączoną do złącza CON3.

eprasa.pl 17a47aa7e2



niewymagające podłączenia żadnej zewnętrznej płytki. W dalszej części artykułu przedstawimy kilka urządzeń zgodnych z terminalem.

Małe ostrzeżenie

Do generowania cyfrowego sygnału wideo terminal wykorzystuje bibliotekę oprogramowania open source. Biblioteka ta „podkręca" taktowanie mikrokontrolera RP2040 zastosowanego w module Raspberry Pi Pico, aby uzyskać wymagane parametry czasowe. Oryginalną bibliotekę autorstwa Luke'a Wrena można znaleźć pod adresem https://github.com/Wren6991/PicoDVI. Korzystamy z jej rozwidlenia (forka), przygotowanego przez firmę Adafruit i przystosowanego do współpracy ze środowiskiem Arduino IDE, dostępnego pod adresem https://github.com/adafruit/PicoDVI. Wykorzystujemy praktycznie taki sam sprzęt, jakiego Luke użył w swoich prototypach. Bibliotekę tę wypróbowało również wiele innych osób. Imponujące jest, że umożliwia ona generowanie cyfrowego sygnału wideo z wykorzystaniem taniego i powszechnie dostępnego modułu z mikrokontrolerem.

Luke zauważył, że sygnał wideo generowany przez nasz układ prawdopodobnie nie jest w pełni zgodny ze wszystkimi wymaganiami standardów DVI i HDMI. Mimo to wydaje się, że bez problemu przechodzi wszystkie najważniejsze testy.

Od chwili udostępnienia tej biblioteki minął już ponad rok. W tym czasie wykorzystano ją w wielu projektach, a także powstało wiele płytek z układem RP2040 przeznaczonych do generowania cyfrowego sygnału wideo. Nie słyszeliśmy, aby ktokolwiek miał problemy spowodowane podkręceniem taktowania mikrokontrolera lub niewielkimi odchyłkami parametrów sygnału.

W naszym prototypie układ RP2040 pracuje z częstotliwością niemal dwukrotnie wyższą od wartości podanej w specyfikacji, czyli 133 MHz, a mimo to jest ledwie ciepły. Każdy monitor z wejściem HDMI, który sprawdziliśmy, wyświetlał obraz prawidłowo. Nie testowaliśmy skrajnych przypadków, takich jak bardzo długie przewody HDMI, ale nie widzimy powodów, dla których miałyby one sprawiać problemy. Projekt nie jest wprawdzie w pełni zgodny ze specyfikacją, jednak zarówno nasze doświadczenia, jak i doświadczenia wielu innych użytkowników pokazują, że działa on bez zarzutu.

Połączenia

Rysunek 1 przedstawia schemat blokowy terminala. Pokazuje jego budowę oraz sposób podłączania urządzeń zewnętrznych. Załóżmy, że terminal współpracuje z modułem Micromite – wówczas podłącza się go do złącza USB CON2.

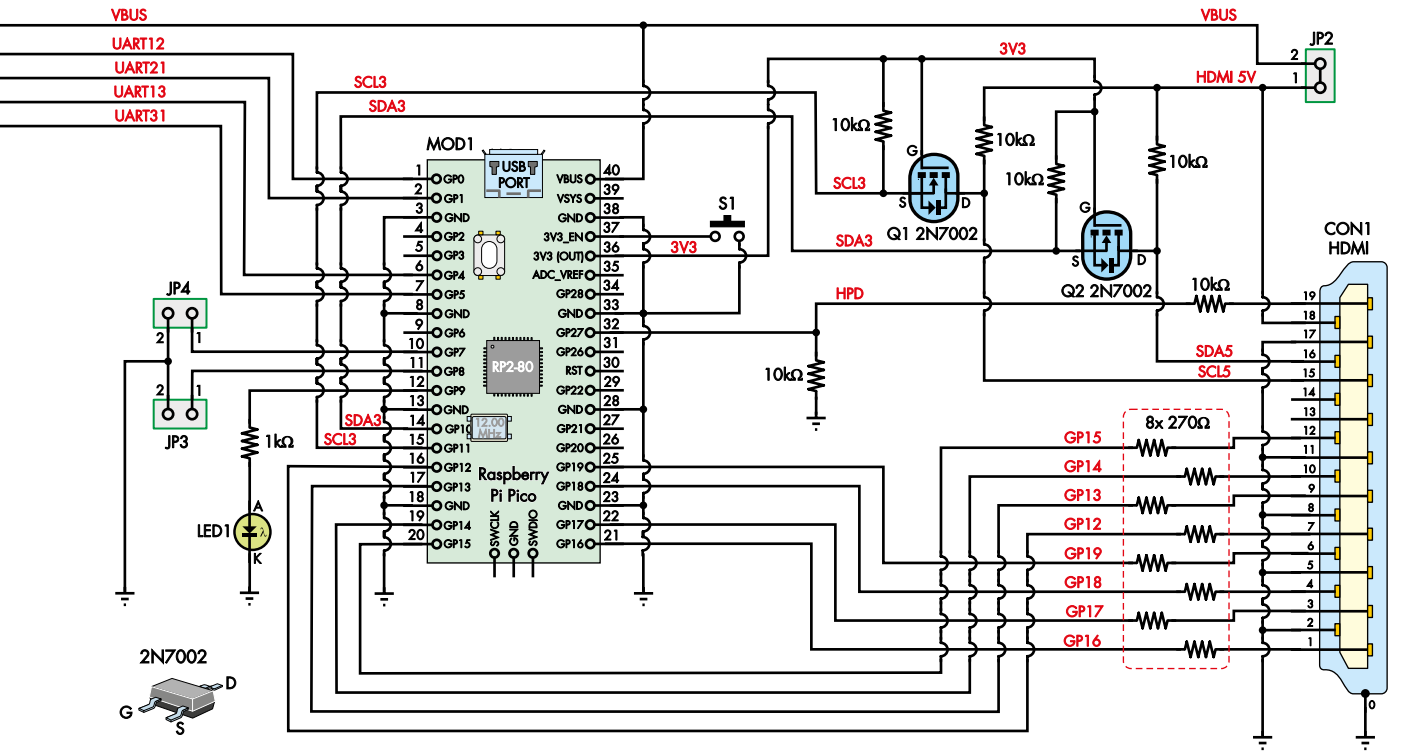
Kompletny, samodzielny system można utworzyć, podłączając klawiaturę USB do złącza CON3 oraz odpowiedni monitor lub wyświetlacz do złącza CON1. Zasilanie 5 V jest doprowadzane przez złącze USB typu C CON4 i zasila wszystkie podłączone urządzenia.

Naciśnięcia klawiszy są przekształcane przez moduł MOD3 na sekwencje przesyłane przez interfejs szeregowy, a następnie wewnętrznym łączem szeregowym trafiają do modułu MOD2. Ten przekazuje je przez złącze USB CON2 do modułu Micromite, PicoMite lub innego zgodnego urządzenia. Dane zwrotne z Micromite trafiają do MOD2, skąd są przesyłane do MOD1, który pełni funkcję terminala i generuje sygnał wideo dostępny na złączu CON1.

W przypadku modułu Micromite dane przesyłane przez interfejs szeregowy z MOD3 do MOD2 oraz z MOD2 do MOD1 mają postać znaków ASCII i sekwencji sterujących (Escape) zgodnych ze standardem VT100. Polecenia wprowadzane z klawiatury są przekazywane do Micromite, który reaguje zgodnie z wykonywanym programem i wyświetla wyniki na monitorze podłączonym do złącza CON1. Wyjście wideo na złączu CON1 ma działać jak ekran programu terminalowego, takiego jak TeraTerm.

Jeśli komputer zostanie podłączony do gniazda micro-USB modułu MOD2, komunikacja z Micromite będzie przebiegała

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 2. Schemat ideowy terminala. Osiem rezystorów 270 Ω ogranicza prąd płynący w liniach TMDS złącza DVI do około 10 mA. Każdy z dwóch modułów hosta USB (MOD2 i MOD3) wymaga jedynie gniazda USB-A i dwóch rezystorów. Większość pozostałych elementów służy do komunikacji między modułami Pico.

tak, jakby był on podłączony bezpośrednio do komputera. Moduł MOD2 przezroczyście przekazuje dane między tymi interfejsami. Szare linie na rysunku pokazują przepływ danych do i z Micromite.

Moduł MOD3 jest również wyposażony w interfejs wirtualnego portu szeregowego USB, umożliwiający konfigurowanie parametrów interfejsu klawiatury. Każdy z modułów MOD1...MOD3 ma diodę LED sygnalizującą stan podłączonego urządzenia.

Oczywiście Micromite nie jest jedynym urządzeniem, które można podłączyć do terminala. W dalszej części artykułu przyjrzymy się bliżej urządzeniom zgodnym z interfejsem wirtualnego portu szeregowego USB modułu MOD2, wśród których znajduje się również kilka innych płytek rozwojowych.

Szczegóły układowe

Rysunek 2 przedstawia szczegółowy schemat ideowy terminala. Moduły MOD1, MOD2 i MOD3 są zbudowane z płytek Raspberry Pi Pico. W każdej z nich zapisano inne oprogramowanie układowe, a każda pełni jedną z podstawowych funkcji terminala. W rozdziale Oprogramowanie wyjaśnimy, dlaczego zastosowano trzy oddzielne moduły oraz jakie zadanie realizuje oprogramowanie każdego z nich.

Piny VBUS modułów MOD1...MOD3 są połączone ze sobą oraz z pinem VBUS gniazda USB typu C CON4. Piny CC1 i CC2 (Configuration Channel) tego gniazda są połączone z masą przez rezystory 5,1 kΩ, dzięki czemu terminal jest rozpoznawany jako odbiornik zasilania wymagający napięcia 5 V. Jest to niezbędne do zapewnienia zgodności ze standardem USB typu C.

Napięcie 5 V może być doprowadzane do układu zarówno przez złącze CON4, jak i przez każdy z modułów MOD1...MOD3. W typowych warunkach zasilanie jest dostarczane przez złącze CON4, jeśli terminal nie jest podłączony do komputera, albo przez moduł MOD2, gdy jest z nim połączony. Moduły MOD1 i MOD3 również można podłączyć do komputera w celu ich konfiguracji.

Ponieważ każdy z modułów terminala pełni inną funkcję, przed omówieniem ich współpracy przedstawimy każdy z nich oddzielnie. Warto zwrócić uwagę, że każdemu modułowi odpowiadają złącze, przełącznik i dioda LED o tym samym numerze. Na przykład moduł MOD1 współpracuje ze złączem CON1, przełącznikiem S1 i diodą LED1.

MOD1

Moduł MOD1 odpowiada za generowanie cyfrowego sygnału wideo na złączu CON1. Jego piny GP12...GP19 (uniwersalne wejścia/wyjścia) są połączone z odpowiednimi pinami złącza CON1 przez rezystory 270 Ω.

Impedancja kabla wynosi około 50 Ω. Gdy mikrokontroler ustawia dany pin w stan niski, płynie przez niego prąd około 10 mA, natomiast w stanie wysokim prąd nie płynie. Piny są zgrupowane w pary sterowane komplementarnie (w każdej parze stan logiczny jednej linii jest negacją stanu drugiej; przypis redaktora). Zapewnia to różnicową transmisję sygnału w trybie prądowym, wymaganą przez standard TMDS. Więcej informacji o sposobie kodowania sygnału TMDS znajduje się w ramce Standardy DVI-D, HDMI i TMDS. Pin GP9 (12) modułu MOD1 jest połączony z zieloną diodą LED1 przez rezystor 1 kΩ. Dioda ta pełni funkcję wskaźnika stanu.

Między pinem 3V_EN modułu a masą jest podłączony przycisk S1. Jego naciśnięcie wyłącza stabilizator 3,3 V zasilający mikrokontroler RP2040, powodując jego reset.

Do pinów GP8 i GP7 (11 i 10) są podłączone zworki JP3 i JP4, których drugi styk jest połączony z masą. Oprogramowanie włącza na tych pinach wewnętrzne rezystory podciągające (pull-up), dzięki czemu może odczytywać stan zworek na podstawie poziomów logicznych na wejściach. Informacje te są wykorzystywane do wyboru odpowiedniej konfiguracji.

Piny GP10 i GP11 (14 i 15) są skonfigurowane jako linie magistrali I²C: odpowiednio SDA (dane) i SCL (zegar). Są one połączone z dwukierunkowym konwerterem poziomów logicznych 3,3 V/5 V, zbudowanym z tranzystorów MOSFET Q1 i Q2 oraz

eprasa.pl 17a47aa7e2

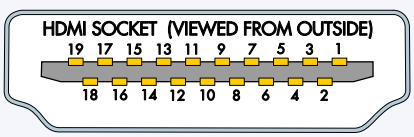
Standardy DVI-D, HDMI i TMDS

DVI (Digital Visual Interface) to standard przesyłania sygnału wideo opracowany pod koniec lat 90. jako następca analogowego standardu VGA (Video Graphics Array). Jednym z powodów jego opracowania było przejście na cyfrową transmisję sygnału wideo wraz z rosnącą popularnością wyświetlaczy cyfrowych, takich jak LCD. Pozwoliło to wyeliminować konieczność dwukrotnej konwersji sygnału – z postaci cyfrowej na analogową po stronie komputera i ponownie na cyfrową w monitorze – niezbędnej w przypadku standardu VGA.

Monitory kineskopowe, powszechnie stosowane do lat 90., były urządzeniami analogowymi. Wymagały między innymi napięć o przebiegu piłokształtnym do poziomego i pionowego odchylania wiązki elektronów. Natomiast wyświetlacze plazmowe, LCD i OLED działają w dużej mierze cyfrowo. Zamiast ekranu pokrytego luminoforem wykorzystują matrycę złożoną z dyskretnych pikseli, dlatego najlepiej współpracują z cyfrowym sygnałem wizyjnym.

Więcej informacji na temat różnych technik wyświetlania można znaleźć w wydaniach „Silicon Chip" z września i października 2022 roku: www.siliconchip.au/Series/387 (w EdW: „Historia i technologia wyświetlaczy wideo", wrzesień i październik 2024 r.; przypis redaktora).

Chociaż DVI opracowano jako standard cyfrowy, w niektórych wersjach umożliwia on również przesyłanie sygnału analogowego. Dzięki temu przejście ze standardu VGA do DVI było znacznie łatwiejsze. W praktyce stosowano trzy odmiany złączy i przewodów: DVI-D (wyłącznie cyfrowe), DVI-A (wyłącznie analogowe) oraz DVI-I (cyfrowe i analogowe).



PIN	FUNCTION
1	TMDS DATA 2+ (RED)
2	SHIELD
3	TMDS DATA 2– (RED)
4	TMDS DATA 1+ (GREEN)
5	SHIELD
6	TMDS DATA 1– (GREEN)
7	TMDS DATA 0+ (BLUE + SYNC)
8	SHIELD
9	TMDS DATA 0– (BLUE + SYNC)
10	TMDS CLOCK+
11	SHIELD
12	TMDS CLOCK–
13	CEC (Consumer Electronics Control)
14	ARC (Audio Return Channel)
15	DDC CLOCK (I^2C Clock)
16	DDC DATA (I^2C Data)
17	GROUND
18	+5V
19	HPD (Hot Plug Detect)

Rysunek a. Złącze HDMI wykorzystuje wiele sygnałów wspólnych ze standardem DVI. Nie zawiera jednak linii sygnałów analogowych zgodnych z VGA, ponieważ HDMI jest standardem całkowicie cyfrowym. Piny 1...12 tworzą linie TMDS, które w zupełności wystarczają do przesyłania sygnału wideo.

DVI działa prawidłowo tylko wtedy, gdy karta graficzna, przewód i monitor obsługują ten sam wariant standardu – cyfrowy lub analogowy. Na przykład wyjście DVI-D współpracuje wyłącznie z przewodem DVI-D lub DVI-I oraz z wejściem DVI-D albo DVI-I w monitorze.

W terminalu wykorzystano cyfrowy wariant standardu DVI. Ponieważ obecnie większość monitorów jest wyposażona w złącza HDMI, zastosowano właśnie taki typ złącza. Monitor z wejściem DVI można podłączyć za pomocą przewodu lub adaptera HDMI-DVI.

Interfejs multimedialny HDMI wysokiej rozdzielczości

Podobnie jak standard DVI był zgodny wstecz ze standardem VGA, standard HDMI został zaprojektowany tak, aby zachować zgodność ze standardem DVI-D. Jedną z jego najważniejszych zalet jest możliwość jednoczesnego przesyłania cyfrowego obrazu, dźwięku, sygnałów sterujących, a nawet danych sieciowych.

Wspólna część standardów DVI i HDMI, wykorzystywana w opisywanym terminalu, opiera się na standardzie transmisji TMDS (Transition Minimized Differential Signaling). Zostanie on omówiony w dalszej części tekstu.

Rysunek a przedstawia rozmieszczenie sygnałów na złączu HDMI. Piny 1...12 są przeznaczone dla sygnałów TMDS oraz odpowiadających im ekranów.

Nowsze wersje standardu HDMI oferują większą przepustowość oraz obsługę bardziej zaawansowanych metod kodowania i kompresji danych. Umożliwiają również pracę z różnymi przestrzeniami barw, w tym z obrazem HDR (High Dynamic Range). Standard DVI wykorzystuje prostą 24-bitową reprezentację kolorów RGB.

W standardzie HDMI dodano kanały komunikacyjne między źródłem sygnału wideo a odbiornikiem (monitorem). Terminal umożliwia korzystanie z jednego z nich, choć do wyświetlania obrazu w zupełności wystarcza sam standard TMDS.

Kanał DDC (Display Data Channel) umożliwia źródłu sygnału odczytanie informacji o formatach obrazu obsługiwanych przez monitor. Ponieważ jednak każde urządzenie HDMI musi być zgodne z podstawową specyfikacją DVI, w opisywanym projekcie można z niego zrezygnować – terminal generuje wyłącznie sygnały zgodne z tą specyfikacją.

Pod względem elektrycznym kanał DDC jest magistralą I^2C. W monitorze (lub innym urządzeniu wyświetlającym) jest realizowany przez pamięć EEPROM o 7-bitowym adresie I^2C 0x50. Odczytując jej zawartość, host może poznać parametry wyświetlacza.

Linie magistrali DDC zostały połączone z liniami interfejsu I^2C modułu MOD1 za pośrednictwem konwertera poziomów logicznych, co umożliwia odczyt zawartości pamięci DDC wyświetlacza. Napięcie zasilające tę pamięć (5 V) jest dostarczane przez źródło sygnału HDMI, dzięki czemu można ją odczytywać nawet wtedy, gdy sam wyświetlacz jest wyłączony.

Źródło sygnału HDMI podaje również napięcie 5 V na pin HPD (Hot Plug Detect) złącza HDMI, co umożliwia wykrycie podłączonego wyświetlacza. Wyświetlacz może odłączyć sygnał HPD, na przykład po wyłączeniu zasilania.

Standard HDMI obejmuje również inne protokoły komunikacyjne. W opisywanym terminalu nie zostały one wykorzystane. Nie wszystkie są zdefiniowane w każdej wersji standardu, jednak wspominamy o nich dla kompletności opisu.

Consumer Electronics Control (CEC) to jednoprzewodowa, dwukierunkowa magistrala szeregowa. Umożliwia urządzeniom podłączonym przez HDMI sterowanie innymi urządzeniami. Dzięki temu jednym pilotem można na przykład obsługiwać kilka urządzeń.

Kanał zwrotny audio (ARC) umożliwia przesyłanie dźwięku z telewizora do zewnętrznego amplitunera lub soundbara przez złącze HDMI, bez konieczności stosowania dodatkowego przewodu audio.

Kanał Ethernet HDMI (HEC) umożliwia transmisję danych Ethernet przez przewód HDMI. W nowszych wersjach standardu HDMI zrezygnowano jednak z tej funkcji. Jej rolę w zapewnianiu dostępu do sieci przejęły przede wszystkim sieci Wi-Fi.

TMDS – transmisja różnicowa z minimalizacją przejść

Podstawą zarówno standardu DVI, jak i podstawowej wersji standardu HDMI jest TMDS (Transition Minimized Differential Signaling) – sposób przesyłania sygnału wideo ze źródła do odbiornika. Standard wykorzystuje cztery ekranowane pary skręconych przewodów, z których każda przenosi sygnał różnicowy.

Przesyłanie sygnałów różnicowych skręconą parą przewodów zapewnia dużą odporność na zakłócenia. Zakłócenia pochodzące z zewnętrznych źródeł powodują zwykle powstanie jednakowego sygnału zakłócającego w obu przewodach pary. Ponieważ odbiornik reaguje na różnicę napięć między nimi, składowa zakłócająca ulega w dużym stopniu zniesieniu. Dodatkową zaletą transmisji różnicowej jest dwukrotnie większa amplituda sygnału różnicowego, co zwiększa odstęp sygnału od zakłóceń o 6 dB.

Standard HDMI nie jest oczywiście jedynym wykorzystującym transmisję różnicową. Stosują ją również inne interfejsy, między innymi RS-485, USB oraz Ethernet (np. 10BASE-T i 100BASE-T).

Z elektrycznego punktu widzenia standard TMDS wymaga, aby w każdej parze różnicowej na przemian jedna lub druga linia przewodziła prąd o natężeniu około 10 mA (płynący od zasilania 3,3 V w odbiorniku do nadajnika). To, która linia przewodzi prąd, określa, czy przesyłana jest wartość logiczna „0", czy „1".

W terminalu odpowiedni efekt uzyskuje się przez przełączanie wyprowadzeń

eprasa.pl 17a47aa7e2

mikrokontrolera między stanem wysokim i niskim. Prąd ustalają rezystory 270 Ω oraz impedancja przewodów kabla.

Sygnał TMDS jest bardzo szybki jak na możliwości mikrokontrolera, który go generuje. Jego realizacja wymaga znacznie większego nakładu pracy projektowej, niż mogłoby to wynikać z tego krótkiego opisu. Mamy jednak nadzieję, że pozwolił on przynajmniej ogólnie zrozumieć, jakie zadania moduł Pico musi realizować na poziomie sprzętowym.

Kodowanie 8B/10B

TMDS wykorzystuje specjalny sposób kodowania danych, który minimalizuje liczbę przejść sygnału w parach różnicowych, dzięki czemu zmniejsza emisję zakłóceń elektromagnetycznych.

Sygnał zegarowy jest przesyłany osobną parą różnicową. Ma współczynnik wypełnienia 50% i częstotliwość równą częstotliwości pikseli obrazu, co oznacza dwa przejścia sygnału podczas przesyłania każdego piksela. W odbiorniku pętla synchronizacji fazowej (PLL) odtwarza na tej podstawie zegar bitowy o znacznie wyższej częstotliwości, dzięki czemu nie trzeba przesyłać go oddzielnie przez łącze HDMI.

Pozostałe trzy pary różnicowe przesyłają szeregowo dane trzech składowych koloru. Każdy 8-bitowy bajt jest kodowany jako 10-bitowy symbol (stąd nazwa kodowania „8B/10B"). Dzięki temu podczas każdego taktu zegara pikselowego przesyłany jest jeden 24-bitowy piksel (patrz rysunek 3). Warto zauważyć, że istnieją również inne odmiany kodowania 8B/10B.

Dziesięć bitów pozwala utworzyć 1024 różne kombinacje. Spośród nich 460 wybrano do kodowania 8-bitowych wartości składowych koloru. Oznacza to, że niektóre wartości mogą być reprezentowane przez więcej niż jeden kod. Z pozostałych kombinacji cztery przeznaczono do kodowania sygnałów sterujących. Wybrano je tak, aby zawierały stosunkowo dużą liczbę przejść sygnału, co ułatwia odtworzenie sygnału zegarowego w odbiorniku. Cztery kody sterujące reprezentują cztery możliwe kombinacje dwóch bitów sterujących. W kanale 0 (przeznaczonym do przesyłania składowej niebieskiej) odpowiadają one sygnałom synchronizacji poziomej i pionowej. Sygnały synchronizacji są oczywiście przesyłane poza okresem transmisji danych obrazu. Kanał 1 przesyła składową zieloną, a kanał 2 – składową czerwoną.

Zależności czasowe podstawowego trybu DVI (640×480 pikseli) są praktycznie takie same jak w odpowiadającym mu trybie VGA. Różnica polega na tym, że sygnały są przesyłane w postaci cyfrowej, a nie analogowej. Wystarczy więc zastosować kodowanie i dekodowanie cyfrowe, bez zmiany parametrów synchronizacji.

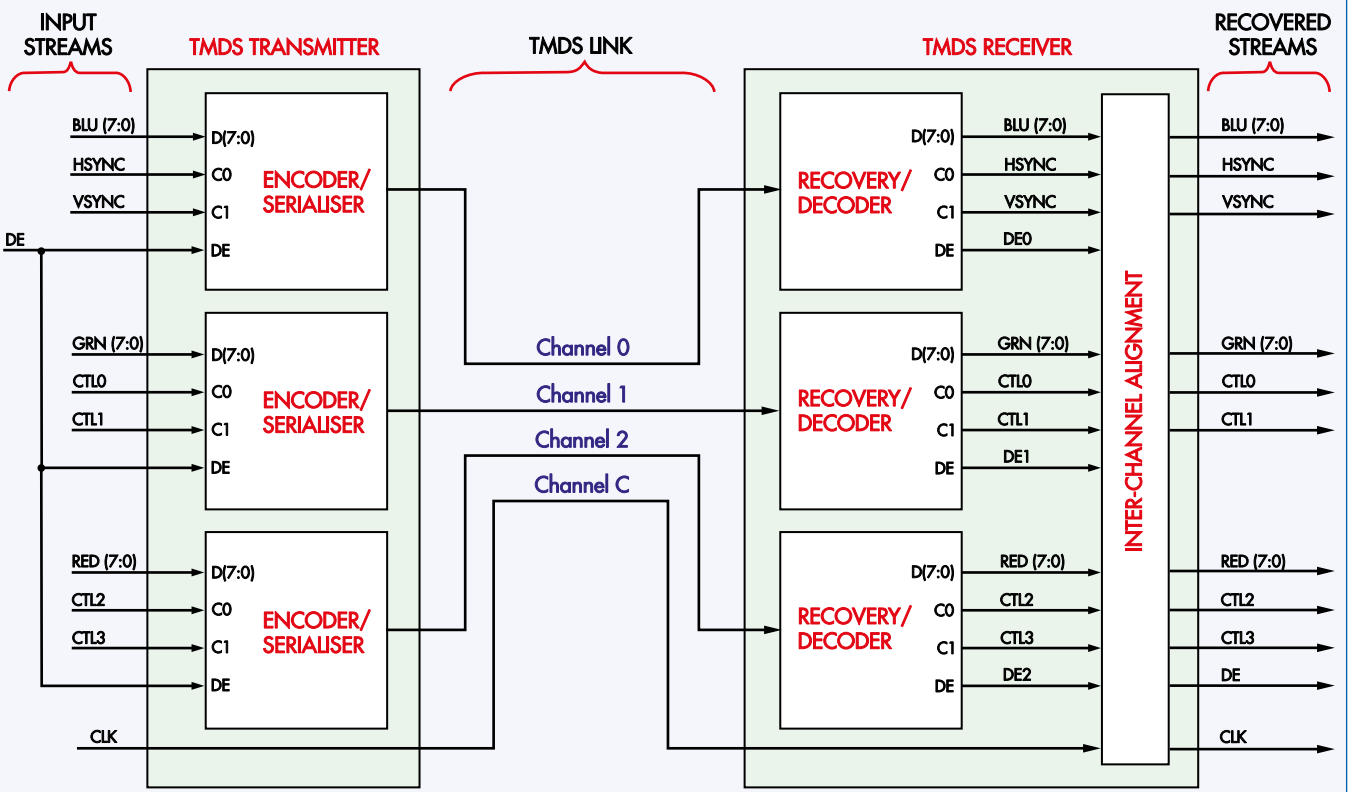
Każda klatka obrazu o rozdzielczości 640×480 składa się z linii liczących w rzeczywistości 800 taktów zegara pikselowego, a takich linii jest 525. Iloczyn 800 × 525 × 60 Hz (60 klatek na sekundę) daje częstotliwość zegara pikselowego równą 25,2 MHz. **Rysunek b** pokazuje sposób kodowania i odtwarzania takiego sygnału w standardzie DVI.

Korzystną cechą kodowania 8B/10B jest bardzo mała składowa stała sygnału. Sposób kodowania eliminuje 10-bitowe symbole o dużej składowej stałej, czyli zawierające wyraźną przewagę bitów „0" lub „1". W dłuższym czasie liczba bitów „0" i „1" w przesyłanym sygnale pozostaje w przybliżeniu jednakowa.

Jeżeli jednej wartości 8-bitowej odpowiada kilka różnych kodów, ich składowe stałe mają zbliżone wartości bezwzględne, lecz przeciwne znaki. Dzięki temu nawet długie ciągi jednakowych wartości mogą być przesyłane w sposób zapewniający bardzo małą składową stałą sygnału.

Wartości 8-bitowe, którym odpowiada tylko jeden kod, oraz kody sterujące zawierają taką samą lub zbliżoną liczbę bitów „0" i „1", dlatego praktycznie nie zwiększają składowej stałej sygnału.

W opisywanym terminalu dźwięk nie jest przesyłany. Standard HDMI umożliwia jednak transmisję dźwięku (oraz innych danych) w okresach wygaszania obrazu. W tym celu wykorzystywane są specjalne kody sterujące.



Rysunek b. Przy zachowaniu takich samych zależności czasowych jak w standardzie VGA dane obrazu są kodowane i przesyłane przez cztery kanały TMDS, a następnie dekodowane w odbiorniku. Można więc uznać, że TMDS zachowuje organizację czasową sygnału VGA, zastępując analogową transmisję transmisją cyfrową.

eprasa.pl 17a47aa7e2

współpracujących z nimi rezystorów podciągających 10 kΩ. Podobny układ zastosowano we wspomnianym wcześniej adapterze klawiatury USB do PS/2, umożliwiającym współpracę mikrokontrolera 3,3 V z klawiaturą PS/2 zasilaną napięciem 5 V.

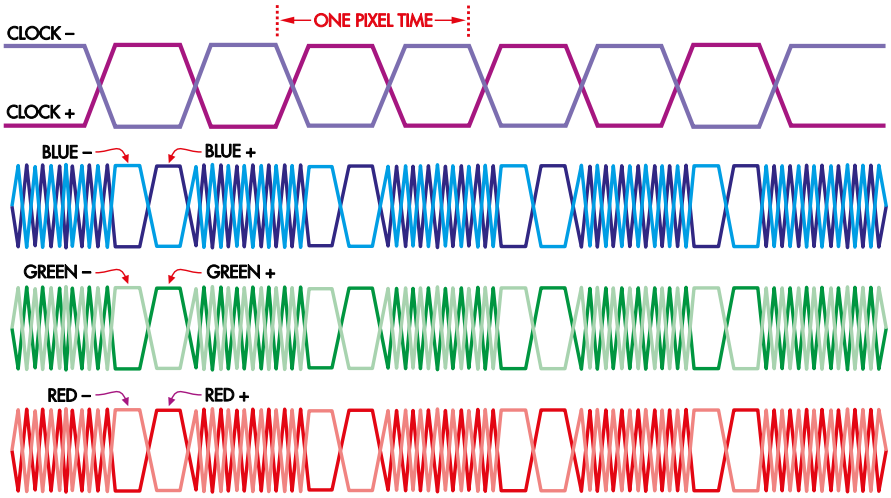
Zasada działania tej części układu została opisana we wspomnianym artykule. Niski poziom logiczny pojawiający się po jednej stronie konwertera jest przenoszony na drugą stronę. Gdy po żadnej stronie nie występuje stan niski, rezystory podciągające utrzymują obie linie w stanie wysokim. Rozwiązanie to doskonale nadaje się do magistral z wyjściami typu open drain, takich jak I²C i interfejs PS/2.

Strona 5 V konwertera poziomów logicznych jest połączona z liniami SDA i SCL magistrali DDC (Display Data Channel) złącza HDMI CON1. Interfejs ten umożliwia odczyt zawartości pamięci EEPROM monitora, między innymi w celu sprawdzenia obsługiwanych parametrów wyświetlania.

Przez złącze CON1, za pośrednictwem zworki JP2, do monitora jest doprowadzane napięcie 5 V. Dzięki temu można zasilać pamięć EEPROM monitora nawet wtedy, gdy sam monitor jest wyłączony. Monitor może z kolei podać napięcie 5 V na pin HPD (Hot Plug Detect) złącza CON1. Moduł Pico wykrywa je za pomocą dzielnika rezystorowego 10 kΩ/10 kΩ oraz wejścia analogowego GP27 (pin 32), co pozwala stwierdzić obecność podłączonego monitora.

MOD2 i MOD3

Układy elektroniczne modułów MOD2 i MOD3 celowo zaprojektowano podobnie jak modułu MOD1, aby uprościć projekt.



Rysunek 3. Cztery pary sygnałów różnicowych DVI. Na ekranie oscyloskopu wszystkie przebiegi wyglądają podobnie. Warto zwrócić uwagę na ich symetrię, świadczącą o bardzo małej składowej stałej sygnału.

Przypuszczamy, że Czytelnicy znajdą wiele własnych zastosowań tego sprzętu i przygotują do niego własne oprogramowanie.

W modułach MOD2 i MOD3, podobnie jak w MOD1, przyciski S2 i S3 są podłączone między pin 3V_EN a masę. W odróżnieniu od MOD1 diody LED są połączone z pinem GP14 (19) przez rezystory 1 kΩ. Poza tym pełnią taką samą funkcję wskaźników stanu.

Pozostała część układu łączy gniazda USB-A (CON2 i CON3) z odpowiednimi modułami za pośrednictwem rezystorów szeregowych 22 Ω. Niektórzy Czytelnicy zapewne rozpoznają rozwiązanie zastosowane wcześniej w adapterze klawiatury USB do PS/2, w którym podobny układ umożliwiał podłączenie standardowych linii wejścia/wyjścia GP15 i GP16 (piny 20 i 21) do złącza USB.

Zworka JP1 łączy pin GP14 modułu MOD3 z pinem GP17 modułu MOD2. Dzięki temu moduł MOD2 może korzystać z drugiej diody LED sygnalizującej stan pracy, gdy moduł MOD3 nie jest używany. W pierwotnej wersji projektu planowaliśmy wykorzystać jeden moduł Pico do obsługi obu interfejsów USB. Do tego rozwiązania wrócimy w części poświęconej oprogramowaniu.

Połączenia wewnętrzne

Oprócz wspólnych linii zasilania VBUS i GND każdy z modułów MOD1...MOD3 jest połączony z pozostałymi dwoma modułami dwiema liniami interfejsu UART (RX i TX). Jest to możliwe dzięki temu, że mikrokontroler RP2040 ma dwa sprzętowe interfejsy UART.

Poniższy opis zakłada, że w złączu LK1 założono dwie zworki: jedną między pinami 1 i 2, a drugą między pinami 3 i 4.

Moduły MOD2 i MOD3 komunikują się z MOD1 za pomocą interfejsu UART0 wykorzystującego piny GP0 (1, TX) i GP1 (2, RX). Linie TX i RX są skrzyżowane: połączenie z MOD2 prowadzi do interfejsu UART0 modułu MOD1, natomiast z MOD3 do jego interfejsu UART1 (GP4 – pin 6, TX oraz GP5 – pin 7, RX).

Moduły MOD2 i MOD3 komunikują się ze sobą przez skrzyżowane linie swoich interfejsów UART1. Oznacza to, że pin 6 (TX) modułu MOD2 jest połączony z pinem 7 (RX) modułu MOD3 i odwrotnie. Widać więc, że MOD2 i MOD3 mają niemal identyczne połączenia zewnętrzne.

Alternatywna konfiguracja polega na założeniu jednej zworki w złączu LK1 między pinami 2 i 3. W takim przypadku dane z MOD3 trafiają do interfejsu UART0 modułu MOD2 zamiast do UART1.

Wykaz elementów:
1 dwustronna płytka drukowana, kod 07112231, 98 × 68 mm
1 czarna dwustronna płytka drukowana panelu przedniego: kod 07112232, 99 × 22 mm (do obudowy H0190) lub kod 07112233, 99 × 27 mm (do obudowy H0191)
1 obudowa z tworzywa ABS: 105 × 80 × 25 mm [Hammond RM2005STBK; Multicomp MP004813; Altronics H0190] lub 105 × 80 × 30 mm [Hammond RM2005MTBK; Multicomp MP004811; Altronics H0191]
1 moduł Raspberry Pi Pico z wgranym oprogramowaniem 0711223A.UF2 (MOD1)
1 moduł Raspberry Pi Pico z wgranym oprogramowaniem 0711223B.UF2 (MOD2)
1 moduł Raspberry Pi Pico z wgranym oprogramowaniem 0711223C.UF2 (MOD3)
1 gniazdo HDMI (CON1) [Stewart SS-53000-001]
2 gniazda USB-A, przewlekane, kątowe (CON2, CON3)
1 gniazdo USB-C, SMD, wyłącznie do zasilania (CON4) [GCT USB4135 lub podobne]
3 przyciski 6 mm, do montażu przewlekanego (S1...S3)
4 złącza „goldpin" 2-pinowe (JP1...JP4)
1 złącze „goldpin" 4-pinowe (LK1)
6 zworek (JP1...JP4, LK1)
6 listew męskich goldpin 20-stykowych (opcjonalnie; dla MOD1...MOD3)
6 listew żeńskich goldpin 20-stykowych (opcjonalnie; dla MOD1...MOD3; w obudowie H0190 mieszczą się tylko listwy niskoprofilowe)
4 nóżki samoprzylepne pasujące do użytej obudowy (np. okrągłe 8 mm)

Półprzewodniki
2 tranzystory MOSFET typu N 2N7002, SMD, SOT-23 (Q1, Q2)
3 zielone diody LED 3 mm, przewlekane (LED1...LED3)

Rezystory (wszystkie SMD, obudowa 0805, 1/8 W, 1%)
6 szt. 10 kΩ 2 szt. 5,1 kΩ 3 szt. 1 kΩ 8 szt. 270 Ω 4 szt. 22 Ω

Zestaw SC6917 zawiera wszystkie elementy z wyjątkiem obudowy. Należy jedynie wybrać odpowiedni wariant płytki drukowanej panelu przedniego, przeznaczony do obudowy Altronics H0190 lub H0191. Moduły Pico nie mają wgranego oprogramowania.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Na tym etapie zapewne łatwo już zrozumieć zasadę działania terminala. Jak zwykle jednak najważniejszą rolę odgrywa oprogramowanie.

Oprogramowanie układowe

Oprogramowanie układowe wszystkich trzech modułów Pico intensywnie wykorzystuje programowalny układ wejścia/wyjścia (PIO) mikrokontrolera RP2040. Opisaliśmy go w recenzji modułu Pico opublikowanej w „Silicon Chip" w grudniu 2021 roku (www.siliconchip.au/Article/15125).

PIO jest wyspecjalizowanym procesorem wykonującym niewielki zestaw instrukcji przeznaczonych do obsługi linii wejścia/wyjścia. Z łatwością emuluje interfejsy komunikacji szeregowej, takie jak UART czy SPI, a także generuje sygnały PWM, wykorzystywane między innymi do sterowania serwomechanizmami.

Mikrokontroler RP2040 zawiera dwa bloki PIO, a każdy z nich dysponuje czterema maszynami stanów. Można je traktować jako niewielkie, niezależne procesory, dzięki czemu RP2040 może emulować nawet osiem niezależnych urządzeń peryferyjnych.

Każdy blok PIO zawiera pamięć mieszczącą 32 słowa instrukcji. Każda maszyna stanów ma czterosłowowy wejściowy bufor FIFO („first in, first out", czyli „pierwsze weszło, pierwsze wyszło"; przypis redaktora) oraz podobny bufor wyjściowy. Jeśli wykorzystywane jest tylko wejście albo tylko wyjście, oba bufory FIFO można połączyć w jeden bufor o pojemności ośmiu słów. Ponieważ RP2040 ma architekturę 32-bitową, każde słowo ma długość 32 bitów.

Każda maszyna stanów zawiera także wejściowy i wyjściowy rejestr przesuwny. Odbierają one porcje danych i przesuwają je do procesora lub na zewnątrz po jednym albo kilku bitach, zgodnie z wymaganiami obsługiwanego protokołu szeregowego.

Dobrym przykładem prostego wykorzystania bloku PIO jest generowanie sygnału DVI. Każdy piksel strumienia wideo DVI jest kodowany w postaci 10 bitów wysyłanych z bardzo dużą szybkością. Dla typowej rozdzielczości 640×480 przy częstotliwości odświeżania 60 Hz częstotliwość zegara pikseli wynosi 25,175 MHz. Oznacza to, że częstotliwość zegara bitowego musi być dziesięciokrotnie większa, czyli wynosić 251,75 MHz.

W przypadku sygnału DVI blok PIO pobiera z bufora FIFO porcje po 10 bitów i wysyła je szeregowo z częstotliwością zegara bitowego. Mikrokontroler RP2040 jest również wyposażony w kontroler bezpośredniego dostępu do pamięci (DMA), który zapewnia ciągłe dostarczanie danych z pamięci RAM do bloku PIO bez angażowania głównego rdzenia procesora. Zadaniem procesora jest jedynie przygotowanie danych w pamięci RAM i skonfigurowanie kontrolera DMA tak, aby przekazywał je do bloku PIO we właściwych momentach. Wymagana częstotliwość 251,75 MHz powoduje konieczność podkręcenia taktowania mikrokontrolera. W naszym projekcie moduł Pico pracuje z częstotliwością 252 MHz, co mieści się w granicach tolerancji określonych przez standard VESA.

W rzeczywistości kontroler DMA i bufor FIFO przetwarzają dane w blokach 20-bitowych, przesyłając jednocześnie dwa piksele. Teoretycznie 32-bitowy procesor ARM mógłby operować blokami obejmującymi trzy piksele (30 bitów), jednak liczba 800 pikseli tworzących każdą linię obrazu (łącznie z okresami synchronizacji) nie jest podzielna przez trzy.

Blok PIO generujący sygnał wideo wymaga ciągłego dostarczania dużej ilości danych. Dlatego jeden z dwóch rdzeni mikrokontrolera Pico odpowiada za kodowanie danych z bufora obrazu (RGB lub monochromatycznego) do postaci TMDS wymaganej przez blok PIO.

Drugi rdzeń modułu MOD1 odbiera dane z portów szeregowych i pracuje jako terminal VT100. Terminal VT100 był „nieinteligentnym" terminalem wprowadzonym na rynek w 1978 roku. Było to samodzielne urządzenie umożliwiające wielu użytkownikom łączenie się z dużym komputerem klasy mainframe za pośrednictwem prostego interfejsu szeregowego. Obecnie jego funkcję pełnią programy terminalowe, takie jak TeraTerm czy minicom, działające na komputerach stacjonarnych i laptopach.

Standard VT100 definiuje sekwencje sterujące Escape, umożliwiające wykonywanie takich operacji, jak przesuwanie kursora, zmiana koloru tekstu czy czyszczenie ekranu. Ich nazwa pochodzi od tego, że rozpoczynają się znakiem ASCII ESC (kod 0x1B).

Ponieważ wszystkie odmiany Micromite i PicoMite wykorzystują standard VT100, jest to najprostszy sposób komunikacji z tymi modułami. Dzięki temu moduł MOD1 wraz ze współpracującymi z nim elementami pełni w praktyce funkcję prostego terminala ekranowego.

Moduł MOD1 przechowuje w specjalnym buforze znaki wraz z ich atrybutami (takimi jak kolor czy podkreślenie) i aktualizuje jego zawartość zgodnie z danymi odbieranymi przez port szeregowy. Następnie zawartość bufora jest przekształcana do postaci sygnału DVI i wysyłana do złącza CON1.

Dioda LED1 świeci, gdy moduł MOD1 wykryje napięcie na pinie HPD złącza CON1, co oznacza, że do terminala jest podłączony monitor lub wyświetlacz.

MOD2

Moduł MOD2 pracuje jako host USB dla urządzenia z wirtualnym portem szeregowym USB, wykorzystując bibliotekę Adafruit TinyUSB. Biblioteka ta zawiera również bibliotekę Pico-PIO-USB, która umożliwia realizację interfejsu USB z użyciem dwóch linii GPIO.

Port USB został zaimplementowany z wykorzystaniem bloku PIO, a nie sprzętowego kontrolera USB mikrokontrolera

Komputer typu „wszystko w jednym"

Moduł MOD2 można zastąpić modułem Pico (lub Pico W) z innym oprogramowaniem układowym. Właśnie temu służy złącze LK1. Po założeniu zworki między pinami 2 i 3 dane szeregowe odbierane z MOD3 i przesyłane do MOD1 zostaną skierowane do interfejsu UART0 (piny GP0 i GP1). Aby wykorzystać interfejs UART0 na pinach GP0 i GP1 jako konsolę, w języku BASIC dla PicoMite należy ustawić następującą opcję:

```
OPTION SERIAL CONSOLE 0,1,B
```

Domyślna szybkość transmisji używana przez moduły MOD2 i MOD3 wynosi 115 200 bitów/s, co odpowiada domyślnemu ustawieniu w PicoMite. W razie potrzeby można ją zmienić za pomocą polecenia:

```
OPTION BAUDRATE 115200
```

PicoMite zostaje w ten sposób zintegrowany z komputerem wyposażonym w klawiaturę USB i cyfrowy interfejs wyświetlania obrazu. Dostęp do wolnych linii wejścia/wyjścia jest wprawdzie nieco utrudniony, ale w zamian otrzymujemy poręczne urządzenie, doskonale nadające się do eksperymentów z językiem BASIC lub możliwościami modułu WebMite.

Można również napisać własny program dla modułu MOD2, tworząc komputer dostosowany do indywidualnych potrzeb. Istnieje już kilka projektów wykorzystujących moduł Pico do emulacji starszych komputerów.

eprasa.pl 17a47aa7e2

RP2040, z dwóch powodów. Po pierwsze, połączenie z liniami GPIO jest znacznie prostsze, ponieważ wewnętrzne linie danych kontrolera USB są wyprowadzone jedynie do gniazda USB na płytce Pico oraz do dwóch pól testowych na jej spodzie. Po drugie, rozwiązanie to udostępnia dwa porty USB, dzięki czemu terminal może przezroczyście połączyć moduł Micromite (lub inne urządzenie podłączone do złącza CON2) z komputerem, przekazując dane między nimi, a jednocześnie przechwytując je na potrzeby własnego działania.

Na tym polega zasadnicza funkcja modułu MOD2. Stanowi on pośrednika między urządzeniem podłączonym do złącza CON2 a komputerem podłączonym do gniazda micro-USB modułu MOD2. Może również przekazywać dane otrzymane z MOD3 do podłączonego urządzenia oraz przesyłać dane do MOD1, jak pokazano na rysunku 1.

Dioda LED podłączona do pinu GP14 świeci, gdy do złącza CON2 jest podłączone zgodne urządzenie, a miga podczas odbierania danych z modułu MOD3.

Biblioteka Pico-PIO-USB wykorzystuje niemal wszystkie zasoby bloku PIO. Jest to główny powód, dla którego funkcję tę musi realizować oddzielny moduł Pico i nie można jej połączyć z zadaniami żadnego z pozostałych modułów.

MOD3

Podobnie jak MOD2, moduł MOD3 wykorzystuje bibliotekę Adafruit TinyUSB i pracuje jako host USB. Różnica polega na tym, że jest przeznaczony do współpracy z klawiaturą USB. Dlatego jego część sprzętowa jest niemal identyczna jak w module MOD2, natomiast oprogramowanie pełni inną funkcję.

Oprogramowanie modułu MOD3 ma wiele wspólnego z programem adaptera klawiatury USB do PS/2. W adapterze naciśnięcia klawiszy odbierane z klawiatury USB były zamieniane na kody klawiatury PS/2. W module MOD3 są one natomiast przekształcane w dane przesyłane przez interfejs szeregowy oraz sekwencje sterujące VT100.

Moduł MOD3 monitoruje również stany klawiszy Num Lock, Scroll Lock i Caps Lock, odpowiednio sterując diodami LED klawiatury. Dane przesyłane przez interfejs szeregowy zależą od stanu klawiszy Num Lock i Caps Lock.

Dioda LED3 świeci po wykryciu podłączonej klawiatury, a krótko miga przy każdym naciśnięciu i zwolnieniu klawisza. Podczas normalnej pracy diody LED2 i LED3 migają według różnych sekwencji.

Konfiguracje dla zaawansowanych użytkowników

Chociaż opisywany terminal został zaprojektowany jako znakowy terminal wideo, jego modułowa budowa pozwala na daleko idące modyfikacje i realizację wielu innych zastosowań.

Można na przykład zbudować terminal wyłącznie z modułu MOD1 i współpracujących z nim elementów, wykorzystując go do generowania niestandardowego sygnału wideo dla nowoczesnego monitora cyfrowego.

Sam moduł MOD2 wraz z gniazdem USB i pozostałymi współpracującymi z nim elementami może tworzyć urządzenie odbierające dane z interfejsu wirtualnego portu szeregowego USB.

Autonomiczny moduł MOD3 wraz ze współpracującymi z nim elementami umożliwia zbudowanie urządzenia o możliwościach podobnych do adaptera klawiatury USB dla mikrokontrolerów („Silicon Chip", luty 2019; www.siliconchip.au/Article/11414).

Wszystkie opisane rozwiązania wymagają jednak, aby moduł Pico był połączony przez interfejs szeregowy z innym urządzeniem.

W pierwszych prototypach funkcje modułów MOD2 i MOD3 były realizowane przez jeden moduł Pico. Biblioteka Pico-PIO-USB obsługuje koncentrator USB (hub), co pozwala na podłączenie wielu urządzeń, ale tylko jednego koncentratora. Tymczasem wiele klawiatur USB ma wbudowany koncentrator, przynajmniej z punktu widzenia systemu. Okazało się, że po podłączeniu takich klawiatur przez dodatkowy koncentrator nie działały one prawidłowo.

Moduł Pico kosztuje mniej więcej tyle samo, co najtańszy koncentrator USB, jaki udało nam się znaleźć. Dlatego zdecydowaliśmy się dodać do systemu trzeci moduł Pico i dodatkowe gniazdo USB. Rozwiązanie to okazało się bardzo wygodne, a cały system bez problemu mieści się w jednej obudowie.

Moduły MOD2 i MOD3 mogą wykonywać tylko funkcje, do których zostały zaprogramowane. Dzięki niemal identycznym połączeniom zewnętrznym można jednak zamienić je miejscami na płytce drukowanej, wprowadzając jedynie niewielkie zmiany w oprogramowaniu.

Uwagi do części sprzętowej

Zbliżamy się do końca pierwszej części artykułu. W kolejnym numerze opiszemy montaż, uruchomienie, konfigurację i sposób korzystania z całego systemu. Listę elementów publikujemy już w tym numerze, aby Czytelnicy mogli wcześniej skompletować wszystkie potrzebne części.

W projekcie zastosowano kilka elementów SMD, ale są to głównie elementy bierne w obudowach 0805, więc ich przylutowanie nie powinno sprawić większych trudności. Gniazdo HDMI ma wyprowadzenia o rastrze 0,5 mm i jest prawdopodobnie najtrudniejszym elementem do przylutowania. Nie powinno to jednak stanowić problemu, jeśli dysponujecie dobrym topnikiem w postaci pasty, odpowiednim oświetleniem oraz lupą.

Dostępne są dwa warianty obudowy. Jednym z nich jest obudowa Altronics H0190 (lub jej odpowiednik) o wysokości 25 mm. Zaprojektowano płytkę drukowaną o kodzie 07112232, dopasowaną do panelu przedniego tej obudowy. Wariant ten jest szczególnie polecany, jeśli moduły Pico mają zostać na stałe przylutowane do płytki drukowanej za pomocą złączy goldpin.

Alternatywnym rozwiązaniem jest obudowa H0191 o wysokości 30 mm, do której pasuje płytka drukowana o kodzie 07112233. Obudowa ta umożliwia zamontowanie modułów MOD1...MOD3 w podstawkach, dzięki czemu można je w razie potrzeby wyjmować. Jest to szczególnie przydatne, jeśli dla modułu MOD2 planowane jest użycie alternatywnego oprogramowania układowego, co opisano w ramce „Tworzenie komputera typu all-in-one". ■

Tim Blythman

Materiały dodatkowe dostępne są na stronie Silicon Chip:
https://www.siliconchip.com.au/Shop/8/6914

Materiały dodatkowe są również dostępne na stronie elportal.pl/do-pobrania

Artykuł reprodukowano na podstawie umowy z magazynem „Silicon Chip", 2022.
www.siliconchip.com.au

eprasa.pl 17a47aa7e2

Nauka elektroniki z modułem ESP32, część 1

Pierwsze kroki

Witamy w naszym nowym cyklu „Nauka elektroniki z modułem ESP32”! W pierwszym artykule zaczniemy od omówienia modułu z mikrokontrolerem ESP32 oraz sposobu korzystania z jego środowiska programistycznego. Następnie pokażemy, jak używać modułu ESP32 do odczytywania wbudowanych czujników dotykowych. W projekcie praktycznym wykorzystamy ESP32 w przenośnym nadajniku alarmowym.

Tematyką tego odcinka jest:
- instalacja i obsługa środowiska Arduino IDE,
- wprowadzanie i testowanie programu,
- użycie modułu ESP32 na płytce prototypowej.

Dlaczego ESP32?

ESP32 wybraliśmy jako platformę dla tej serii z kilku istotnych powodów. Mówiąc najprościej, ESP32 to rozwiązanie dobrze już sprawdzone (wprowadzone na rynek w 2016 roku), wydajne i łatwe w obsłudze. Oferuje szerokie możliwości konfiguracji i może być wykorzystywane w bardzo różnych zastosowaniach – od zupełnie podstawowych (np. sterowania wyświetlaczem LED) po najbardziej wymagające (np. strumieniowe przesyłanie i dekodowanie plików MP3). ESP32 oferuje rozbudowany zestaw wejść i wyjść analogowych oraz cyfrowych, asynchroniczny interfejs szeregowy (UART), a także możliwość dołączania popularnych układów wyposażonych w interfejsy SPI i I²C. Obsługuje również Ethernet (z wykorzystaniem zewnętrznego układu PHY – przypis redaktora), Bluetooth oraz Wi-Fi. Płytka z modułem ESP32 (**rysunek 1.1**) kosztuje około 30 zł, co rzeczywiście trudno przebić!

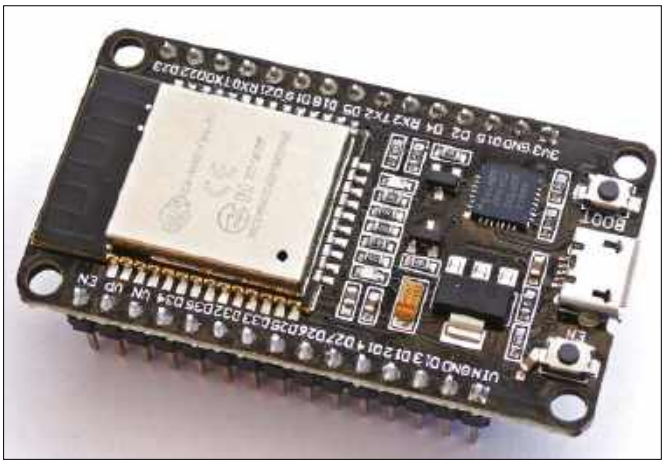
Dużym atutem ESP32 jest wbudowany układ radiowy. Pozwala to uniknąć

Nauka elektroniki

Jest to nasz nowy cykl edukacyjny poświęcony wykorzystaniu popularnego modułu ESP32 do nauki podstaw elektroniki i programowania. Nie zakładamy, że Czytelnik ma wcześniejsze doświadczenie w programowaniu ani elektronice. Jeśli znacie jedną z tych dziedzin, ale druga jest dla Was nowością, trafiliście we właściwe miejsce. A jeśli dopiero zaczynacie przygodę zarówno z elektroniką, jak i programowaniem, również nie ma powodów do obaw. Nasz cykl opiera się na stopniowym i praktycznym zdobywaniu wiedzy. Będzie mnóstwo okazji do nauki i samodzielnego eksperymentowania.
Nie zamieszczamy zbyt wielu podstawowych informacji teoretycznych, ponieważ można je znaleźć w innych źródłach, między innymi w serii „Teach-In”, publikowanej na łamach „Practical Electronics”:

https://bit.ly/pe-ti
https://bit.ly/pe-ti-bundle

W kolejnych odcinkach znajdziecie projekty i zadania, które pomogą lepiej zrozumieć omawiane zagadnienia.



Rysunek 1.1. Płytka rozwojowa z modułem ESP32.

Rysunek 1.2. Moduły ESP8266 i ESP32.

eprasa.pl 17a47aa7e2

kłopotliwego dołączania zewnętrznych elementów toru radiowego, co ze względu na bardzo wysokie częstotliwości sygnałów bywa trudne. Moduł zawiera wzmacniacz mocy w.cz. (o mocy wyjściowej do 20 dBm), niskoszumny wzmacniacz odbiorczy, przełącznik antenowy oraz filtry w.cz. Dzięki temu nie trzeba samodzielnie projektować i wykonywać skomplikowanego toru radiowego.

Moduł ESP32, bogato wyposażony w różnorodne funkcje, ugruntował w ostatnich latach swoją pozycję jako centralny element wielu niedrogich urządzeń sterujących oraz systemów IoT (Internet of Things). Powody jego sukcesu to między innymi:

Doskonały system łączności

ESP32, poza podstawowym interfejsem szeregowym (UART), oferuje wiele możliwości komunikacji z wykorzystaniem Wi-Fi 2,4 GHz, Bluetooth i Ethernetu. Interfejs Bluetooth obsługuje zarówno tryb klasyczny, jak i Bluetooth Low Energy (BLE). Wi-Fi jest zgodne ze standardem IEEE 802.11 i może pracować zarówno w trybie punktu dostępowego (AP), jak i w trybie stacji (STA). Pierwszy z tych trybów pozwala utworzyć z ESP32 własną lokalną sieć bezprzewodową, natomiast drugi umożliwia połączenie z istniejącą siecią Wi-Fi i dostęp do Internetu.

Niski pobór mocy

Niewielki pobór mocy sprawia, że ESP32 doskonale nadaje się do aplikacji zasilanych z baterii. Moduł można przełączyć w tryb głębokiego uśpienia (Deep Sleep), w którym pobór prądu wynosi zaledwie kilka mikroamperów.

Dwurdzeniowy mikrokontroler

Większość modułów ESP32 zawiera dwurdzeniowe mikrokontrolery. Program może być wykonywany równolegle przez oba rdzenie.

Oprogramowanie systemowe

Oprogramowanie producenta wykorzystuje system FreeRTOS. Ten zaawansowany, dobrze udokumentowany system operacyjny typu open source obsługuje wielozadaniowość i udostępnia bogaty zestaw funkcji API (interfejsu programowania aplikacji).

Rozbudowane możliwości wejścia/wyjścia

ESP32 współpracuje z szeroką gamą urządzeń zewnętrznych. Ma wbudowane przetworniki DAC i ADC, generatory PWM oraz wejścia czujników dotykowych, a także interfejsy I²C, SPI i UART.

Łatwość programowania

Pisanie programów dla modułu jest proste. Można do tego wykorzystać środowisko Arduino IDE lub inne popularne środowiska programistyczne (patrz dalej).

Niski koszt i szeroka dostępność

Moduły i zestawy rozwojowe oparte na ESP32 są dostępne u wielu dostawców w bardzo atrakcyjnych cenach (zazwyczaj około 30...50 zł za kompletną płytkę).

Czym jest ESP32?

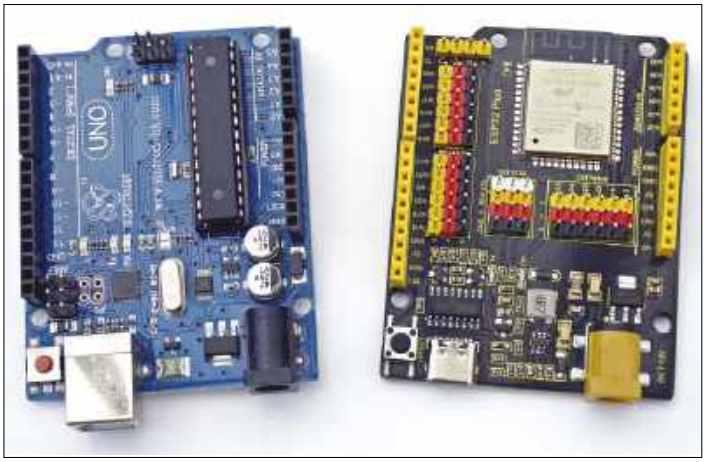
ESP32 to ogólna nazwa rodziny zaawansowanych układów typu System on Chip (SoC) firmy Espressif. Określenie ESP32 odnosi się również do modułów oraz licznych płytek rozwojowych opartych na tych układach. Układ SoC ESP32 jest następcą cieszącego się dużą popularnością ESP8266 (rysunek 1.2), oferując przy tym szereg istotnych nowych funkcji.

Układ SoC ESP32 jest przeznaczony do wbudowywania w urządzenia realizujące określone zadania, takie jak kontrola dostępu, monitorowanie środowiska, sterowanie

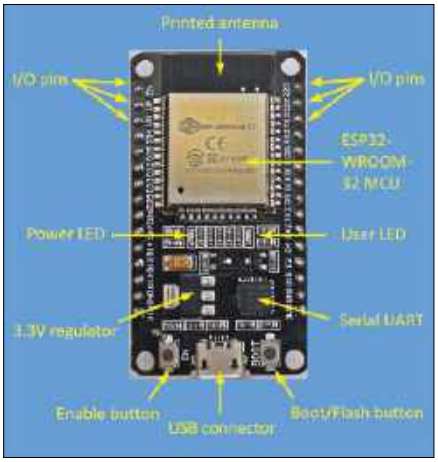
Tabela 1.1

element	opis	uwagi
mikrokontroler	32-bitowy, dwurdzeniowy, technologia 40 nm	istnieją również wersje jednordzeniowe
taktowanie procesora	160 lub 240 MHz	
pamięć ROM	448 KB	Pamięć rozruchowa i podstawowa
pamięć RAM	520 KB	Pamięć instrukcji i danych
pamięć zewnętrzna	Do 32 MB pamięci Flash	
przetwornik cyfrowo-analogowy (DAC)	2 × 8-bitowy	
przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC)	12-bitowy, 18 kanałów	przetwornik typu SAR (z rejestrem kolejnych przybliżeń)
GPIO	34 programowane piny wejścia/wyjścia	ograniczenia: patrz tabela 1.2
SPI	cztery kanały	synchroniczny interfejs szeregowy
I²S	dwa kanały	interfejs audio
I²C	dwa kanały	dwuprzewodowy interfejs szeregowy
UART	trzy porty szeregowe	
Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n	
Bluetooth	V4.2 BR/EDR i BLE 1	
Ethernet	interfejs MAC z dedykowanym kanałem dostępu do pamięci	
RTC	zegar czasu rzeczywistego	działa również w różnych trybach uśpienia
sterownik pamięci	sterownik hosta SD/SDIO/CE-ATA/MMC	dla pamięci zewnętrznej
PWM do sterowania silników i diod LED	do 16 kanałów	
łącze do pilota na podczerwień	TX/RX do 8 kanałów	
czujniki dotykowe	10 wejść dla pojemnościowych czujników dotykowych	przez piny GPIO
zasilanie	+3,3 V lub +5 V ze złącza USB	prąd zasilania w trybie głębokiego uśpienia spada do zaledwie kilku µA

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 1.3. Arduino UNO i płytka rozwojowa z modułem ESP32 o takim samym formacie.



Rysunek 1.4. Typowa płytka rozwojowa ESP32.

maszynami czy automatyka domowa. W postaci modułu jest montowany na niewielkiej płytce zawierającej dodatkowe elementy, między innymi drukowaną antenę Wi-Fi.

Płytki rozwojowe (ang. Devkits) idą o krok dalej, zapewniając jeszcze lepsze warunki do eksperymentowania i nauki. Udostępniają większość wyprowadzeń wejścia/wyjścia modułu ESP32, a ponadto są wyposażone w interfejs USB do programowania oraz stabilizator napięcia. Nasza seria „Nauka elektroniki" skupia się na najpopularniejszych płytkach rozwojowych wykorzystujących moduł ESP-WROOM-32. Są one dostępne w wersjach 30- i 36-pinowych. Do realizacji opisywanych przez nas układów można użyć każdej z nich, jednak w większości przykładów wykorzystujemy mniejszą wersję 30-pinową. Moduł ESP-WROOM-32 ma imponujące parametry, zestawione w **tabeli 1.1**.

I wreszcie, osoby znające płytki Arduino UNO zauważą, że dostępne są również płytki z ESP32 o układzie wyprowadzeń zgodnym z Arduino UNO (**rysunek 1.3**). Dzięki temu można korzystać z modułów i nakładek zaprojektowanych dla Arduino UNO również z układem ESP32. Układ ESP32 został nawet wykorzystany w najnowszym module Arduino UNO R4 Wi-Fi. Połączono w nim mikrokontroler RA4M1 firmy Renesas z układem ESP32-S3 firmy Espressif, uzyskując wyjątkowo wydajne i wszechstronne rozwiązanie.

Jak będzie wyglądał ten cykl?

Każdy odcinek „Nauki elektroniki" będzie składał się z następujących działów:

Sprawdź sam!

Mówiąc najprościej, jest to moment, w którym można przestać czytać i samodzielnie sprawdzić w praktyce zagadnienia omówione w tekście. Rozdział ten pomoże utrwalić wiedzę poprzez praktyczne zastosowanie przedstawionych zagadnień.

Projekt praktyczny

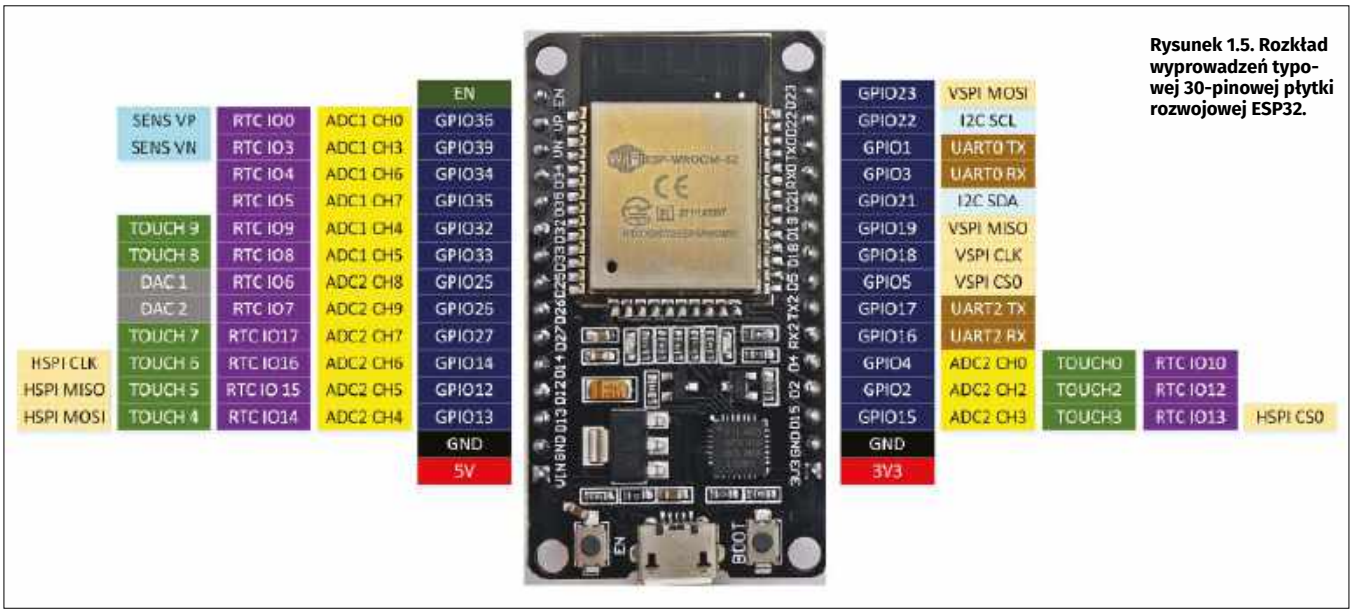
Projekt praktyczny będzie ilustrował zagadnienia omawiane w każdym odcinku cyklu. Większość projektów można wykonać w ciągu kilku godzin, a ich elementy warto zachować do wykorzystania w kolejnych projektach.

Warsztaty programowania

W trakcie serii będziemy stopniowo rozwijać umiejętności programistyczne. Choć nasz cykl nie jest poświęcony wyłącznie programowaniu, warto zrozumieć, jak działają programy i jak doskonalić własny styl programowania.

Zadanie

Po wykonaniu projektu praktycznego być może zechcecie spróbować swoich sił, realizując własne zadanie. W każdym odcinku „Nauki elektroniki" zaproponujemy Wam takie wyzwanie. Otrzymacie kilka wskazówek, ale sposób rozwiązania pozostawimy Wam.



Rysunek 1.5. Rozkład wyprowadzeń typowej 30-pinowej płytki rozwojowej ESP32.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Tabela 1.2

oznaczenie	funkcja	kierunek	uwagi
GPIO0	TX0 (port szeregowy)	wyjście	programowanie i debugowanie szeregowe
GPIO2	dioda LED użytkownika	wejście/wyjście	pin konfiguracyjny (strapping), unikać podłączania układów zewnętrznych
GPIO3	RX0 (port szeregowy)	wejście	programowanie i debugowanie szeregowe
GPIO4	wejście/wyjście	wejście/wyjście	do ogólnego użytku
GPIO5	wejście/wyjście	wejście/wyjście	pin konfiguracyjny (strapping), unikać podłączania układów zewnętrznych
GPIO6-11	Pamięć FLASH	nie dotyczy	połączone z pamięcią Flash – nie używać
GPIO12	wejście/wyjście	wejście/wyjście	pin konfiguracyjny (strapping), unikać podłączania układów zewnętrznych
GPIO13-14	wejście/wyjście	wejście/wyjście	do ogólnego użytku
GPIO15	wejście/wyjście	wejście/wyjście	pin konfiguracyjny (strapping), wpływa na komunikaty rozruchowe UART
GPIO16-33	wejście/wyjście	wejście/wyjście	do ogólnego użytku
GPIO34-39	wejście/wyjście	wejście	tylko wejścia

Aby pomóc Wam uniknąć różnych pułapek, zamieścimy krótkie porady oznaczone hasłem „No jasne!". Będą one zawierały wskazówki dotyczące problemów, z którymi możecie się zetknąć podczas realizacji projektów. Umieścimy je w miejscach, w których będą najbardziej przydatne. W pierwszej części znajdziecie pięć takich porad. Mamy nadzieję, że pozwolą Wam uniknąć uciążliwego „drapania się po głowie", którego sami doświadczyliśmy podczas przygotowywania tego cyklu.

Co będzie potrzebne?

Aby zapoznawać się z przedstawionymi przykładami i realizować opisywane projekty, będziecie potrzebowali kilku podstawowych elementów. Staraliśmy się, aby wymagane wyposażenie było proste i niedrogie. Podejrzewamy też, że wielu Czytelników ma już większość potrzebnych rzeczy pod ręką. Jeśli nie, bez trudu znajdziecie je u licznych dostawców. W kolejnych odcinkach będziemy podawać przykładowe źródła zakupu.

Aby rozpocząć, będziecie potrzebować:

- płytki rozwojowej z modułem ESP32 (patrz niżej),
- prototypowej płytki stykowej z przewodami połączeniowymi do dołączania elementów zewnętrznych,
- kabla USB do podłączenia płytki rozwojowej do komputera,
- bezpłatnego zintegrowanego środowiska programistycznego Arduino IDE zainstalowanego na komputerze (patrz niżej),
- zasilacza USB 5 V (do niektórych projektów),
- standardowej czerwonej diody LED oraz rezystora 150 Ω.

Programowanie modułu ESP32

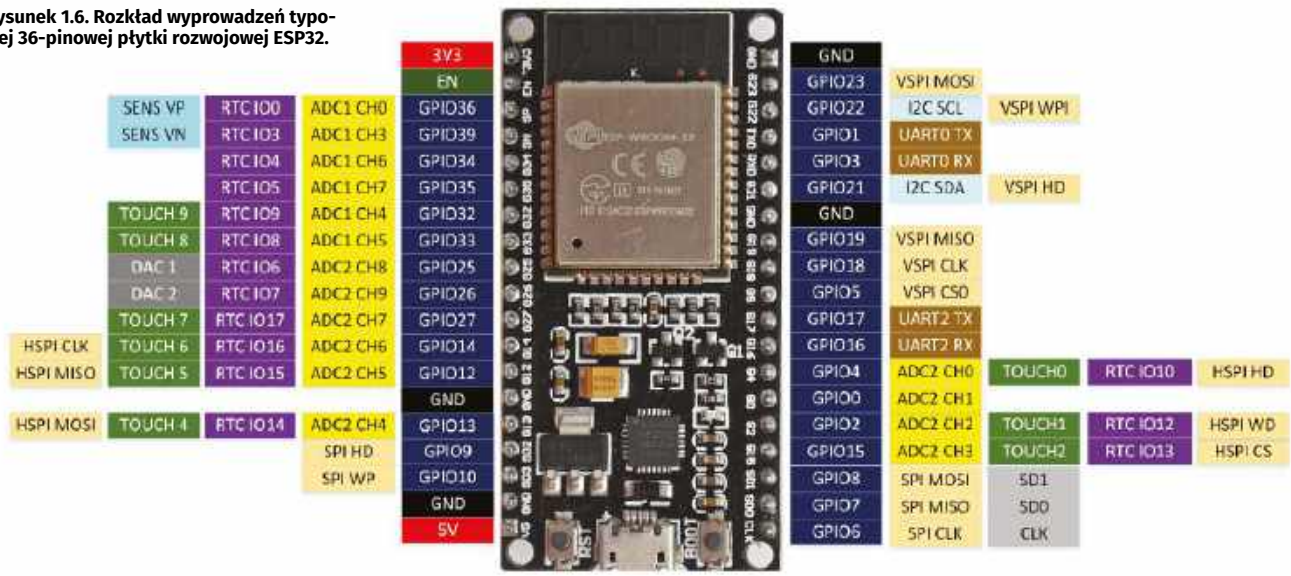
ESP32 może współpracować z kilkoma popularnymi środowiskami programistycznymi, między innymi:

- Arduino IDE,
- PlatformIO IDE (VS Code),
- LUA,
- MicroPython,
- Espressif IDF (IoT Development Framework).

Wielu Czytelników zna już środowisko Arduino IDE, dlatego właśnie z niego będziemy korzystać. Jest ono dość intuicyjne w obsłudze, a jego pobranie i używanie jest bezpłatne. Ponadto dostępna jest obszerna dokumentacja oraz wiele materiałów szkoleniowych.

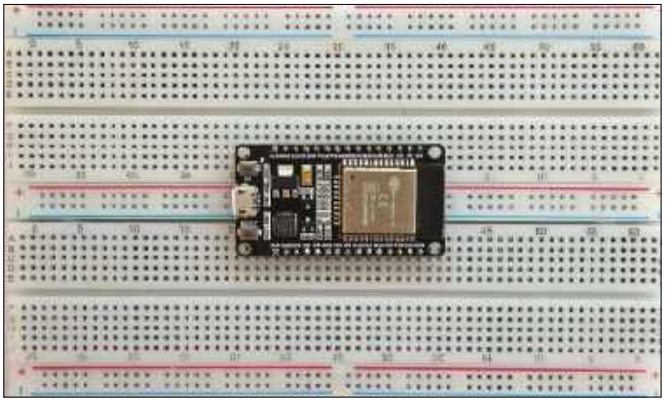
No jasne!

Na rynku dostępnych jest wiele płytek deweloperskich ESP32 od różnych dostawców i producentów. Ich funkcje, układ komponentów oraz wyprowadzenia pinów mogą się różnić od tych przedstawionych na rysunku 1.4. W tej serii artykułów/poradników użyliśmy najbardziej typowego zestawu pinów i połączeń, jednak przed podłączeniem czegokolwiek do płytki lub podpięciem zasilania ważne jest, aby dokładnie sprawdzić układ i konfigurację Twojego konkretnego modelu.

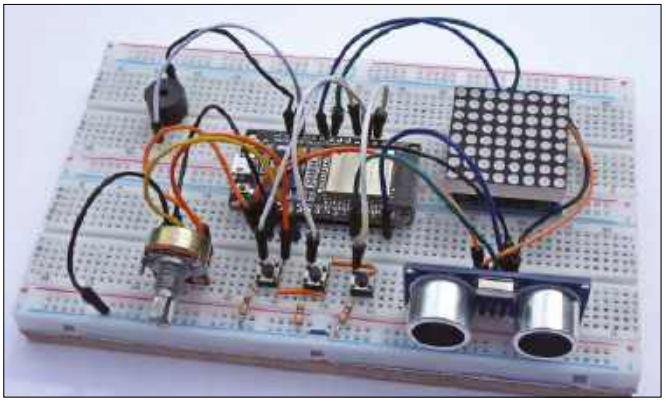


Rysunek 1.6. Rozkład wyprowadzeń typowej 36-pinowej płytki rozwojowej ESP32.

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 1.7. Dwie nieznacznie zmodyfikowane płytki stykowe tworzą wygodną podstawę dla 30-pinowej płytki rozwojowej ESP32.



Rysunek 1.8. Typowy układ na płytce stykowej, gotowy do testowania.

Środowisko można rozszerzać o biblioteki obsługujące bardzo szeroką gamę urządzeń peryferyjnych. Aby pokazać, jak proste może być programowanie modułu ESP32, przedstawiamy przykładowy program, który powoduje miganie diody LED wbudowanej w moduł w odstępach jednej sekundy. Powinniście od razu zorientować się, co robi ten program, nawet jeśli widzicie go po raz pierwszy!

Zwróćcie uwagę, że tekst programu zawiera kilka komentarzy, umieszczonych między znakami /* i */, a także po znakach //. Nie mają one żadnego wpływu na działanie programu, ale dla programisty są niezwykle cenne. Ważna wskazówka: starajcie się, aby komentarze były krótkie, ale treściwe.

Programowanie jest procesem iteracyjnym, polegającym na wielokrotnym wprowadzaniu i poprawianiu programu, przesyłaniu go do urządzenia docelowego, uruchamianiu, usuwaniu błędów i optymalizacji. Cykl ten trzeba zwykle powtórzyć wiele razy, zanim program zacznie działać zgodnie z oczekiwaniami. Z czasem zauważycie jednak, że raz opracowane fragmenty programu można z powodzeniem wykorzystywać także w innych projektach. To kolejny powód, dla którego warto komentować kod – aby w przyszłości można było szybko zrozumieć, co robi, jak go wykorzystać i w razie potrzeby zmodyfikować.

Co znajduje się na płytce?

Rysunek 1.4 przedstawia typową płytkę rozwojową ESP32. Opisaliśmy na niej najważniejsze elementy i ich funkcje. Jak widać, wzdłuż dłuższych boków płytki znajdują się wyprowadzenia, natomiast na jej przeciwległych końcach umieszczono drukowaną antenę Wi-Fi i złącze USB. Obok złącza USB znajdują się dwa małe przyciski oznaczone EN (Enable) i BOOT. Służą one odpowiednio do ponownego uruchamiania modułu oraz do wgrywania programu. Na płytce znajdują się również dwie diody LED. Dioda Power sygnalizuje obecność zasilania, natomiast dioda User jest przeznaczona do celów testowych. Będziemy z niej korzystać w dalszej części cyklu.

Konfigurację wyprowadzeń GPIO modułu ESP32 przedstawiono w **tabeli 1.2**. Pamiętajcie, że poszczególne piny mogą pełnić wiele różnych funkcji, a nie wszystkie nadają się do zastosowań ogólnych. Do takich zastosowań zalecane są piny oznaczone kolorem zielonym.

Wykaz wyprowadzeń typowych 30- i 36-pinowych płytek ESP32 przedstawiono odpowiednio na **rysunkach 1.5** i **1.6**. Pokazano na nich różne funkcje poszczególnych wyprowadzeń GPIO. Zwróćcie uwagę, że numery GPIO nie zawsze są kolejne, a niektóre piny mogą pełnić nawet pięć różnych funkcji. Na przykład pin GPIO4 można skonfigurować do pracy jako:

- zwykły cyfrowy pin wejścia/wyjścia,
- wejście analogowe (kanał 0 przetwornika ADC2),
- wejście czujnika dotykowego,
- we współpracy z zegarem czasu rzeczywistego (RTC),
- linię interfejsu SPI (szeregowego interfejsu peryferyjnego).

W tej chwili może się to wydawać nieco zagadkowe, ale wszystko stanie się jaśniejsze, gdy przejdziemy do praktycznych przykładów wykorzystania układu oraz sposobów współpracy z urządzeniami zewnętrznymi.

Płytki prototypowe

Do dołączania elementów elektronicznych do płytki rozwojowej potrzebna będzie prototypowa płytka stykowa. Płytki takie są dostępne w różnych rozmiarach i mają różną liczbę pól stykowych. W naszym cyklu, ze względu na rozmiary płytki z modułem ESP32, przyjęliśmy rozwiązanie oparte na dwóch oddzielnych płytkach stykowych umieszczonych obok siebie. Jedną z nich zmodyfikowaliśmy, odłączając jedną z szyn zasilających (czerwoną i niebieską), a następnie obie płytki przykleiliśmy do niewielkiej

Program przykładowy

```
/* Miganie diodą LED na module */
int ledPort = 2;                  // dioda LED jest podłączona do GPIO2
// Inicjalizacja
void setup() {
    pinMode(ledPort, OUTPUT);
}
// Pętla główna
void loop() {
    digitalWrite(ledPort, HIGH);  // włącz diodę LED
    delay(1000);                  // opóźnienie 1 s
    digitalWrite(ledPort, LOW);   // wyłącz diodę LED
    delay(1000);                  // opóźnienie 1 s
}
```

No jasne!

Na rynku dostępnych jest kilka wersji płytek rozwojowych ESP32, różniących się między innymi liczbą wyprowadzeń. Najczęściej spotykane są wersje 30- i 36-pinowe. Mogą również występować niewielkie różnice w oznaczeniach wyprowadzeń. Może się także okazać, że na Waszej płytce nie wyprowadzono wszystkich sygnałów wymienionych w **tabeli 1.2**. Wyprowadzenia zalecane do zastosowań ogólnych zaznaczono w tabeli kolorem zielonym.

eprasa.pl 17a47aa7e2

podstawy z płyty MDF. **Rysunek 1.7** pokazuje sposób wykonania takiej konstrukcji, natomiast na **rysunku 1.8** przedstawiono typowy układ z płytką ESP32 i dołączonymi elementami.

Instalacja i konfiguracja środowiska Arduino IDE

Zanim zaczniemy wgrywać program do modułu ESP32, musimy podłączyć go do komputera, na którym zainstalowano zintegrowane środowisko programistyczne Arduino IDE. Proces ten jest dość prosty, wymaga jednak połączenia z Internetem w celu pobrania najnowszej wersji środowiska.

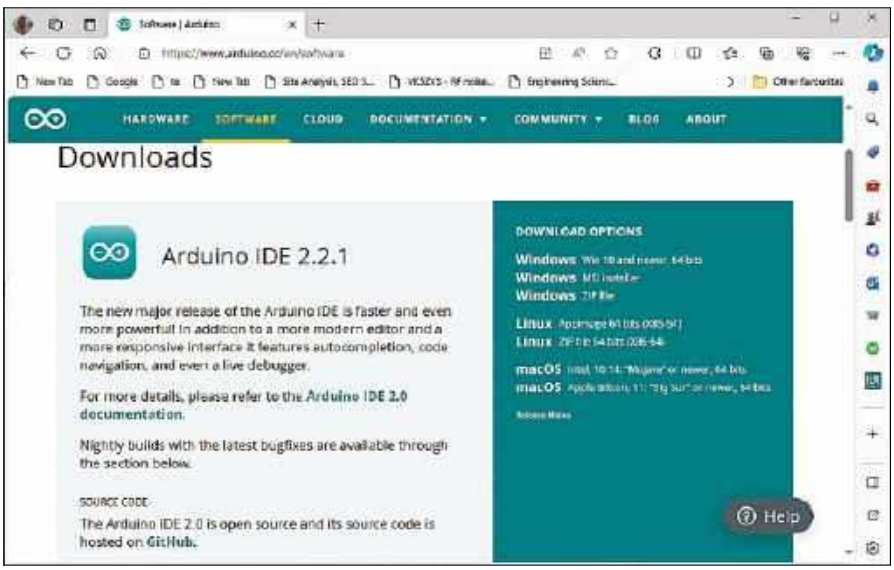
Pakiet Arduino IDE pomyślnie zainstalowaliśmy na wielu różnych komputerach, zarówno z 32- i 64-bitowymi wersjami systemu Windows, jak i z różnymi dystrybucjami Linuksa. Opisana tutaj procedura została krok po kroku przeprowadzona na komputerze z systemem Windows 10, jednak w innych systemach operacyjnych przebiega bardzo podobnie. Należy jedynie pamiętać, że instalacja w systemie Linux może wymagać wcześniejszego zainstalowania środowiska uruchomieniowego Java (JRE), jeśli nie jest ono jeszcze zainstalowane.

Przypis redaktora: Informacja o konieczności instalacji JRE była prawdziwa dla starszych wersji Arduino IDE. W przypadku obecnego Arduino IDE 2.x zazwyczaj nie ma potrzeby instalowania JRE, ponieważ środowisko zawiera wszystkie niezbędne składniki.

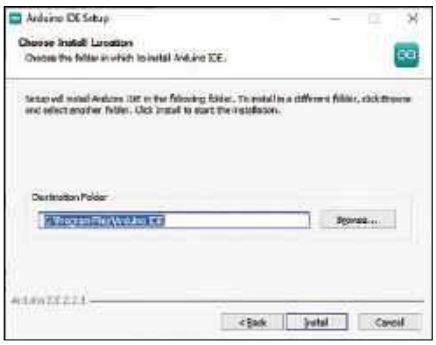
1. Otwieramy przeglądarkę internetową i przechodzimy na stronę www.arduino.cc (oficjalną stronę projektu Arduino). Następnie przechodzimy do sekcji Software i wybieramy Arduino IDE. Pobieramy najnowszą dostępną wersję środowiska, wybierając instalator odpowiedni dla naszego systemu operacyjnego (my użyliśmy wersji dla systemu Windows 10 64-bit).
2. W tym momencie zostanie wyświetlona prośba o wsparcie projektu Arduino darowizną. Możecie kliknąć Just download (tylko pobierz) lub Contribute and download (wesprzyj projekt i pobierz). Po dokonaniu wyboru plik instalacyjny zostanie pobrany na komputer. Jest on dość duży, dlatego w zależności od szybkości połączenia internetowego pobieranie może potrwać kilka minut.
3. Następnie uruchamiamy instalator lub rozpakowujemy pobrany plik (zależnie od wybranej wersji) i postępujemy zgodnie z wyświetlanymi instrukcjami. Możemy wybrać folder docelowy (**rysunek 1.10**) lub pozostawić ustawienie domyślne. Na koniec klikamy Install (zainstaluj), aby rozpocząć instalację.
4. W zależności od szybkości komputera instalacja może trwać od kilkudziesięciu sekund do kilku minut. Może również pojawić się propozycja zainstalowania sterownika USB. Sterownik ten umożliwia komunikację komputera z płytką Arduino przez port USB. Zalecamy kliknięcie przycisku Install (zainstaluj) i zainstalowanie tego dodatkowego sterownika (nie jest on częścią samego środowiska Arduino IDE)
5. Po zakończeniu instalacji i zainstalowaniu sterownika USB (**rysunek 1.11**) można kliknąć Finish (zakończ) i powrócić do pulpitu lub, jeśli zaznaczyliście opcję Run Arduino IDE (uruchom Arduino IDE), od razu uruchomić środowisko i rozpocząć pracę.
6. Aby zainstalować dodatkowe biblioteki i obsługę modułu ESP32, trzeba wskazać środowisku Arduino IDE, skąd ma pobrać wymagane pliki. Uruchamiamy środowisko, z paska menu wybieramy File (plik), a następnie Preferences (preferencje). W wyświetlonym oknie dialogowym należy ręcznie wpisać następujący adres URL (**rysunek 1.12**):
   https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/package_esp32_index.json
   Po wpisaniu tego adresu klikamy OK.
7. Następnie z menu rozwijanego wybieramy Tools (narzędzia), Board (płytka) i Board Manager (menedżer płytek). Przewijamy listę obsługiwanych płytek do pozycji esp32 by Espressif, a następnie klikamy INSTALL (zainstaluj), jak pokazano na **rysunku 1.13**. Pobieranie plików może potrwać kilka minut. W tym czasie wyświetlany jest pasek postępu oraz lista pobranych plików. Po zakończeniu instalacji i automatycznym skonfigurowaniu tych dodatkowych składników środowisko Arduino IDE będzie gotowe do współpracy z modułem ESP32.
8. Podłączamy płytkę z modułem ESP32 do komputera za pomocą jednego z portów USB. Port USB dostarcza napięcie +5 V, dlatego nie jest potrzebne dodatkowe zasilanie. Pozostawiając środowisko Arduino IDE otwarte, klikamy Select Board (wybierz płytkę), a następnie

No jasne!

Bez względu na to, jakiej płytki stykowej używasz, ważne jest, aby mieć do dyspozycji dużo wolnego miejsca na montaż komponentów. Zbyt ciasny układ może szybko stać się mało czytelny i wprowadzający w błąd.



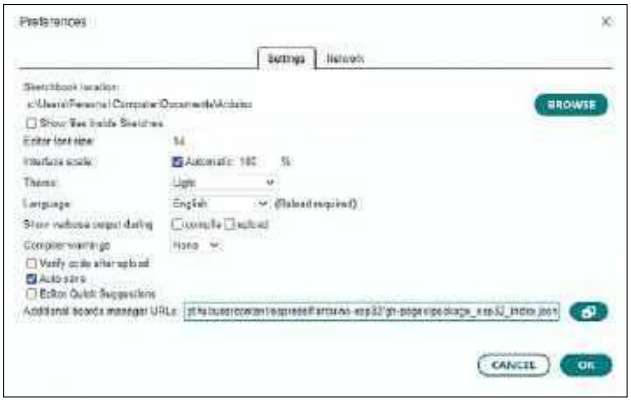
Rysunek 1.9. Instalator środowiska Arduino IDE.



Rysunek 1.10. Wybór folderu docelowego instalacji.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Rysunek 1.11. Środowisko Arduino IDE zostało pomyślnie zainstalowane i jest gotowe do uruchomienia.



Rysunek 1.12. Wprowadzenie adresu URL wskazującego lokalizację plików potrzebnych do skonfigurowania środowiska Arduino IDE.

Select other board and port (wybierz inną płytkę i port) – rysunek 1.14. Przewijamy listę płytek ESP32 (jest ich naprawdę sporo!), aż znajdziemy swoją płytkę (zazwyczaj będzie to ESP32 Dev Module). Klikamy jej nazwę – obok pojawi się znacznik wyboru (**rysunek 1.15**). Powinniście również zobaczyć, że środowisko wykryło port szeregowy COM i przypisało go do płytki ESP32. Klikamy OK, kończąc konfigurację. ESP32 jest już gotowy do programowania!

9. Powinno pojawić się okno podobne do pokazanego na **rysunku 1.16**. Komunikat w polu Output (na dole ekranu) potwierdza, że obsługa platformy ESP32 została zainstalowana pomyślnie. Zwróćcie również uwagę, że na pasku stanu (również u dołu ekranu) wyświetlana jest informacja o połączeniu z ESP32 Dev Module on COM4. Jeśli tak nie jest, wybierzcie Tools (narzędzia), a następnie Board (płytka) i Port (port). Jeśli ustawienia są nieprawidłowe, będzie można je tutaj zmienić.
10. Jeśli chcecie wypróbować programowanie ESP32, przygotowaliśmy prosty program powodujący miganie wbudowanej diody LED. Wystarczy wpisać kod z **listingu 1.1** lub pobrać go ze strony internetowej „Practical Electronics" z marca 2024 r. (https://bit.ly/pe-downloads). Następnie klikamy dużą strzałkę skierowaną w prawo (tuż pod paskiem menu), aby zweryfikować i skompilować program oraz wgrać go do pamięci ESP32. Pamiętajcie, że jeśli w kodzie znajdują się błędy, kompilacja zakończy się niepowodzeniem i przed kolejną próbą będzie trzeba je zlokalizować oraz poprawić. Warto również zapisywać kod źródłowy na dysku, korzystając z menu File (plik). W razie potrzeby można tam także zmienić nazwę programu.

Sprawdź sam!

A teraz ćwiczenie, które pozwoli Wam zapoznać się z działaniem czujników dotykowych ESP32 bez konieczności używania dodatkowych elementów poza płytką stykową i przewodem połączeniowym. Dziesięć wyprowadzeń GPIO układu ESP32 można skonfigurować jako pojemnościowe wejścia dotykowe. Wystarczy dotknąć palcem jednego z nich, aby został wykryty sygnał dotykowy. Jest to wygodny sposób zastąpienia przycisków i przełączników. Możecie to sprawdzić, korzystając z programu przedstawionego na **listingu 1.2**.

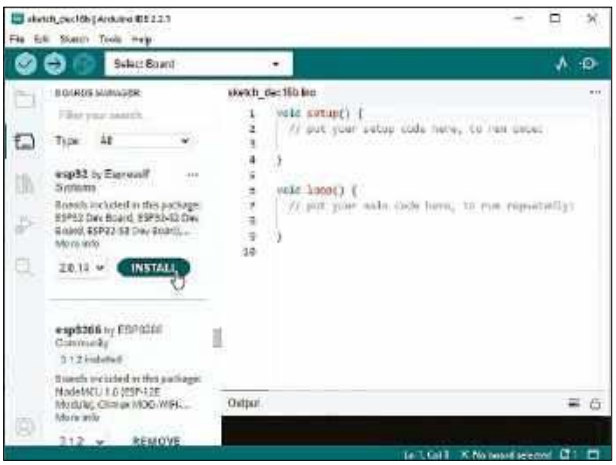
Wprowadzamy (lub pobieramy z Internetu) kod źródłowy z listingu 1.2, a następnie uruchamiamy go w taki sam sposób jak poprzednio. Po dotknięciu przewodu podłączonego do GPIO15 powinna zaświecić się dioda User sterowana z GPIO2 (**rysunek 1.17**).

Warsztaty programowania

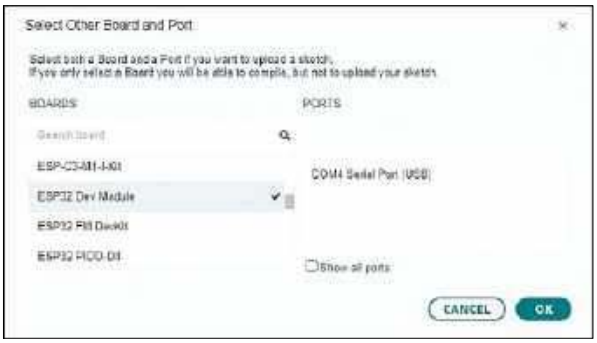
Aby sprzęt wykonywał użyteczne zadania, potrzebny jest program, który określi, co ma robić i jak reagować w różnych sytuacjach. Tworzenie programów nie jest szczególnie trudne, wymaga jednak uporządkowanego i systematycznego podejścia. Jeśli kiedykolwiek musieliście wyjaśniać komuś, jak dotrzeć do wybranego miejsca, wiecie, jak ważne jest, aby nie pominąć żadnego etapu i przekazać wskazówki w sposób jasny oraz jednoznaczny. Podobnie jest z programowaniem, z tą różnicą, że instrukcje muszą być zrozumiałe nie dla człowieka, lecz dla komputera. Programowania łatwo się nauczyć, jeśli zacznie się od prostych przykładów i będzie stopniowo rozwijać swoje umiejętności. W tym odcinku przyjrzymy się sposobom reprezentowania i przetwarzania danych.

Dane logiczne (typu Boolean)

Dane, które mogą przyjmować tylko jedną z dwóch możliwych wartości, nazywane są danymi logicznymi (typu Boolean – od nazwiska George'a Boole'a, angielskiego matematyka i filozofa, jednego z twórców algebry Boole'a; przypis redaktora). W Arduino ten typ danych jest reprezentowany za pomocą



Rysunek 1.13. Menedżer płytek Arduino IDE użyty do zainstalowania obsługi ESP32.

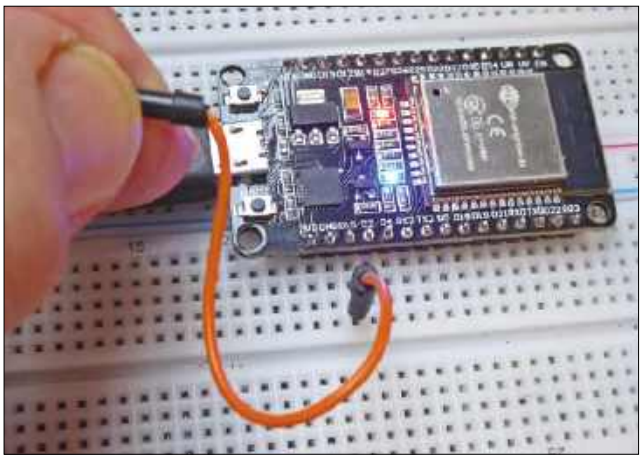


Rysunek 1.14. Wybór płytki i portu szeregowego.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Rysunek 1.15. Wybór typu płytki z listy obsługiwanych urządzeń.

Rysunek 1.16. Środowisko Arduino IDE jest połączone z modułem ESP32 przez port szeregowy COM4 i gotowe do wgrywania programów. Pokazany program stanowi jedynie szkielet.



Rysunek 1.17. Dioda LED na płytce powinna zaświecać się po każdym dotknięciu przewodu podłączonego do GPIO15 (na większości płytek oznaczonego jako D15).

No jasne!

Jeśli pojawi się komunikat w rodzaju „Wystąpił błąd krytyczny: Nie udało się połączyć z ESP32", najpierw sprawdźcie, czy wybraliście właściwą płytkę i właściwy port. Jeśli to nie pomoże, poczekajcie, aż w środowisku Arduino IDE pojawi się komunikat „Connecting...", a następnie naciśnijcie i przytrzymajcie przycisk BOOT, aż pojawi się kolejny komunikat potwierdzający nawiązanie połączenia. W tym momencie pamięć Flash zostanie skasowana i ponownie zaprogramowana. Jest to nieco uciążliwe, ale zazwyczaj rozwiązuje problem.

pojedynczego bajtu (8 bitów) i może przyjmować wartości `TRUE` lub `FALSE`, ewentualnie `HIGH` lub `LOW`. Są to dwa wzajemnie wykluczające się stany. Nazwa typu Boolean pochodzi od algebry Boole'a, której zasady są podstawą logiki cyfrowej (więcej na ten temat będzie w kolejnej części cyklu).

Aby można było korzystać ze zmiennych w programie, muszą one zostać wcześniej zadeklarowane. Przykład deklaracji zmiennej typu Boolean wygląda następująco:

```
boolean powerGood = FALSE;
// stan zasilania
```

W dalszej części programu (w głównej pętli wykonywanej bez końca) możemy napotkać następujący wiersz:

```
powerGood = !powerGood;
// zmiana stanu zasilania
```

Znak `!` w powyższym fragmencie można odczytać jako „nie". Cała instrukcja zmienia więc wartość zmiennej logicznej na przeciwną. Innymi słowy, jeśli zmienna powerGood miała wcześniej wartość `TRUE`, to teraz przyjmie wartość `FALSE` – i odwrotnie.

Na pierwszy rzut oka może to wydawać się nieco zaskakujące. Arduino wykorzystuje do przechowywania zmiennej typu Boolean jeden bajt (8 bitów) pamięci. Ponieważ zmienna taka może przyjmować tylko jeden z dwóch stanów, bardziej oszczędne byłoby użycie jednego bitu zamiast całego bajtu. W systemach z ograniczoną ilością pamięci, takich jak Arduino, siedem z ośmiu bitów pozostaje bowiem niewykorzystanych (wartość binarna 00000000 jest interpretowana jako `FALSE`, a każda inna jako `TRUE`). Dlatego warto pamiętać, że użycie typu Boolean nie zapewnia oszczędniejszego wykorzystania pamięci niż użycie zmiennej całkowitoliczbowej (patrz dalej). Mimo to typ Boolean jest

eprasa.pl 17a47aa7e2

Listing 1.1. Program testowy migania diodą LED modułu ESP32

```
/* Miganie diodą LED podłączoną do GPIO2 */
int ledPort = 2;                  // wbudowana dioda LED
int timeOn = 200;                 // czas świecenia (ms)
int timeOff = 800;                // czas zgaszenia (ms)
void setup() {
    // Skonfiguruj wyprowadzenie LED jako wyjście
    pinMode(ledPort, OUTPUT);
}
void loop() {
    // Pętla główna
    digitalWrite(ledPort, HIGH);  // włącz diodę LED
    delay(timeOn);
    digitalWrite(ledPort, LOW);   // wyłącz diodę LED
    delay(timeOff);
}
```

Listing 1.2. Program do sprawdzania wejść dotykowych modułu ESP32

```
/* Sprawdzanie czujników dotykowych ESP32 */
int ledPort = 2;                      // wbudowana dioda LED
void setup() {
    // Skonfiguruj wyprowadzenie diody LED jako wyjście
    pinMode(ledPort, OUTPUT);
}
void loop() {
    // Pętla główna
    delay(100);                       // odczekaj 100 ms
    if (touchRead(15) < 40)           // wykryto dotknięcie
    {
        digitalWrite(ledPort, HIGH); // włącz diodę LED
    }
    else // nie wykryto dotknięcia
    {
        digitalWrite(ledPort, LOW);  // wyłącz diodę LED
    }
}
```

bardzo wygodny, ponieważ od razu wskazuje, że zmienna może przyjmować tylko dwa stany (co zwiększa czytelność programu; przypis redaktora).

Dane całkowitoliczbowe

Liczby całkowite (czyli liczby bez części ułamkowej) są zwykle przechowywane jako zmienne typu int. W Arduino typ ten zajmuje dwa bajty pamięci (16 bitów), a bit najbardziej znaczący (MSB) określa znak liczby (w przypadku ESP32 typ int również zajmuje 4 bajty (32 bity), podobnie jak w Arduino Due – przypis redaktora). Gdy ma wartość 0, liczba jest dodatnia, a gdy ma wartość 1 – ujemna. Sposób reprezentacji liczb nazywa się zapisem w kodzie uzupełnieniowym do dwóch i przy 16-bitowej reprezentacji umożliwia zapis liczb z zakresu od −32768 do +32767. Typowy fragment programu może wyglądać następująco:

```
int powerLED = 11;
// pin wyjściowy diody LED
sygnalizującej poprawne zasilanie
```

Wiersz ten definiuje i inicjuje zmienną o nazwie powerLED. Informuje kompilator, że jest to zmienna typu int (liczba całkowita) i nadaje jej wartość początkową 11. Instrukcja kończy się średnikiem (;), po którym umieszczono krótki komentarz przypominający, do czego służy dana instrukcja. Takie krótkie komentarze są bardzo przydatne podczas późniejszej modyfikacji programu, a także wtedy, gdy nad kodem pracuje kilku programistów.

W dalszej części programu możemy natrafić na instrukcję:

```
digitalWrite(powerLED, HIGH);
// włączenie diody LED sygnalizującej
poprawne zasilanie
```

Nawet jeśli nigdy wcześniej nie programowaliście, prawdopodobnie bez trudu domyślicie się, co robi ta instrukcja.

W innym miejscu programu możecie natrafić na następujący fragment:

```
if (powerGood == FALSE) {
        digitalWrite(powerLED, LOW);
}
```

Powyższy fragment wyłącza diodę LED sygnalizującą poprawne zasilanie, gdy system wykryje problem z zasilaniem. W tym celu sprawdzany jest stan zmiennej logicznej powerGood (patrz wyżej). Jeśli jej wartość wynosi FALSE (innymi słowy, zasilanie nie jest prawidłowe), dioda zostaje wyłączona przez ustawienie niskiego poziomu logicznego (LOW, około 0 V) na przypisanym do niej wyprowadzeniu cyfrowym (pinie 11), zgodnie z wcześniejszą deklaracją zmiennej.

Składnia deklaracji powerLED (w tym przypadku jest to w praktyce stała, a nie zmienna) jest bardzo prosta. Najpierw podawana jest nazwa, a następnie przypisywana jej wartość. Zwróćcie uwagę, że nazwa ma postać opisową i składa się z dwóch wyrazów zapisanych bez spacji. Pierwszy z nich rozpoczyna się małą literą, a drugi wielką. Taka konwencja ułatwia czytanie kodu i pozwala uniknąć używania spacji w nazwach, które są niedozwolone.

W pętli programu często zachodzi potrzeba zwiększania lub zmniejszania wartości zmiennej, na przykład podczas zliczania zdarzeń. Ze względu na zapis w kodzie uzupełnieniowym do dwóch trzeba pamiętać, że po przekroczeniu maksymalnej lub minimalnej dopuszczalnej wartości następuje przepełnienie i „zawinięcie" zakresu. Na przykład zwiększenie wartości +32767, czyli największej dopuszczalnej wartości dodatniej, spowoduje otrzymanie wartości −32768. Analogicznie zmniejszenie wartości −32768, czyli najmniejszej dopuszczalnej wartości ujemnej, spowoduje otrzymanie wartości +32767.

Na koniec warto pamiętać, że nie we wszystkich wersjach Arduino typ int zajmuje dwa bajty. Na przykład Arduino Due używa do przechowywania wartości typu int czterech bajtów (32 bitów), co daje zakres od −2147483648 do +2147483647.

Dane zmiennoprzecinkowe

Jak sama nazwa wskazuje, liczby zmiennoprzecinkowe (typu float) zawierają część ułamkową (w językach programowania jej część całkowitą od części ułamkowej oddziela kropka, a nie przecinek – przypis redaktora). Zakres wartości typu float jest znacznie większy i wynosi od −3,4028235E+38 do +3,4028235E+38 (przypis redaktora: zapis aaa.bbbEccc oznacza liczbę w notacji wykładniczej: aaa.bbb × 10^{ccc}). Liczby zmiennoprzecinkowe są przechowywane w czterech bajtach (32 bitach) pamięci.

Typ float jest często wykorzystywany do reprezentowania wartości analogowych pochodzących z czujników. Ponieważ zajmuje cztery bajty pamięci, obliczenia zmiennoprzecinkowe są zwykle wolniejsze niż obliczenia na liczbach całkowitych, które w większości platform Arduino zajmują dwa bajty. Przypis redaktora: w przypadku ESP32 różnica ta jest niewielka, ponieważ mikrokontroler

eprasa.pl 17a47aa7e2

wykonuje operacje zmiennoprzecinkowe sprzętowo. W większości prostszych mikrokontrolerów jednostka zmiennoprzecinkowa (FPU) nie występuje, dlatego operacje na liczbach zmiennoprzecinkowych są realizowane programowo, co znacznie wydłuża czas ich wykonywania. Z tego powodu, gdy szybkość działania programu ma duże znaczenie, warto stosować liczby całkowite zamiast zmiennoprzecinkowych.

Typowy fragment programu może wyglądać następująco:

```
float peakConvert = 1.4159;
// współczynnik przeliczenia wartości
skutecznej na szczytową
```

Następnie można wyznaczyć napięcie szczytowe oraz prąd szczytowy dla obciążenia o rezystancji 50 Ω, wykonując obliczenia:

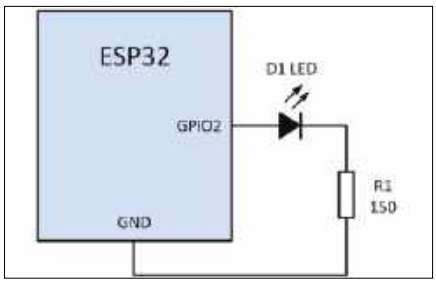
```
peakVoltage = rmsVoltage * peakConvert;
peakCurrent = peakVoltage / 50;
```

Dane bajtowe

Typ byte służy do przechowywania 8-bitowych liczb binarnych bez znaku. Na przykład wartość binarną 10000001 (odpowiadającą 0x81 w systemie szesnastkowym i 129 w systemie dziesiętnym) można zdefiniować następująco:

```
byte bitMask = 0x81;
// maska niepotrzebnych bitów
```

Pamiętajmy, że przedrostek 0x oznacza zapis liczby w systemie szesnastkowym (o podstawie 16). Ponieważ typ



Rysunek 1.18. Schemat połączeń prototypowego nadajnika alarmowego.

byte zajmuje tylko osiem bitów, zakres jego wartości jest ograniczony. Najmniejszą wartością jest 0 (0x00), gdy wszystkie bity mają wartość 0, a największą 255 (0xFF), gdy wszystkie bity mają wartość 1. Pomimo tego ograniczenia typ byte jest przydatny w wielu zastosowaniach, szczególnie przy przechowywaniu stanów ośmiu linii wejściowych lub wyjściowych. Na przykład:

```
byte inputStatus = 0x00;
// inicjalizacja stanu
portu wejściowego
byte inputFailure = 0xFF;
// wszystkie linie
portu mają stan wysoki
```

W dalszej części programu możemy natrafić na następujący fragment:

```
if (inputStatus == inputFailure) {
        Serial.print("Ostrzeżenie:
Błąd wejścia!");
}
```

W tym przykładzie stan błędu występuje wtedy, gdy wszystkie linie wejściowe znajdują się jednocześnie w stanie wysokim. Wówczas zmienna inputStatus przyjmuje wartość 0xFF. Po wykryciu takiego stanu przez port szeregowy zostanie wysłany krótki komunikat ostrzegawczy (więcej o korzystaniu z monititora szeregowego powiemy w kolejnej części cyklu).

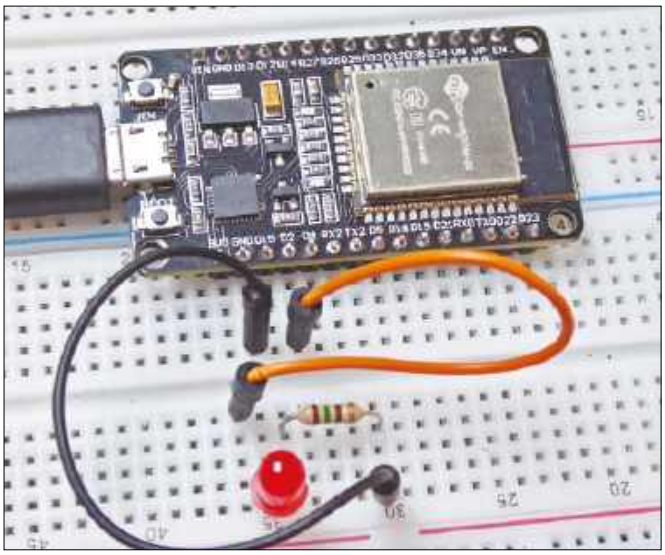
Dane znakowe

Typ char stosujemy wtedy, gdy chcemy przechowywać pojedyncze znaki lub tekst. Każdy znak zajmuje jeden bajt pamięci. Oznacza to, że słowo „znak" zajmie cztery bajty. Ciągi znaków zajmują dodatkowo jeden bajt na znak końca ciągu o wartości 0, a więc wymagają o jeden bajt więcej niż wynika to z liczby znaków – przypis redaktora. Literały pojedynczych znaków zapisuje się w apostrofach (np. `'A'`), natomiast ciągi znaków ujmuje się w cudzysłowy (np. `"Power Good"`).

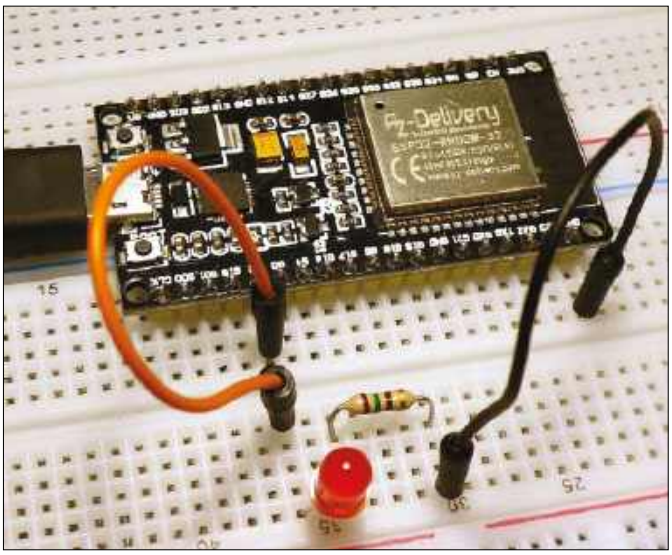
Dane znakowe są kodowane zgodnie ze standardem ASCII. Każdy znak jest reprezentowany przez odpowiadającą mu 8-bitową wartość. Na przykład litera A ma kod 01000001 w systemie dwójkowym, 0x41 w systemie szesnastkowym i 65 w systemie dziesiętnym. Podstawowy zestaw znaków ASCII wykorzystuje tylko siedem bitów, co odpowiada zakresowi od 0 do 127. Gdy ustawiony jest najstarszy bit, pozostałe 128 kodów może być wykorzystane do reprezentowania znaków spoza podstawowego zestawu ASCII.

Zauważmy, że następujące trzy instrukcje są równoważne:

```
char testChar = 'A';
char testChar = 65;
char testChar = 0x41;
```



Rysunek 1.19. Prowadzenie przewodów w prototypowym nadajniku alarmowym z 30-pinową płytką.



Rysunek 1.20. Prowadzenie przewodów w prototypowym nadajniku alarmowym z 36-pinową płytką.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Zwróćmy również uwagę, że przedrostek 0x oznacza zapis liczby w systemie szesnastkowym.

Funkcja `Serial.println()` umożliwia wyświetlanie danych w kilku różnych formatach:

```
Serial.println(analogValue);
// wyświetla liczbę dziesiętną
Serial.println(analogValue, DEC);
// wyświetla liczbę dziesiętną
Serial.println(analogValue, HEX);
// wyświetla liczbę szesnastkową
Serial.println(analogValue, OCT);
// wyświetla liczbę ósemkową
Serial.println(analogValue, BIN);
// wyświetla liczbę dwójkową
```

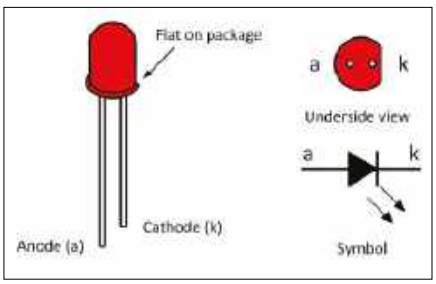
Na tym kończymy krótkie omówienie sposobów reprezentowania danych. W następnym odcinku zajmiemy się ich przetwarzaniem.

Projekt praktyczny

Nasz pierwszy projekt praktyczny polega na zbudowaniu i zaprogramowaniu prostego przenośnego nadajnika sygnału alarmowego. Układ wykonamy z wykorzystaniem płytki z modułem ESP32 oraz płytki stykowej. W wersji docelowej można zastosować sam moduł ESP32, diodę LED o dużej jasności i akumulator, jednak na etapie uruchamiania wykorzystamy płytkę rozwojową, standardową diodę LED oraz zasilanie z portu USB komputera.

Schemat oraz sposób połączenia elementów prototypowego nadajnika alarmowego przedstawiono na **rysunkach 1.18...1.20**. Wyprowadzenia diody LED pokazano na **rysunku 1.21** (pamiętajcie, aby podłączać diodę z zachowaniem właściwej polaryzacji). Rezystor 150 Ω ogranicza prąd płynący przez diodę LED do około 7 mA.

Po wykonaniu połączeń, podłączeniu płytki z modułem ESP32 do komputera przez USB i uruchomieniu środowiska Arduino IDE można wpisać (lub pobrać z Internetu) kod źródłowy przedstawiony na **listingu 1.3**. Po uruchomieniu programu dioda LED będzie cyklicznie nadawała sygnał SOS alfabetem Morse'a.



Rysunek 1.21. Wyprowadzenia diody LED.

Listing 1.3. Program nadajnika alarmowego

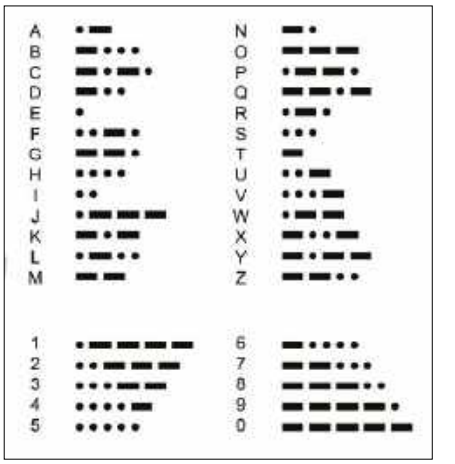
```
/* Sygnalizator alarmowy ESP32 */

char message[] = "SOS";
int ledPort = 2;                        // wbudowana dioda LED
int dotLen = 100;                       // czas trwania kropki
int dashLen = dotLen * 3;               // czas trwania kreski
int gap = dotLen * 5;                   // czas przerwy
void setup() {
    pinMode(ledPort, OUTPUT);
}
void loop() {
    for (int i = 0; i < sizeof(message) - 1; i++) {
        char tempChar = message[i];
        GetChar(tempChar);
    }
    LEDOff(gap); // przerwa przed następnym powtórzeniem
}
// Kropka
void MorseDot() {
    digitalWrite(ledPort, HIGH);      // włącz diodę LED
    delay(dotLen);
}
// Kreska
void MorseDash() {
    digitalWrite(ledPort, HIGH);      // włącz diodę LED
    delay(dashLen);
}
// Wyłącz diodę LED
void LEDOff(int holdTime) {
    digitalWrite(ledPort, LOW);       // wyłącz diodę LED
    delay(holdTime);
}
// Alfabet Morse'a
void GetChar(char temp) {
    switch (temp) {
    case 'S':                         // trzy kropki
        ...
        break;
    case 'O': // trzy kreski
        ...
        break;
    }
}
```

Przejrzyjmy teraz program. W pierwszych kilku wierszach, zgodnie z tym, co opisaliśmy wcześniej, definiowane są zmienne. Zwróćcie uwagę, że zmienne `dashLen` i `gap` są zależne od zdefiniowanej wcześniej zmiennej `dotLen`. Aby zmienić szybkość nadawania alfabetem Morse'a, wystarczy więc zmienić wartość `dotLen`, a pozostałe dwie zmienne zmienią się proporcjonalnie.

Następnie przechodzimy do pętli głównej, która po kolei sprawdza każdy znak wysyłanej wiadomości i określa układ kropek oraz kresek alfabetu Morse'a odpowiadający temu znakowi (**rysunek 1.22**). Jeśli potrzebna jest kropka, dioda LED zostaje włączona (`ledPort` przyjmuje stan `HIGH`) na czas określony przez dotLen, a następnie wyłączona na czas określony przez gap. Jeśli potrzebna jest kreska, dioda LED zostaje włączona na czas określony przez dashLen,

No jasne!

Kod potrafi być naprawdę wybredny i nie wybacza błędów! Typowe wpadki to zapominanie o średniku „;" na końcu linii, niezamykanie komentarzy wielolinijkowych znakiem „*/" oraz gubienie nawiasów klamrowych – czyli brak parowania „{" i „}". Z czasem bez wątpienia dojdziesz do wprawy i nauczysz się automatycznie unikać tych podstawowych błędów.



Rysunek 1.22. Alfabet Morse'a.

eprasa.pl 17a47aa7e2

a następnie ponownie wyłączona na czas określony przez gap. Pamiętajcie, że napięcie na wyprowadzeniu GPIO wynosi około 3,3 V w stanie wysokim (`HIGH`) i około 0 V w stanie niskim (`LOW`). Gdy więc program ustawi GPIO2 w stan wysoki, przez diodę LED popłynie prąd i dioda się zaświeci. Gdy GPIO2 zostanie przełączone w stan `LOW`, prąd przestanie płynąć. W ten sposób można włączać i wyłączać diodę LED.

Jeśli na tym etapie nie rozumiecie jeszcze w pełni działania programu, nie przejmujcie się. Na razie najważniejsze jest zrozumienie, w jaki sposób funkcja `digitalWrite()` steruje wyprowadzeniami GPIO. Przyjrzymy się temu dokładniej w następnym odcinku, w którym szczegółowo omówimy cyfrowe wejścia i wyjścia.

Zadanie

Zadania zamieszczane w kolejnych odcinkach „Nauki elektroniki" pozwolą Wam sprawdzić zdobytą wiedzę.

W tym miesiącu proponujemy następujące zadanie: zmodyfikujcie program sygnalizatora alarmowego przedstawiony wcześniej tak, aby dioda LED nieustannie nadawała alfabetem Morse'a komunikat HELLO.

Za miesiąc

W kolejnym odcinku naszego cyklu przyjrzymy się bliżej cyfrowym wejściom i wyjściom. Szczegółowo omówimy zależność między sygnałami cyfrowymi a poziomami logicznymi oraz wyjaśnimy sposób konfiguracji wyprowadzeń GPIO. Pokażemy, jak podłączać przyciski i przełączniki oraz napiszemy prosty program wykrywający i wyświetlający ich stan. W części „Warsztaty programowania" zajmiemy się konstrukcjami logicznymi i instrukcjami warunkowymi. Przedstawimy również schematy blokowe oraz wyjaśnimy, jak zaprojektować i zbudować prosty sterownik sygnalizacji świetlnej. ■

Mike Tooley

Ten artykuł był wcześniej opublikowany na łamach „Practical Electronics", marzec 2024 (www.epemag3.com)

REKLAMA

eprasa.pl 17a47aa7e2

KickStart

Część 11: pomiary parametrów środowiska. Wprowadzenie do czujnika BME280

Nasza okazjonalna seria KickStart ma na celu ukazywanie Czytelnikom, jak wykorzystywać łatwo dostępne, niedrogie elementy i urządzenia do rozwiązywania szerokiej gamy typowych problemów w możliwie najkrótszym czasie. Każdy z przykładów i projektów może zostać zrealizowany przy użyciu gotowych podzespołów w czasie nie dłuższym niż kilka godzin. Oprócz krótkiego objaśnienia podstawowych zasad i zastosowanych technik, seria dostarczy wielu reprezentatywnych rozwiązań i przykładów wraz z wystarczającą ilością informacji, aby móc je dostosować i rozszerzyć do własnych potrzeb.

W odcinku jedenastym przedstawiamy najnowszą serię niedrogich czujników środowiskowych firmy Bosch. Są to znakomite układy umożliwiające dokładny pomiar temperatury, ciśnienia i wilgotności. Komunikacja z układem sterującym, takim jak moduł Arduino lub Raspberry Pi, odbywa się za pośrednictwem interfejsu I²C.

Niedawno...

...stałem się dumnym właścicielem zabytkowej „stacji pogodowej" – barometru z wbudowanym termometrem i higrometrem. Chciałem sprawdzić, z jaką dokładnością mierzy on ciśnienie, temperaturę i wilgotność.

Rozwiązanie tego problemu okazało się bardzo proste i oczywiste. Wystarczyło znaleźć odpowiedni czujnik, podłączyć go do mikrokontrolera Arduino Uno i dodać niedrogi moduł LCD 20×4, na którym wyświetlane będą wyniki pomiarów. Całe zadanie, obejmujące opracowanie oprogramowania i testowanie, zajęło mi zaledwie kilka godzin.

Mój zabytkowy przyrząd (**rysunek 11.1**) zawiera słupek rtęci w szklanej rurce, której jeden koniec jest otwarty, a drugi zamknięty. Dolna, otwarta część rurki jest zanurzona w zbiorniku wypełnionym rtęcią, którego powierzchnia jest poddana działaniu ciśnienia atmosferycznego. Więcej informacji można znaleźć na stronie bit.ly/pe-jan23-hg.

Poziom rtęci w szklanej rurce opada pod własnym ciężarem, tworząc w jej górnej części próżnię. Ciężar rtęci w rurce jest równoważony przez ciśnienie atmosferyczne działające na zbiornik. W ten sposób wysokość słupka rtęci jest wskaźnikiem bieżącego ciśnienia atmosferycznego. Wzrost ciśnienia zapowiada dobrą pogodę, a w miesiącach zimowych może oznaczać niskie temperatury. Spadek ciśnienia zazwyczaj wskazuje na pogorszenie pogody, a także możliwość wystąpienia burz i silnego wiatru. Gwałtowny spadek ciśnienia zwykle oznacza, że w ciągu najbliższych godzin można spodziewać się burzy.

Barometry rtęciowe starego typu są na czas transportu zawsze pakowane w bezpieczny sposób, dlatego docierają na miejsce w stanie niezmontowanym. Wbudowany mechanizm zabezpieczający unieruchamia rurkę i inne elementy, chroniąc je przed uszkodzeniem podczas przewozu. Po rozpakowaniu barometr należy złożyć, ustawić, a następnie przygotować do pomiaru bieżącego ciśnienia atmosferycznego. Zwykle polega to na ustawieniu wskaźnika pomiarowego względem poziomu rtęci. Po tej operacji barometr jest gotowy do użycia.

Rysunek 11.1. Barometr rtęciowy autora, umieszczony w mahoniowej obudowie z okresu późnej regencji. Przyrząd zawiera dużą, okrągłą posrebrzaną tarczę barometru, termometr rtęciowy (długi prostokątny wskaźnik), higrometr (okrągła tarcza u góry) oraz poziomnicę spirytusową z czerwonym alkoholem, umieszczoną na dole.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Nowoczesne elektroniczne przyrządy barometryczne, wyposażone w niewielkie czujniki, mikrokontrolery i wyświetlacze cyfrowe, całkowicie eliminują tę procedurę.

Przedstawiamy czujnik BME280

BME280 firmy Bosch Sensortec to zespolony czujnik wilgotności, ciśnienia i temperatury, umieszczony w niewielkiej metalowej obudowie LGA. Niewielkie wymiary (obudowa ma zaledwie 2,5 × 2,5 × 0,93 mm) w połączeniu z minimalnym poborem energii sprawiają, że ten czujnik idealnie nadaje się do stosowania w różnego rodzaju urządzeniach przenośnych i ręcznych.

BME280 łączy w sobie czujniki wilgotności, ciśnienia i temperatury, przeznaczone do szerokiej gamy zastosowań, obejmujących między innymi kontrolę środowiska, pomiary, automatykę, logistykę i nawigację. Czujnik wilgotności charakteryzuje się bardzo krótkim czasem reakcji, dzięki czemu doskonale sprawdza się w zastosowaniach wymagających szybkiej reakcji na zmiany warunków otoczenia, a także zapewnia wysoką dokładność w szerokim zakresie temperatur. Czujnik ciśnienia jest czujnikiem bezwzględnego ciśnienia barometrycznego o bardzo wysokiej dokładności i rozdzielczości. W porównaniu ze swoim poprzednikiem, BMP180, generuje również znacznie mniej szumów. Zintegrowany czujnik temperatury zoptymalizowano pod kątem małego poziomu szumów i wysokiej rozdzielczości. Jego sygnał wyjściowy jest wykorzystywany do kompensacji temperaturowej czujników ciśnienia i wilgotności. Może on również służyć do szacowania temperatury otoczenia.

BME280 wyposażono w interfejsy SPI i I²C. Układ wymaga napięcia zasilania z zakresu od 1,71 V do 3,6 V dla części pomiarowej oraz od 1,2 V do 3,6 V dla interfejsu. Pomiary mogą być wyzwalane przez mikrokontroler sterujący lub wykonywane w ustalonych odstępach czasu. Gdy czujnik jest wyłączony, pobór prądu spada do zaledwie 0,1 μA. Podczas pomiaru wilgotności i temperatury pobór prądu wynosi około 350 μA, natomiast podczas pomiaru ciśnienia nieco ponad 700 μA. Pobór prądu w stanie czuwania (gdy układ jest aktywny, ale nie wykonuje pomiarów) jest mniejszy niż 0,5 μA.

Aby dostosować szybkość próbkowania, poziom szumów, czas reakcji i pobór prądu do wymagań konkretnej aplikacji, można wybrać różne tryby nadpróbkowania, filtrowania oraz szybkości transmisji danych. Wszystko to jest realizowane w ramach programowej konfiguracji czujnika.

Tryby pracy BME280

BME280 może pracować w jednym z trzech trybów:

- Tryb uśpienia – nie są wykonywane żadne pomiary, dostępne są wszystkie rejestry, a pobór prądu jest minimalny; jest to tryb aktywowany po włączeniu zasilania;
- Tryb wymuszony – wykonywany jest pojedynczy pomiar, wyniki są zapisywane, po czym czujnik powraca do trybu uśpienia;
- Tryb normalny – czujnik cyklicznie przełącza się pomiędzy okresem wykonywania pomiarów a okresem bezczynności.

Tryb uśpienia jest aktywny domyślnie po resecie wywołanym włączeniem zasilania. W trybie tym nie są wykonywane żadne pomiary, a pobór prądu pozostaje minimalny. Wszystkie rejestry wewnętrzne są dostępne i można odczytywać parametry wewnętrzne. Nie obowiązują żadne szczególne ograniczenia dotyczące czasów interfejsu.

W trybie wymuszonym wykonywany jest pojedynczy pomiar zgodnie z wybranymi opcjami pomiaru i filtrowania. Po zakończeniu pomiaru czujnik powraca do trybu uśpienia, a wyniki pomiaru można odczytać z rejestrów danych. Aby wykonać kolejny pomiar, należy ponownie wybrać tryb wymuszony. Tryb ten jest zalecany w zastosowaniach wymagających stosunkowo małej częstotliwości próbkowania lub synchronizacji realizowanej przez mikrokontroler sterujący.

Tryb normalny polega na ciągłym przełączaniu się między aktywnym okresem pomiarowym a nieaktywnym okresem czuwania. Pomiary są wykonywane zgodnie z wybranymi opcjami pomiaru i filtrowania. Czas czuwania można ustawić w zakresie od 0,5 ms do 1000 ms.

Aby ograniczyć wpływ krótkotrwałych zakłóceń (na przykład dmuchnięcia w czujnik), BME280 wykorzystuje filtr cyfrowy o nieskończonej odpowiedzi impulsowej (IIR). Sygnał wyjściowy filtru jest obliczany na podstawie bieżącej wartości wejściowej, poprzedniej wartości wejściowej oraz poprzedniej wartości wyjściowej. Należy pamiętać, że przy korzystaniu z filtru IIR zalecana jest praca w trybie normalnym.

Jako jednostkę ciśnienia można wybrać paskale (Pa), hektopaskale (hPa), cale słupa rtęci (inHg), atmosfery standardowe (atm), bary (jednostka ciśnienia równa 100 kPa), tory (1/760 atmosfery standardowej, czyli 133,32 Pa) lub funty na cal kwadratowy (PSI). Jednostką temperatury może być stopień Celsjusza (°C) lub Fahrenheita (°F). Tryb pracy BME280 można, zależnie od wymagań konkretnej aplikacji, ustawić na uśpiony, wymuszony lub normalny (**tabela 11.1**).

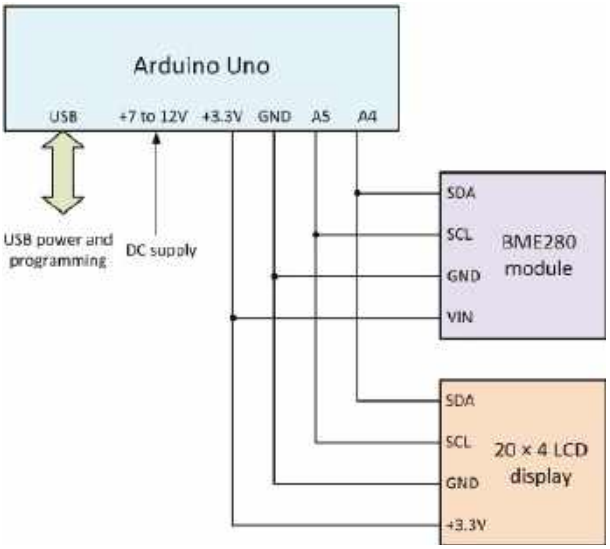
Czas czuwania można ustawić w zakresie od 0,5 ms do 1 s, wybierając jedną z ośmiu dostępnych wartości. Filtr IIR można skonfigurować dla czterech różnych współczynników filtrowania, również zależnie od zastosowania (tabela 11.1). Więcej informacji można znaleźć w pliku nagłówkowym BME280.h (patrz rozdział „Dalsze kroki", gdzie podano szczegóły dotyczące jego pobrania).

Tabela 11.1. Zalecane ustawienia dla wybranych zastosowań czujnika BME280

parametr	zakres zastosowania			
	monitorowanie pogody	pomiar wilgotności	nawigacja	gry
tryb	wymuszony	wymuszony	normalny	normalny
częstotliwość próbkowania	1 × na minutę	1 × na sekundę	nie dotyczy	nie dotyczy
czas czuwania	nie dotyczy	nie dotyczy	0,5 ms	0,5 ms
ciśnienie	× 1	× 0	× 16	× 4
temperatura	× 1	× 1	× 2	× 1
wilgotność	× 1	× 1	× 1	× 0
filtr	wyłączony	wyłączony	× 16	× 16
pobór prądu	0,16 μA	2,9 μA	633 μA	581 μA
wartość skuteczna szumu	3,3 Pa/30 cm, 0,07% RH	0,07% RH	0,2 Pa/1,7 cm	0,3 Pa/2,5 cm
częstotliwość generowania danych	1/60 Hz	1 Hz	25 Hz	1,75 Hz

eprasa.pl 17a47aa7e2

Rysunek 11.2. Moduł z czujnikiem BME280 wyposażony w układy interfejsu I²C umieszczone po drugiej stronie płytki.



Rysunek 11.3. Kompletny schemat elektronicznego barometru z czujnikiem BME280.

Elektroniczny barometr z czujnikiem BME280

Dzięki możliwości pomiaru ciśnienia, wilgotności i temperatury za pomocą jednego czujnika, BME280 okazał się idealnym kandydatem do wykorzystania w moim elektronicznym barometrze. Aby uprościć konstrukcję, BME280 jest dostępny w postaci gotowego modułu zamontowanego na niewielkiej płytce drukowanej (**rysunek 11.2**). Moduł ten zawiera również niezbędne układy interfejsowe oraz układy zasilania (informacje o źródle zakupu podano w rozdziale „Dalsze kroki"). Wystarczy więc połączyć moduł BME280 z modułem Arduino Uno za pośrednictwem interfejsu I²C oraz dołączyć wyświetlacz LCD 20×4 z interfejsem I²C, na którym będą prezentowane aktualnie mierzone wartości.

Pełny schemat elektronicznego barometru z czujnikiem BME280 pokazano na **rysunku 11.3**. Cztery wyprowadzenia modułu BME280, przedstawionego wcześniej na rysunku 11.2, to:

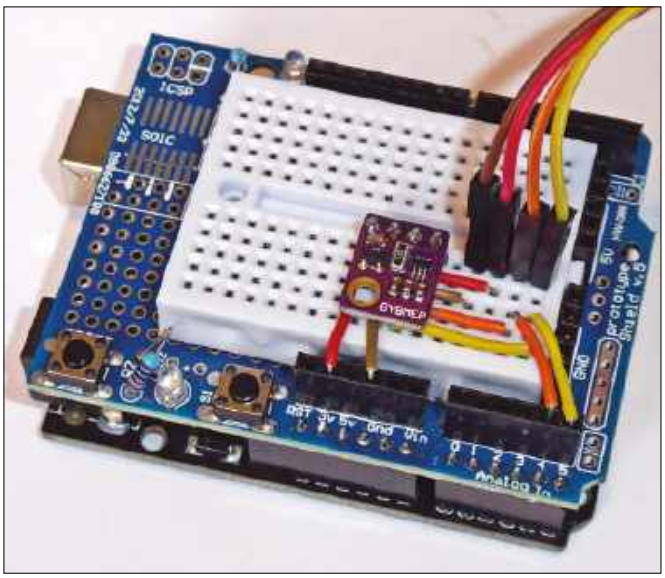
SDA	linia danych I²C,
SCL	linia zegara I²C,
VIN	zasilanie (+3,3 V),
GND	masa (0 V).

Barometr elektroniczny można szybko i łatwo zmontować, używając kilku krótkich przewodów połączeniowych i zworek. Niewielka płytka prototypowa dodatkowo ułatwia połączenie trzech głównych elementów: modułu czujnika BME280, Arduino Uno oraz wyświetlacza LCD 20×4, jak pokazano na **rysunku 11.4**.

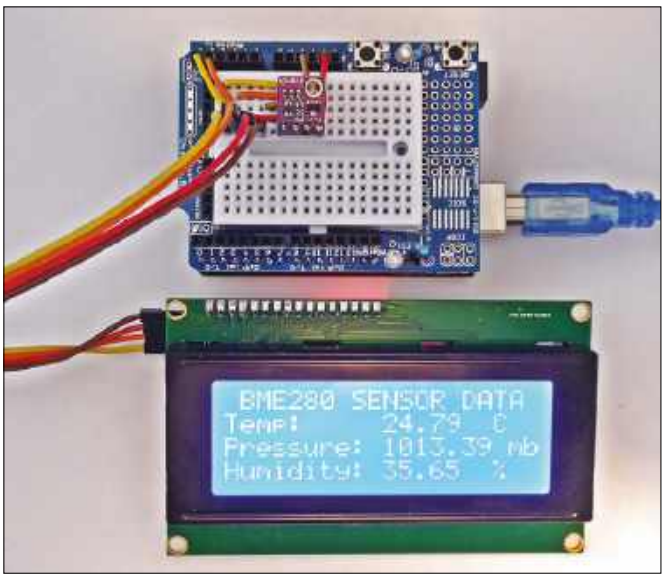
Podczas testowania barometr elektroniczny może być zasilany z portu USB Arduino. Po zakończeniu programowania cały układ można jednak zasilać z zewnętrznego źródła napięcia stałego o wartości +7 V...+12 V, podłączonego do gniazda zasilania Arduino.

Oprogramowanie barometru

Dzięki łatwo dostępnym bibliotekom (patrz rozdział „Dalsze kroki") napisanie programu dla elektronicznego barometru okazało się niezwykle proste. Polecamy bibliotekę BME280 autorstwa Tylera Glenna, używaną wraz ze standardową biblioteką



Rysunek 11.4. Prototyp barometru z czujnikiem BME280 wykorzystujący tanią nakładkę prototypową do Arduino z wbudowaną miniaturową płytką stykową.



Rysunek 11.5. Dane z czujnika BME280 wyświetlane na znakowym wyświetlaczu LCD 20×4 z interfejsem I²C.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Listing 11.1. Program na Arduino BME280 dla elektronicznej stacji pogodowej

```
/*
Elektroniczny barometr wykorzystujący Arduino i czujnik BME280
Wymaga biblioteki BME280 autorstwa Tylera Glenna oraz biblioteki LiquidCrystal_I²C
*/

#include <BME280I²C.h>                                    // biblioteka BME280 I²C
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I²C.h>                            // biblioteka LCD I²C
LiquidCrystal_I²C lcd(0x27,16,4);                         // ustawia parametry LCD
BME280I²C bme;

void setup()
{
   lcd.init();                                            // zainicjuj wyświetlacz
   lcd.backlight();
   Serial.begin(9600);                                    // debugowanie szeregowe w razie potrzeby
   Serial.println("Oczekiwanie...");
   while(!Serial) {}                                      // czekaj
   Wire.begin();
   Serial.println("Rozpoczęcie!");
   while(!bme.begin())
   {
      Serial.println("Nie można znaleźć czujnika BME280!");
      delay(1000);
   }

   switch(bme.chipModel())
   {
      case BME280::ChipModel_BME280:
         Serial.println("Wykryto czujnik BME280! Sukces");
         break;
      case BME280::ChipModel_BMP280:
         Serial.println("Znaleziono czujnik BMP280! Wilgotność niedostępna");
         break;
      default:
         Serial.println("Wykryto NIEZNANY czujnik! Błąd!");
   }
}

void loop()
{
   float temp, hum, pres, mb;
   BME280::TempUnit tempUnit(BME280::TempUnit_Celsius);
   BME280::PresUnit presUnit(BME280::PresUnit_Pa);
   bme.read(pres, temp, hum, tempUnit, presUnit);
   mb = pres/100;
   lcd.clear();
   lcd.setCursor(0,0);
   lcd.print(" DANE Z CZUJNIKA BME280");
   lcd.setCursor(0,1);
   lcd.print("Temp: ");
   lcd.print(temp);
   lcd.print(" C");
   lcd.setCursor(0,2);
   lcd.print("Ciśnienie: ");
   lcd.print(mb);
   lcd.print(" mb");
   lcd.setCursor(0,3);
   lcd.print("Wilgotność: ");
   lcd.print(hum);
   lcd.print(" %");
   delay(10000);
}
```

do wyświetlaczy LCD z interfejsem I²C. W prezentowanej aplikacji wykorzystano domyślne ustawienia biblioteki: tryb wymuszony, czas czuwania wynoszący jedną sekundę oraz filtr ustawiony na ×16. Należy pamiętać, że adres I²C układu BME280 ma wartość 0x76.

Program (**listing 11.1**) rozpoczyna się od dołączenia wymaganych plików bibliotecznych. Następnie kod inicjalizacyjny uruchamia wyświetlacz LCD i włącza jego podświetlenie. Kolejnym krokiem jest uruchomienie interfejsu szeregowego, dzięki czemu do komputera mogą być przesyłane informacje diagnostyczne. Na przykład, jeśli czujnik BME280 nie zostanie wykryty, przez łącze szeregowe zostanie wysłany odpowiedni komunikat o błędzie. Po potwierdzeniu obecności czujnika kolejny fragment programu sprawdza jego typ i wysyła do portu szeregowego komunikat potwierdzający wykryty typ czujnika. Należy pamiętać, że w przypadku użycia czujnika BMP280 (zamiast BME280) dane o wilgotności nie będą dostępne. Po zakończeniu sprawdzania typu czujnika i wyświetleniu odpowiednich komunikatów program przechodzi do pętli głównej, wykonywanej w sposób ciągły.

Jednostki temperatury i ciśnienia (stopnie Celsjusza i paskale) są konfigurowane za pomocą dwóch poniższych wierszy kodu:

```
BME280::TempUnit
tempUnit(BME280::TempUnit_Celsius);
BME280::PresUnit
presUnit(BME280::PresUnit_Pa);
```


eprasa.pl 17a47aa7e2

Tabela 11.2. Dodatkowe informacje dotyczące modułu czujnika ciśnienia, temperatury i wilgotności BME280		
temat	**źródło**	**uwagi**
BME280	Kartę katalogową BME280 można pobrać ze strony: https://bit.ly/pe-jan23-bme280 Moduły czujników BME280 są dostępne u wielu dostawców, np. AZ-Delivery: https://bit.ly/pe-jan23-az.	Przydatny samouczek dotyczący użycia BME280 z Arduino Uno można znaleźć pod adresem https://bit.ly/pe-jan23-uno
Arduino Uno	Oficjalna strona internetowa Arduino zawiera wiele materiałów pomocnych przy pracy z płytką Uno (www.arduino.cc). Zintegrowane środowisko programistyczne (IDE) Arduino można pobrać ze strony www.arduino.cc/en/Main/Software	Kompleksowym źródłem pomysłów i praktycznych informacji jest Electronics Teach-In 8: Introducing the Arduino pod adresem https://bit.ly/pe-jan23-eti8. Arduino Uno i wyświetlacze LCD 20×4 z interfejsem I²C są dostępne u wielu dostawców.
Biblioteka BME280 I²C	Oficjalna strona internetowa Arduino udostępnia bibliotekę do odczytu i interpretacji danych z czujnika BME280 (z wykorzystaniem interfejsu I²C lub SPI). Bibliotekę można znaleźć pod adresem https://bit.ly/pe-jan23-uno280.	Program do prezentowanego projektu można pobrać ze strony internetowej Practical Electronics z lutego 2023 r.
magistrala I²C	Przydatne wprowadzenie do magistrali I²C można znaleźć na stronie internetowej Texas Instruments: https://bit.ly/pe-jan23-ti	Użyteczne wprowadzenie do tematu interfejsu I²C zawiera artykuł Kick Start część 7: łatwe początki z I²C w EdW 5/2025

Modyfikując te dwa wiersze, można wybrać inne jednostki pomiarowe, na przykład stopnie Fahrenheita i PSI.

Jesteśmy teraz gotowi do odczytywania danych z czujnika i wyświetlania wyników na ekranie LCD. Zauważmy, że zdecydowaliśmy się wyświetlać ciśnienie w milibarach (mbar), więc wartości ciśnienia zwracane przez czujnik (w paskalach) są dzielone przez 100 (ponieważ 1 mbar = 0,001 bara = 100 Pa). **Rysunek 11.5** przedstawia typowy zestaw danych wyświetlanych na ekranie LCD.

Umieszczenie gotowego układu w niewielkiej obudowie nie powinno sprawić większych trudności. Czytelnicy mogą również łatwo dostosować program tak, aby wyświetlał wyniki w innych jednostkach, zależnie od potrzeb.

Elektroniczny barometr stanowi doskonały projekt dla wszystkich zainteresowanych pomiarem i prezentacją podstawowych danych pogodowych lub – jak w moim przypadku – po prostu sprawdzaniem wskazań ukochanego zabytkowego przyrządu!

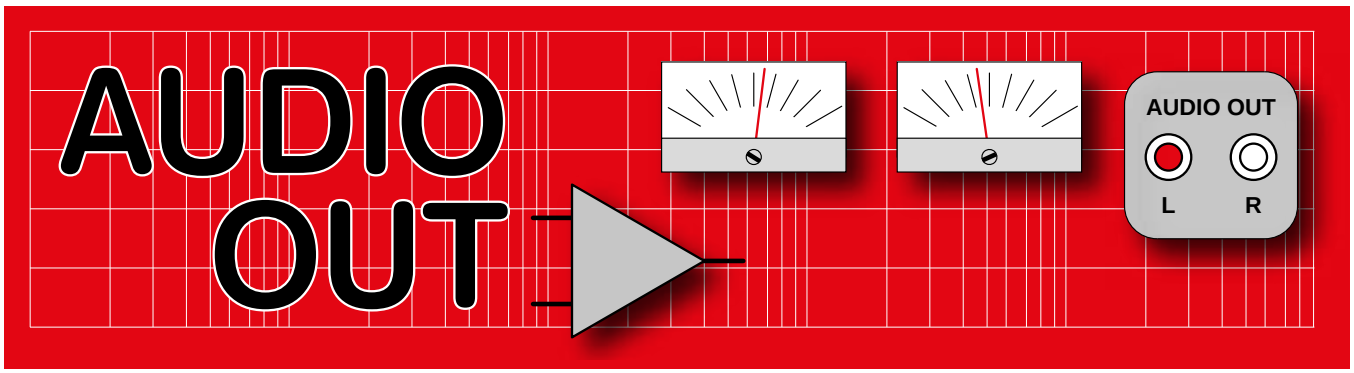
Dalsze kroki

W niniejszym rozdziale przedstawiono różne źródła informacji, które pomogą znaleźć elementy oraz materiały pozwalające w pełni wykorzystać możliwości czujników BME280. Zamieszczono tu również odsyłacze do przydatnych informacji uzupełniających oraz kart katalogowych producentów. ■ **Mike Tooley**

Ten artykuł był wcześniej opublikowany na łamach „Practical Electronics", luty 2023 (www.epemag3.com)

REKLAMA

eprasa.pl 17a47aa7e2



Trzaski powodowane przez potencjometry, część 2

W poprzednim odcinku omówiliśmy problemy związane z trzaskami i szumami generowanymi przez potencjometry podczas ich obracania. Jest to uciążliwe zjawisko, ponieważ powoduje zakłócenia sygnału akustycznego. W tym odcinku zastanowimy się, jak można mu zapobiec, oraz przedstawimy zalecenia dotyczące doboru potencjometrów.

Pomiary i testy

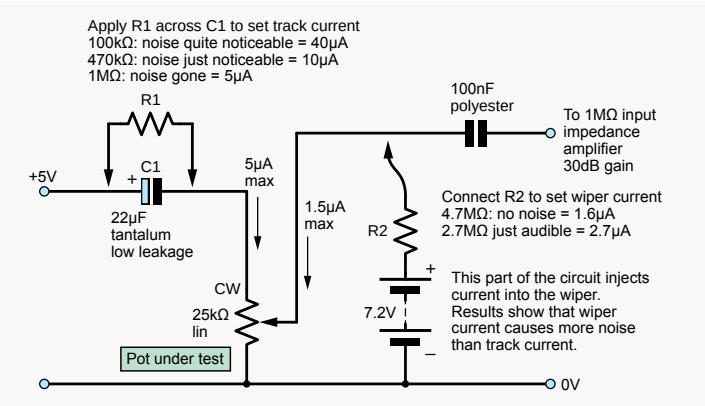
W podręczniku „Radio Designer's Handbook" podano, że potencjometr ze ścieżką węglową formowaną na gorąco, do którego skrajnych wyprowadzeń ścieżki oporowej doprowadzono napięcie stałe, wytwarza szum na poziomie 1...2 mV/V podczas obracania z prędkością jednego obrotu na sekundę. Przeprowadziłem kilka pomiarów i stwierdziłem, że liniowy potencjometr węglowy Plessey MCH 0,5 W o rezystancji 25 kΩ poprawnie pracował przy prądzie 5 μA płynącym przez ścieżkę oporową. Natomiast już prąd 1,5 μA płynący przez suwak powodował słyszalny szum. Stanowi to problem, ponieważ większość elektrolitycznych kondensatorów sprzęgających charakteryzuje się prądem upływu rzędu 3...10 μA. Konfigurację układu testowego pokazano na **rysunku 11**.

Utlenianie się potencjometrów

Utlenianie się metalowych elementów, takich jak suwak i jego centralny styk zbiorczy (pierścień ślizgowy), stanowi szczególny problem w klimacie wilgotnym. Modułowa seria potencjometrów Allen-Bradley ModPot 70 odniosła duży sukces na rynku amerykańskim, jednak w brytyjskich warunkach klimatycznych okazała się zawodna z powodu utleniania się zespołu suwaka i pierścienia ślizgowego. Sam suwak jest odporny na działanie wilgoci, ponieważ wykonano go z węgla (**rysunek 12**), natomiast pozostałe elementy ulegają utlenianiu.

Znakomity pod wieloma względami przyrząd pomiarowy AMS1 firmy Wayne Kerr (**rysunek 13**) ma jednak problem z szumiącymi potencjometrami ModPot. Sytuacji nie poprawia również brak kondensatorów blokujących składową stałą. Problem dodatkowo pogłębia zastosowanie wzmacniaczy operacyjnych NE5534, charakteryzujących się stosunkowo dużymi prądami polaryzacji wejść oraz znacznym napięciem niezrównoważenia. Ponadto układ oscylatora RC stabilizowanego termistorem (**rysunek 14**) jest szczególnie wrażliwy na szumy

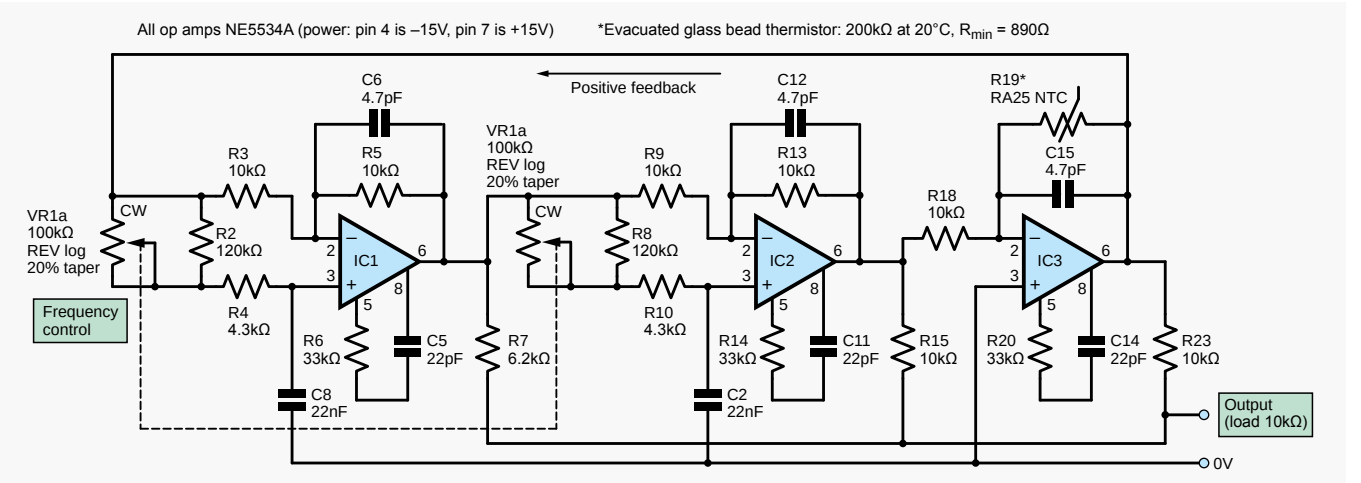
Rysunek 12. Większość potencjometrów ze ścieżką węglową formowaną na gorąco ma węglowe styki suwaka, jak w modelu Plessey MH1. Pozwala to zmniejszyć poziom trzasków podczas obracania w porównaniu z suwakami metalowymi.



Rysunek 11. Jak pokazuje ten eksperyment, maksymalne natężenia prądu stałego, które mogą płynąć przez potencjometr bez wywoływania trzasków podczas jego obracania, są bardzo małe.

Rysunek 13. Ten stary analizator audio Wayne Kerr AMS1 miał problem z szumiącymi potencjometrami i trzeszczącymi przełącznikami.

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 14. Układ oscylatora o małych zniekształceniach zastosowany w analizatorze AMS1 był podatny na szumy powodowane przez potencjometry. Problem można wyeliminować, stosując kondensatory poliestrowe 10 µF blokujące składową stałą, połączone szeregowo z potencjometrami.

Rysunek 15. Na szczęście dla serwisantów niestandardowe potencjometry ModPot zastosowane w analizatorze AMS1 są skręcane śrubkami, co ułatwia ich serwisowanie.

potencjometrów, wskutek czego amplituda sygnału wyjściowego zmienia się podczas regulacji częstotliwości. Dodatkową trudność stanowi zastosowany w układzie podwójny potencjometr antylogarytmiczny o rezystancji 10 kΩ, którego charakterystyka odbiega od typowych rozwiązań. Zastąpienie go potencjometrem innego producenta powoduje, że oznaczenia na skali częstotliwości przestają odpowiadać rzeczywistym wartościom. Co więcej, pozostałe potencjometry i przełączniki również mają nietypowe właściwości, dlatego jedynym skutecznym rozwiązaniem jest ich całkowity demontaż i naprawa. Na szczęście potencjometry ModPot mają obudowy skręcane śrubkami (**rysunek 15**), co umożliwia łatwy dostęp do ich wnętrza.

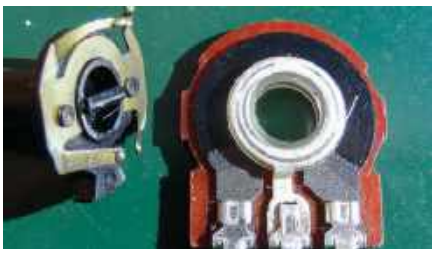
Kiedy zajmowałem się konserwacją konsol mikserskich Solid State Logic z serii 4000G, często rozbierałem i naprawiałem ich nietypowe, wielosekcyjne potencjometry Clarostat z serii 388. W latach osiemdziesiątych kosztowały one 30 funtów za sztukę, dlatego ich naprawa była opłacalna.

Stare potencjometry Omeg, wykorzystujące elementy firmy Radiohm, miały charakterystyczny problem z pierścieniem ślizgowym, ponieważ szczotka była wykonana z mosiądzu, a środkowy pierścień ślizgowy – ze stali (**rysunek 16**). Połączenie różnych metali źle znosiło działanie wilgoci, a czasami zachowywało się nawet jak dioda. Powodowało to u mnie ciągłe problemy z efektami gitarowymi Colorsound, dlatego niechętnie sprowadzałem części z zagranicy do produktu o tak wyjątkowo brytyjskim rodowodzie. Około 1993 roku środkowy pierścień ślizgowy zastąpiono drukowaną ścieżką z polimeru węglowego (**rysunek 17**) i problem został rozwiązany.

Serwisowanie potencjometrów

Częstą przyczyną szumów powodowanych przez potencjometry są zanieczyszczenia ścieżki oporowej, prowadzące do okresowej utraty kontaktu z suwakiem. Dochodzi również do gromadzenia się pyłu węglowego powstającego podczas zużywania się ścieżki. Potencjometry mogą mieć konstrukcję otwartą lub zamkniętą. Modele otwarte częściej stają się źródłem szumów, ale zwykle można je łatwo wyczyścić, rozpylając środek czyszczący przez szczelinę nad wyprowadzeniami. Natomiast otwarcie potencjometrów z zamkniętą obudową bez ich uszkodzenia bywa dużym wyzwaniem.

Standardowym preparatem do czyszczenia i smarowania styków potencjometrów i przełączników jest aerozol Super Servisol 10 (obecnie sprzedawany pod nazwą Kontakt Super 10). Jest on dostępny u większości



Rysunek 16. W starszych potencjometrach Radiohm/Omeg P20 (sprzed 1993 r.) zespół środkowego pierścienia ślizgowego był szczególnie podatny na trzaski z powodu zastosowania różnych metali.

Rysunek 17. W nowszych potencjometrach Omeg P20 środkowy pierścień ślizgowy zastąpiono drukowaną ścieżką z polimeru węglowego, co wyeliminowało opisany wcześniej rodzaj uszkodzenia i znacznie zmniejszyło poziom szumów.

Rysunek 18. Super Servisol i Contralube – niegdyś podstawowe preparaty w zestawie narzędzi wielu inżynierów utrzymania studiów nagraniowych.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Rysunek 19. Specjalistyczne preparaty, takie jak smar DeoxIT do potencjometrów suwakowych, są bardzo przydatne, jeśli często zajmujesz się ich konserwacją.

Rysunek 20. Te chusteczki doskonale nadają się do usuwania niewielkich śladów utlenienia ze styków i suwaków potencjometrów.

dostawców, między innymi w firmie Cricklewood Electronics. Bardzo drogi preparat Contralube 770 firmy Newgate Simms Ltd (**rysunek 18**), przeznaczony do ochrony złączy, jest doskonałym syntetycznym smarem do ścieżek potencjometrów. Kiedyś kupiłem tubę o masie 75 g w firmie Rapid, jednak wygląda na to, że zakończono jego produkcję. Nadal można kupić opakowania o masie 8 g za około 8 funtów u wyspecjalizowanych dostawców motoryzacyjnych. Alternatywnym preparatem jest Tribogel.

Do naprawy potencjometrów nie należy używać powszechnie dostępnego preparatu WD-40, ponieważ zawarte w nim rozpuszczalniki szybko odparowują, pozostawiając warstwę oleju podobną do oleju mineralnego 3-w-1. Z czasem warstwa ta zamienia się w lepką żywiczną powłokę. WD-40 jest przeznaczony do odblokowywania zapieczonych śrub i zamków, a nie do czyszczenia potencjometrów ani przełączników, choć dobrze sprawdza się do rozluźniania zatartych tulejek osi potencjometrów. Firma Newgate Simms oferuje również smar tłumiący do tulejek potencjometrów. Jeżeli zależy nam na charakterystycznym, „aksamitnym" oporze podczas obracania potencjometru, zalecany jest smar o małej lepkości. Smar Kilopoise może zapewniać zbyt duży opór, jednak właśnie jego używała firma Omeg.

Istnieją środki czyszczące o działaniu reaktywnym, które rozpuszczają tlenki i siarczki metali. Najbardziej znanym preparatem tego typu jest DeoxIT F5 firmy Caig Chemicals z USA. Firma oferuje również specjalny preparat Fader Lube, przeznaczony do potencjometrów z tworzywa przewodzącego. Produkty te są dystrybuowane przez firmę Hot Rox UK z siedzibą w Nottingham. Ja używam płynów w tubkach (**rysunek 19**) oraz chusteczek (**rysunek 20**). W przeciwieństwie do aerozoli wymagają one rozmontowania potencjometru.

Należy pamiętać, że większość aerozoli zawiera około 80% gazu pędnego, dlatego jest to kosztowny sposób nanoszenia środków chemicznych. Ponadto zanieczyszczają one powietrze w warsztacie. Jedynym aerozolem do usuwania tlenków, który mogę polecić, jest Kontakt 60 (Rapid 01-0744), ponieważ jest stosunkowo tani. Po jego użyciu należy ponownie nasmarować elementy, aby zapobiec ich szybkiemu ponownemu utlenianiu.

W przypadku mocno utlenionych zespołów suwaka wspomniane środki chemiczne często okazują się niewystarczające. Konieczne może być delikatne użycie drobnego pilnika lub papieru ściernego. W bardzo nielicznych przypadkach stosowałem wysokie napięcie o ograniczonym prądzie z testera izolacji do usunięcia tlenków z zamkniętych zespołów suwaka, jednak metoda ta może prowadzić do trwałego uszkodzenia potencjometru.

Po usunięciu tlenków należy nanieść niewielką ilość smaru do potencjometrów na metalowe powierzchnie stykowe, aby zabezpieczyć je przed ponownym utlenianiem. W przeciwnym razie proces utleniania szybko rozpocznie się ponownie. Zdarza się również, że z biegiem czasu powierzchnia formowanych ścieżek węglowych ulega drobnym spękaniom. Można je wypolerować na szklanej powierzchni przy użyciu preparatu T-Cut, aż odzyskają gładkość i połysk. Metoda ta znakomicie sprawdza się w przypadku ścieżek potencjometrów ModPot po wyjęciu ich z plastikowej ramki (**rysunek 21**). Ostateczny połysk uzyskuje się przez pocieranie o płaski arkusz papieru lub tkaninę.

Zabójcze lutowanie

Lutowanie może zniszczyć potencjometr – nie od razu, lecz, co gorsza, dopiero po kilku miesiącach. Nitowane połączenia między wyprowadzeniami a posrebrzaną częścią ścieżki oporowej są podatne na przerwy spowodowane korozyjnym działaniem topnika lutowniczego. Boleśnie przekonałem się o tym, gdy wpadłem na „genialny" pomysł przylutowania przewodów do otworów po nitach, aby przerobić potencjometry z wyprowadzeniami przewodowymi na wersje do montażu na płytce

Rysunek 21. Po niewielkim podpiłowaniu plastikowej ramki z potencjometru ModPot można wyjąć zespół prowadnicy ze ścieżką oporową, aby ją wyczyścić i wypolerować. Dzięki temu potencjometr może bezproblemowo pracować przez kolejne dziesięć lat.

Rysunek 22. Sieciowe odbiorniki radiowe Roberts są bardzo popularne, ale często mają wadliwe regulatory głośności, których działanie jest wyjątkowo nieprzyjemne dla uszu. W górnej części zdjęcia pokazano wcześniejszy model RM20 z zakresem AM, pozbawiony tej wady dzięki zastosowaniu wzmacniacza zbudowanego z elementów dyskretnych. W dwóch modelach FM widocznych poniżej zastosowano układ scalony o zbyt dużym wzmocnieniu.

drukowanej w moich efektach gitarowych Colorsound. W efekcie musiałem wymienić wiele potencjometrów w ramach gwarancji. Podczas lutowania należy zachować ostrożność i nigdy nie dopuścić do tego, aby topnik przedostał się wzdłuż wyprowadzeń do ścieżki oporowej.

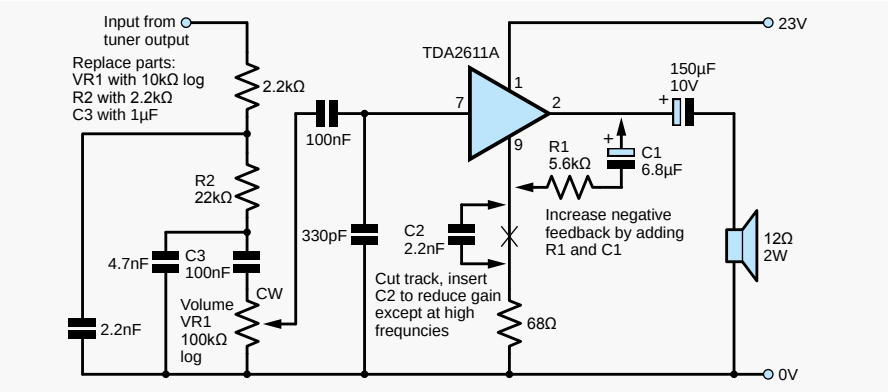
Przełączniki

Na marginesie warto dodać, że wszystkie opisane wcześniej metody serwisowania oraz uwagi dotyczące prądów upływu składowej stałej odnoszą się również do przełączników sygnałowych, które są kolejnym istotnym źródłem trzasków.

Problematyczne potencjometry

W wielu starych radioodbiornikach stosowano potencjometry regulacji głośności z wbudowanym wyłącznikiem zasilania. W niektórych konstrukcjach wyłącznik był włączony w obwód sieciowy,

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 23. Modyfikacje niezbędne do usunięcia problemów z radiem Roberts. Zmniejszenie wzmocnienia układu TDA2611A bez wywołania oscylacji nie jest łatwe. Rezystancję potencjometru można zmniejszyć do 10 kΩ bez wprowadzania zauważalnych zniekształceń.

co powodowało niewielki przydźwięk. Nigdy nie podobało mi się umieszczanie obwodów sieciowych zaledwie kilka milimetrów od niskonapięciowej części układu. Oczywiście, jeśli metalowa obudowa potencjometru z wyłącznikiem jest połączona z przewodem ochronnym i przechodzi próbę izolacji przy napięciu 500 V, rozwiązanie takie jest bezpieczne.

Kolejnym problemem potencjometrów z wyłącznikiem zasilania jest to, że regulator głośności pozostaje ustawiony na wybraną wartość, zanim układ zdąży ustabilizować swoje warunki pracy i zanim naładują się kondensatory sprzęgające. Powoduje to trzaski wywołane przepływem prądu stałego przez potencjometr. Jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie przełącznika typu push/pull, zakładając, że poziom głośności pozostaje ustawiony tak jak przed wyłączeniem urządzenia. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie układu opóźnionego wyciszania wyjścia. Najlepszym rozwiązaniem byłoby jednak zastosowanie oddzielnego wyłącznika zasilania i regulatora głośności. Radia firmy Roberts pokazane na **rysunku 22** mają wyłączniki sieciowe zintegrowane z potencjometrami oraz układy o wzmocnieniu przekraczającym 40 dB umieszczone za regulatorem głośności. Po ich włączeniu następuje wręcz „eksplozja" dźwięku. Problem można wyeliminować, zmniejszając rezystancję potencjometru z 100 kΩ do około 5 kΩ...22 kΩ, zwiększając pojemność kondensatora sprzęgającego oraz zmniejszając wzmocnienie wzmacniacza przez dodanie elementów ujemnego sprzężenia zwrotnego. Pokazano to na **rysunku 23**. Radia te mają odsłonięte elementy metalowe oraz dwużyłowe przewody zasilające. Aby były bezpieczne w użytkowaniu i spełniały współczesne wymagania bezpieczeństwa, należy je uziemić i wyposażyć w przewód trójżyłowy z przewodem ochronnym.

Potencjometry krawędziowe

Jednym z rodzajów potencjometrów, których szczególnie nie lubię, są potencjometry krawędziowe, przeznaczone do obsługi kciukiem. Gdy ulegną uszkodzeniu, często nie da się znaleźć odpowiedniego zamiennika, dlatego zazwyczaj rezygnuję z ich naprawy i próbuję zastąpić je zwykłym potencjometrem obrotowym. Ostatnio przez sześć miesięcy szukałem odpowiedniego potencjometru krawędziowego z wyłącznikiem podczas projektowania najnowszego syntezatora Dubreq, ponieważ koncepcja wzornicza wymagała zastosowania pokrętła obsługiwanego kciukiem. Wypróbowałem osiem, w większości

Rysunek 24. Ten niewielki potencjometr krawędziowy z wyłącznikiem zastosowałem w swoim projekcie syntezatora. Później przysporzył mi wielu problemów. W swoich projektach stosujcie dobre potencjometry obrotowe i oddzielne wyłączniki zasilania.

Rysunek 25. Piękny syntezator z zatartymi potencjometrami suwakowymi, zastosowanymi wyłącznie ze względów stylistycznych. Naprawa będzie kosztowała około 200 funtów. W tym przypadku warto ponieść ten wydatek, ponieważ jest to kolekcjonerski model firmy ARP.

bezużytecznych, próbek. Gdy pierwsze egzemplarze zeszły z linii produkcyjnej, okazało się, że pokrętła ocierają o szczelinę w płycie czołowej, co wymagało kolejnych przeróbek (**rysunek 24**). Unikajcie takich rozwiązań w swoich projektach!

Potencjometry suwakowe

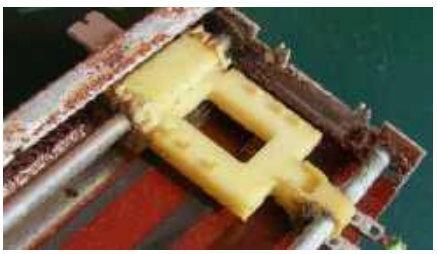
Nie lubię potencjometrów suwakowych, ponieważ ich montaż to prawdziwa mordęga, a do otwartej szczeliny łatwo dostaje się brud. Poza tym są dostępne w wielu różnych rozmiarach i wymagają stosowania licznych niestandardowych gałek, które łatwo zgubić. Na mojej półce z urządzeniami „do naprawy kiedyś" znajduje się sporo sprzętu wymagającego wymiany niedostępnych już potencjometrów suwakowych, na przykład syntezator pokazany na **rysunku 25**. Jako inżynier staram się unikać stosowania potencjometrów o nietypowych kształtach. Jedyny wyjątek robię dla tłumików mikserskich, ponieważ są one standardem w tej klasie urządzeń.

Potencjometry suwakowe Alps były popularne w starszych półprofesjonalnych konsolach mikserskich. Podobnie jak wszystkie potencjometry suwakowe są podatne na przedostawanie się zanieczyszczeń przez szczelinę. Na **rysunkach 26...30** przedstawiono kolejne etapy regeneracji takich potencjometrów.

Wymiana krytycznych elementów

W niektórych przypadkach samo zastąpienie elektrolitycznego kondensatora sprzęgającego kondensatorem poliestrowym o mniejszej pojemności eliminuje trzaski powodowane przez potencjometr. Stosuję to rozwiązanie

Rysunek 26. Demontaż potencjometru suwakowego Alps w celu jego wyczyszczenia. Ściśnij zatrzaski, aby zdjąć boczną osłonę.



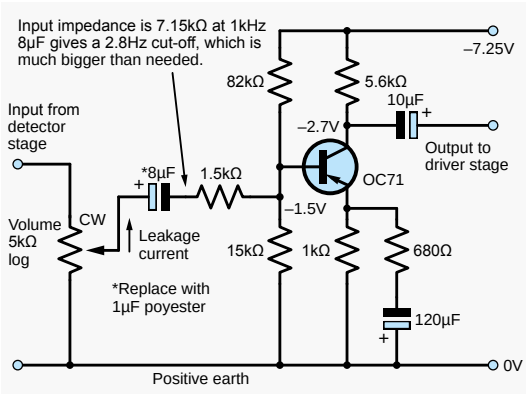
Rysunek 27. Typowe zanieczyszczenia znajdujące się na suwaku, które należy usunąć.

eprasa.pl 17a47aa7e2

w popularnym odbiorniku radiowym Bush TR130 pokazanym na **rysunku 31**. Uważam, że kondensator Mullard C280 1 µF, nazywany „tropikalną rybką" ze względu na charakterystyczny kolorowy kod paskowy, wygląda jak element z epoki i dobrze pasuje do radia z 1967 roku, a przy tym bez problemu mieści się na płytce drukowanej. Wynikająca z tego wyższa częstotliwość odcięcia basów nie ma znaczenia, biorąc pod uwagę częstotliwość graniczną głośnika i transformatora wyjściowego. Zmodyfikowany układ pokazano na **rysunku 32**.

Częstym rozwiązaniem spotykanym w starych radioodbiornikach AM jest wykorzystanie ścieżki oporowej potencjometru regulacji głośności jako rezystora obciążającego diodę detekcyjną. Może to powodować pojawienie się napięcia stałego przekraczającego 1 V na ścieżce oporowej. Problem można rozwiązać, stosując oddzielny rezystor obciążający, połączony przez kondensator sprzęgający z następnym stopniem wzmacniacza o impedancji wejściowej co najmniej czterokrotnie większej. Jest to konieczne, ponieważ zniekształcenia mogą wystąpić wtedy, gdy obciążenie widziane przez diodę jest inne dla składowej stałej niż dla sygnału przemiennego (**rysunek 33**).

W niektórych układach wzmacniających potencjometr umieszcza się w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego, jak na **rysunku 34**. Takie aktywne regulatory głośności są niezwykle wrażliwe na szumy generowane przez potencjometry, ponieważ w przypadku utraty styku między suwakiem a ścieżką przewodzącą poziom głośności wzrasta do wartości maksymalnej. Poza tym, w niektórych układach napięcie wyjściowe może ulec znacznemu przesunięciu, jeśli projektant popełni błąd i poprowadzi tor stałoprądowego, ujemnego sprzężenia zwrotnego przez potencjometr. Kiedyś miałem niekończące się problemy z potencjometrem Omeg, służącym do regulacji głośności w przedwzmacniaczu Douglas Self Wireless World 1979, mimo że był on prawidłowo odseparowany. Sytuacja uległa zmianie, gdy zastąpiłem go potencjometrem Bourns 91, ze ścieżką wykonaną z przewodzącego tworzywa sztucznego, który został odseparowany kondensatorami tantalowymi ITT TAA. Miały one dziesięciokrotnie mniejsze natężenie prądu upływowego niż niebieskie kondensatory elektrolityczne Mullard 017, których używałem pierwotnie.

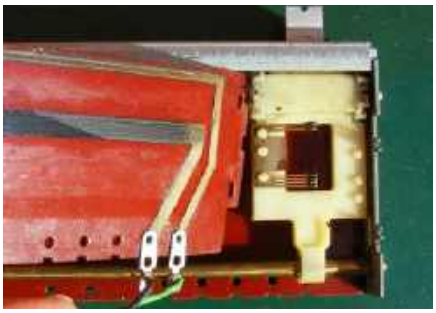


Rysunek 32. Układ regulacji głośności ze wzmacniaczem za regulatorem głośności w odbiorniku Bush TR130. Aby zmniejszyć prąd upływu i skrócić czas stabilizacji układu, kondensator sprzęgający należy zastąpić kondensatorem foliowym o mniejszej pojemności.

Czas stabilizacji

Urządzenia, które przez dłuższy czas nie były włączane, mogą wykazywać prądy upływu oraz silne trzaski potencjometrów podczas ponownego formowania mokrych kondensatorów elektrolitycznych. Dlatego w swoich projektach zawsze zalecam stosowanie tantalowych kondensatorów sprzęgających wraz z odpowiednimi rozwiązaniami ograniczającymi zniekształcenia. Należy również uwzględnić normalny czas potrzebny wszystkim kondensatorom na naładowanie się po włączeniu urządzenia. W niektórych konstrukcjach, wykorzystujących potencjometry o dużej rezystancji (około 100 kΩ) oraz kondensatory o dużej pojemności (około 100 µF), czas stabilizacji może wynosić nawet kilka minut. Zwykle wynika to z błędnej próby rozszerzenia pasma przenoszenia niskich częstotliwości i uzyskania bardzo małych zniekształceń aż do częstotliwości poddźwiękowych. Realizatorzy dźwięku doskonale znają to zjawisko i zwykle

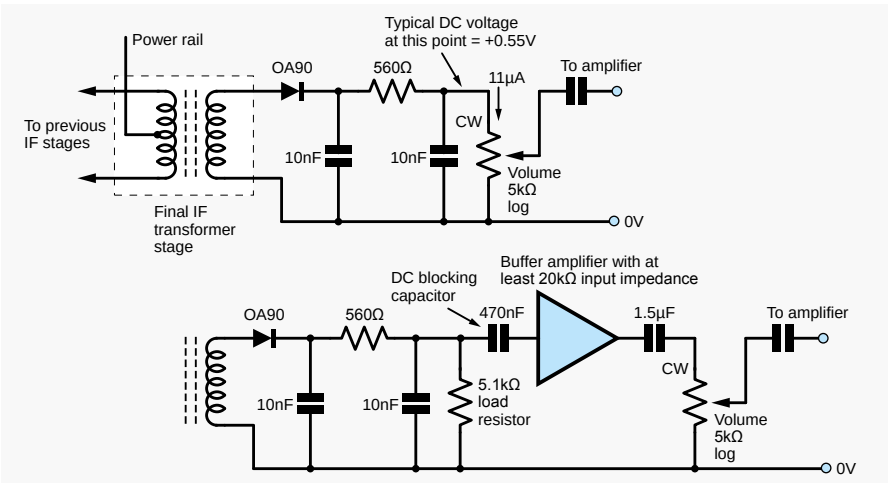
Rysunek 28. Dokładnie wyczyszczony suwak, gotowy do usunięcia śladów korozji i nałożenia smaru.



Rysunek 29. Do nałożenia smaru na prowadnicę użyto małego pędzelka z włosia sobolowego.

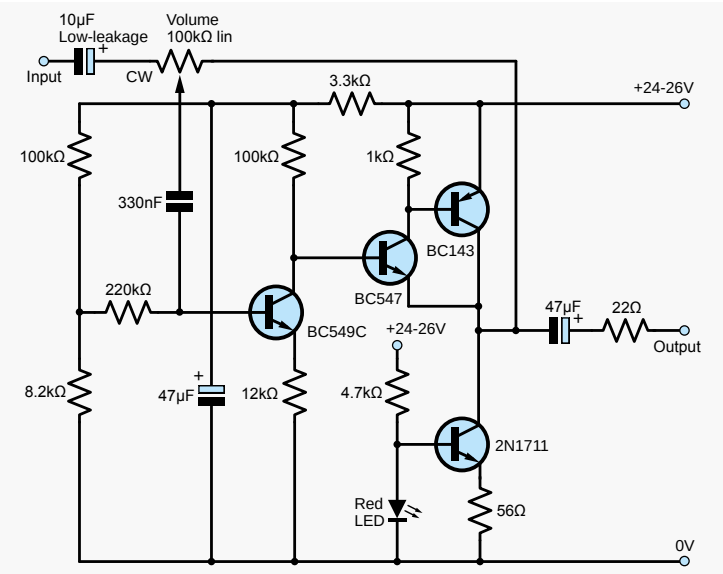
Rysunek 30. Ponowne zaciśnięcie zaczepów za pomocą śrubokręta.

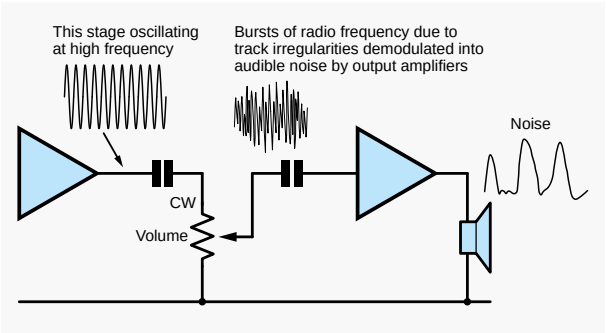
Rysunek 31. Odbiornik Bush TR130 wyposażony w potencjometr regulacji głośności firmy Plessey.



Rysunek 33. W wielu starych radioodbiornikach, między innymi w modelu TR130M, mniej znaną przyczyną trzasków jest wykorzystywanie ścieżki oporowej potencjometru jako obciążenia detektora.

eprasa.pl 17a47aa7e2





Rysunek 35. Oscylacje o częstotliwości ultradźwiękowej mogą powodować trzaski łudząco podobne do tych wywołanych przepływem prądu stałego przez ścieżkę oporową potencjometru.

◀ Rysunek 34. Gdy potencjometr regulacji głośności znajduje się w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego, jak w układzie Baxandalla, utrata kontaktu suwaka ze ścieżką oporową może spowodować przejście wzmacniacza do pracy w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego, czego skutkiem jest bardzo silny szum. Sprzężenie zwrotne dla sygnału powinno być realizowane przez potencjometr, natomiast dla składowej stałej należy zastosować oddzielną pętlę sprzężenia zwrotnego.

pozostawiają sprzęt włączony przez pewien czas, aby ustabilizował swoje parametry przed rozpoczęciem pracy.

Używaj potencjometrów, by ich nie stracić

Co około sześć miesięcy należy obrócić potencjometry w całym zakresie ich ruchu. W przeciwnym razie mogą się zatrzeć lub utlenić. Podobnie jak samochód czy każda inna maszyna wymagająca smarowania, potencjometry muszą być regularnie używane.

Oscylacje o wysokiej częstotliwości

Jeżeli do potencjometru doprowadzony jest sygnał o częstotliwości ultradźwiękowej, na przykład pochodzący z oscylującego wzmacniacza operacyjnego, może on zostać zdemodulowany w następnym stopniu wzmacniającym (**rysunek 35**). Efekt brzmi dokładnie tak samo jak trzaski wywołane prądami upływu składowej stałej i sam dałem się na to nabrać kilka razy. Zjawisko to występuje stosunkowo rzadko, jednak warto o nim pamiętać, gdy pozornych trzasków potencjometru nie udaje się usunąć mimo wielu prób.

Trwałość potencjometrów

W tej sekcji przedstawimy wybrane potencjometry wraz z deklarowaną trwałością (RL), określającą liczbę pełnych obrotów przed zużyciem. Modele o trwałości przekraczającej 20 000 obrotów są drogie – kosztują od 4 do 12 funtów – podczas gdy zwykłe potencjometry ze ścieżką węglową kosztują od 0,70 do 2,00 funta. Oznacza to, że przy ich doborze warto uwzględnić koszt eksploatacji w całym okresie użytkowania. Nie ma sensu stosować potencjometrów o wysokiej trwałości w rzadko używanych regulatorach barwy dźwięku wzmacniacza Hi-Fi, natomiast jest to uzasadnione w regulatorze głośności, ponieważ może pozwolić uniknąć późniejszych kosztów serwisu, wynoszących około 50 funtów. Wiele z opisanych potencjometrów nie jest już produkowanych, a branża elektroniczna przeszła liczne fuzje i przejęcia. W rezultacie stare konstrukcje często pojawiają się ponownie pod innymi nazwami. Zostały one uwzględnione w tym zestawieniu, ponieważ nadal często można je spotkać w starszych urządzeniach oraz jako elementy NOS (New Old Stock) oferowane na aukcjach internetowych. Ponadto rozebrałem wszystkie opisane potencjometry na części i przeanalizowałem ich budowę, abyście nie musieli robić tego sami.

Potencjometry Allen-Bradley serii 70 (RL = 100 000 obrotów)

Są dostępne w praktycznie każdej konfiguracji i łatwo je rozebrać. Ich wadą jest niewielka odporność na wilgoć. Produkowane są wersje ze ścieżką z tworzywa przewodzącego, cermetową oraz z węglową ścieżką formowaną na gorąco.

Allen-Bradley seria J ze ścieżką węglową formowaną na gorąco (RL = 100 000 obrotów, wersja o przedłużonej trwałości EJ – RL = 1 000 000 obrotów)

Bardzo wytrzymałe, szczelne potencjometry o mocy 2 W, wykonane zgodnie z wymaganiami wojskowymi. Stosowane są między innymi w efektach gitarowych „Cry Baby Wah-Wah". Są produkowane od ponad 60 lat, obecnie przez firmę Honeywell. Mają obudowę ze stali nierdzewnej. Podobne potencjometry w wojskowej wersji RV4 produkują również inni wytwórcy. Firma Clarostat oferuje wersję ze ścieżką z tworzywa przewodzącego oznaczoną jako seria 380 (**rysunek 36**).

Allen-Bradley seria W – miniaturowy, uszczelniony potencjometr 10 mm ze ścieżką węglową formowaną na gorąco (RL = 50 000 obrotów)

Bardzo solidna konstrukcja (**rysunek 37**).

Potencjometry Alpha (RL = 16 000 obrotów)

To jedne z najlepszych niedrogich potencjometrów. Są tajwańskim odpowiednikiem potencjometrów firmy Alps z Japonii. Stosuję je w swoich urządzeniach konsumenckich. Mają cztery posrebrzane styki ślizgowe pracujące na ścieżce oporowej oraz trzy na pierścieniu ślizgowym.

Potencjometry Alps (RL = 16 000 obrotów)

Dobre potencjometry do większości domowych urządzeń Hi-Fi. Model 27 mm Blue Velvet jest wzorcowym potencjometrem regulacji

Rysunek 36. Potencjometry serii J firmy Allen-Bradley należą do najtrwalszych dostępnych konstrukcji. Charakteryzują się bardzo małym poziomem szumów dzięki wypolerowanej ścieżce oporowej. Nigdy nie musiałem ich wymieniać – przeciwnie, często wymontowywałem je ze starych urządzeń, aby wykorzystać je ponownie.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Rysunek 37. Seria W firmy Allen-Bradley to niewielkie, szczelne i bardzo ciche potencjometry.

Rysunek 38. Seria Alps Blue Velvet to jedne z najlepszych potencjometrów ze ścieżką węglową dostępnych na rynku. Są cenione przez projektantów wzmacniaczy Hi-Fi. Można je kupić w firmie Mouser oraz w serwisie eBay.

głośności do sprzętu Hi-Fi. Charakteryzuje się bardzo dobrą zgodnością obu ścieżek, zwłaszcza przy małych poziomach sygnału (**rysunek 38**).

Seria AB CTS
(obecnie Blore Edwards, L = 25 000 obrotów)

Wytrzymałe potencjometry stosowane między innymi w syntezatorach serii EMS 4000 oraz wzmacniaczach Leak Delta 70 (**rysunek 39**).

Rysunek 39. Model AB CTS (nie mylić z Allen-Bradley) to solidny, klasyczny potencjometr ze ścieżką węglową, produkowany w Walii przez firmę Blore Edwards Ltd. Łatwo go rozpoznać po plastikowej zaślepce z tyłu obudowy.

Rysunek 40. Uszczelniony potencjometr BI P260 ze ścieżką z tworzywa przewodzącego oferuje bardzo korzystny stosunek jakości do ceny. Ma niewielkie wymiary, suwak z czterema stykami ślizgowymi, nadaje się do montażu na płytce drukowanej i jest dostępny w firmie Profusion.

Rysunek 41. Potencjometr Bourns 91 to mój ulubiony regulator głośności. Jego plastikowa obudowa nie jest zbyt solidna, ale pod względem poziomu szumów nie ma sobie równych. Jest dostępny w firmach Farnell i Audio Out.

Potencjometry serii BI P260
(RL = 1 000 000 obrotów
– wartość wydaje się nieco optymistyczna)

Charakteryzują się dużym skokiem rezystancji na początku zakresu regulacji, ale jak na uszczelnione potencjometry z tworzywa przewodzącego oferują korzystny stosunek jakości do ceny (**rysunek 40**).

Potencjometry serii Bourns 51, 81, 82, 91, 95 i 96 (RL = 100 000 obrotów)

To moje ulubione potencjometry. Nawet wersje cermetowe (RL = 50 000 obrotów) pracują bardzo cicho. Są stosowane w profesjonalnym sprzęcie emisyjnym. Stereofoniczny potencjometr logarytmiczny 10 kΩ typu 91A2A-B28-D15/D15L kosztuje w firmie Farnell około 12 funtów. Jest drogi, ale wart swojej ceny. Charakterystyczny niebieski kolor pokazano na **rysunku 41**.

Potencjometry Clarostat (obecnie Honeywell) typu RV6, ze ścieżką z tworzywa przewodzącego (RL = 100 000 obrotów)

Dobre, lecz drogie miniaturowe potencjometry o średnicy 10 mm (**rysunek 42**). W karcie katalogowej podano parametr dynamicznej

Rysunek 42. Clarostat RV6 to niewielki potencjometr ze ścieżką z tworzywa przewodzącego, wykonany zgodnie ze specyfikacją wojskową i zamknięty w szczelnej obudowie ze stali nierdzewnej. Przez wiele lat stosowałem go jako regulator strojenia w moim Pocket Thereminie.

rezystancji szumowej, który w tym przypadku wynosi ±1% rezystancji ścieżki. Dla liniowej wersji 50 kΩ, którą mam w magazynie, odpowiada to oczekiwanej zmienności ±500 Ω.

Potencjometry Clarostat 388, seria modułowa ze ścieżką z tworzywa przewodzącego (RL = 100 000 obrotów)

Najwyższej klasy potencjometry stosowane w konsolach mikserskich SSL.

Citec/TE Connectivity MC1/U
(RL = 25 000 obrotów)

Małe potencjometry cermetowe o dużej mocy znamionowej 2 W. Dobrze uszczelnione i bardzo solidne. Stosowane w samolotach Tornado. Podobny model Plessey/Citec MH1 ma ścieżkę węglową formowaną na gorąco i moc znamionową 0,25 W. Jakość tych potencjometrów bywa nierówna. Nowsza wersja CLQ ma tylne uszczelnienie epoksydowe chroniące wyprowadzenia przed uszkodzeniem podczas lutowania (**rysunek 43**).

Erie/ITT (RL = 100 000 obrotów)

Bardzo stara konstrukcja ze ścieżką węglową formowaną na gorąco, wyjątkowo mało szumiąca jak na swoje czasy (**rysunek 44**).

Omeg (RL = 20 000 obrotów)

Wczesne wersje miały pierścień ślizgowy wykonany z różnych metali, co powodowało pojawianie się trzasków już po około roku eksploatacji. Jeśli znajdziesz taki potencjometr w starszym urządzeniu, warto go wymienić. Późniejsze wersje z pierścieniem ślizgowym z polimeru węglowego są znacznie lepsze.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Rysunek 43. Potencjometr Citec/Plessey CLQ ze ścieżką węglową formowaną na gorąco jest stosowany w lotnictwie. Jest bardzo drogi, ale również bardzo wytrzymały. Istnieje także wersja cermetowa MCU/1, która nie nadaje się do regulatorów głośności.

Rysunek 45. Klasyczny potencjometr przemysłowy serii Plessey E ze ścieżką węglową formowaną na gorąco jest niemal niezniszczalny.

Rysunek 46. Bardzo mały potencjometr Ruwido. Ze względu na ceramiczne podłoże wygląda jak potencjometr cermetowy, ale w rzeczywistości ma węglową ścieżkę oporową i węglowy suwak.

Penny & Giles (RL > 1 000 000 obrotów)

To absolutna czołówka wśród potencjometrów, jednak ich produkcja została niedawno zakończona. Firma Audio Maintenance Ltd w Manchesterze nadal oferuje stereofoniczne potencjometry suwakowe o długości 104 mm w cenie około 90 funtów.

Piher (RL = 10 000 obrotów)

Niedrogie potencjometry o przeciętnej jakości. Niektóre modele z tworzywa sztucznego są wyjątkowo słabe.

Seria Plessey E (RL = 25 000 obrotów, w praktyce raczej około 100 000 obrotów)

Bardzo duże potencjometry o mocy 2 W ze ścieżką węglową formowaną na gorąco, które wydają się wręcz niezniszczalne. Charakteryzują się dużym momentem obrotowym i niewielkim luzem osi, dlatego wymagają zastosowania dużego pokrętła. Firma RS sprzedawała je pod własną marką jako modele 30 mm, reklamując je jako potencjometry o małym poziomie szumów podczas obracania. W rzeczywistości, ze względu na chropowatą powierzchnię ścieżki, nie były pod tym względem wyjątkowe i miały słabą tolerancję rezystancji (**rysunek 45**).

Rysunek 44. Potencjometr Erie ze ścieżką węglową formowaną na gorąco jest jednym z nielicznych wczesnych modeli zaprojektowanych z myślą o małym poziomie szumów. Używałem go w swoich efektach gitarowych bez żadnych problemów.

Ruwido (RL = 20 000 obrotów)

Wysokiej jakości niewielkie, szczelne potencjometry do aparatury pomiarowej ze ścieżką węglową, popularne wśród niemieckich inżynierów dźwięku. Co ciekawe, niektóre modele o charakterystyce logarytmicznej były oznaczone symbolem „+exp". Korzystałem również z potencjometrów suwakowych tej firmy, które wyróżniały się dużą wytrzymałością mechaniczną. Były oznaczone symbolem „RUF" – dość niefortunną nazwą, ponieważ w rzeczywistości pracowały bardzo płynnie (**rysunek 46**).

Sfernice, o żywotności 100 000 cykli

Głównie są to potencjometry cermetowe, ale niektóre z nich mają ścieżki z tworzywa przewodzącego. Eleganckie francuskie produkty, bardzo drogie, przeznaczone do celów przemysłowych.

Spectrol 149 z tworzywa przewodzącego, małe czarne kostki, o żywotności 25 000 cykli

Są to produkowane w Wielkiej Brytanii solidne potencjometry klasy pomiarowej. Firma CE Distribution w Arizonie w USA dysponuje szerokim asortymentem tych potencjometrów, głównie związanych z osprzętem gitarowym.

Po prostu powiedz „nie" potencjometrom

Jednym ze sposobów rozwiązania wszystkich opisanych wcześniej problemów jest całkowita rezygnacja z przesyłania sygnału audio przez potencjometry i zastosowanie zamiast nich wzmacniaczy sterowanych napięciem (VCA). Uważam, że układy VCA firmy THAT, takie jak seria 2180xx, charakteryzują się wystarczająco małymi zniekształceniami i szumami, aby można je było stosować w domowym sprzęcie Hi-Fi. Mają również naturalną logarytmiczną charakterystykę regulacji. Regulator głośności dla systemu stereofonicznego lub sześciokanałowego może być sterowany napięciem pochodzącym z pojedynczego potencjometru liniowego, wygładzonym przez kondensator. Zwiększa to trwałość potencjometru wielokrotnie, a niemal nieograniczoną trwałość można uzyskać, stosując czujnik Halla współpracujący z magnesem umieszczonym na osi. Tam, gdzie można zaakceptować większe zniekształcenia i szumy (na przykład w radioodbiornikach i syntezatorach), można zastosować wzmacniacze transkonduktancyjne LM13600/700 lub lepszy jakościowo CA3280 współpracujące z potencjometrem logarytmicznym. Jeżeli dopuszczalna jest skokowa regulacja poziomu i niewielki efekt „zipper noise", można zastosować cyfrowo sterowane układy rezystorowej drabinki przełączanej, takie jak Dallas DS1802. Mogą one współpracować z enkoderem obrotowym, również optycznym, co zapewnia bardzo dużą trwałość. Oczywiście problem trzasków w takim rozwiązaniu nie występuje. Wszystkie te rozwiązania są jednak stosunkowo drogie i znacznie bardziej złożone od klasycznego potencjometru. Dlatego obecnie dominują dwa podejścia: programowa regulacja głośności albo tradycyjny potencjometr. ■

Jake Rothman

Ten artykuł był wcześniej opublikowany na łamach „Practical Electronics", lipiec 2023 (www.epemag3.com)

eprasa.pl 17a47aa7e2

Rezystancja sterowana elektronicznie, część 1

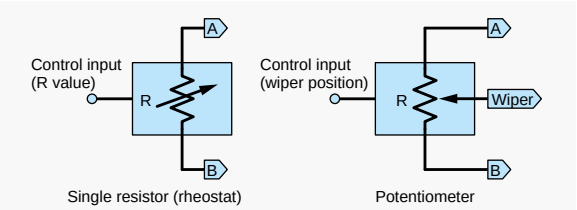
Jakiś czas temu na forum EEWeb użytkownik Kintaro zamieścił pytanie dotyczące elektronicznego sterowania rezystancją. „W tej chwili znam dwie wartości: napięcie w węźle (X V) oraz rezystancję rezystora (Y Ω). Układ musi zinterpretować X V jako X Ω, a następnie dostosować wartość rezystora o regulowanej rezystancji do wartości Z Ω, ponieważ rezystancje Y i Z połączone równolegle dają wypadkową rezystancję X Ω. Otrzymany układ powinien działać dla wszystkich znanych wartości napięcia węzła i rezystora".

Najważniejsza jest tutaj możliwość sterowania rezystancją za pomocą napięcia. Wymóg zastosowania rezystora połączonego równolegle wynika ze specyfiki aplikacji Kintaro i można go spełnić, jeśli rezystor o regulowanej rezystancji zostanie ustawiony na wymaganą wartość. Pokrótce omówimy to zagadnienie, a następnie przejdziemy do bardziej ogólnego omówienia elektronicznego sterowania rezystancją.

Elektroniczne sterowanie rezystancją

Istnieje kilka powszechnie stosowanych sposobów realizacji rezystora sterowanego elektronicznie (możliwe są również inne rozwiązania). Jako rezystory sterowane napięciem można wykorzystać tranzystory polowe, zarówno JFET, jak i MOSFET, choć w takich zastosowaniach często stosuje się tranzystory JFET. Drugim rozwiązaniem są liczne układy scalone potencjometrów cyfrowych. Zazwyczaj zawierają one sieć rezystorów i przełączników oraz są przeznaczone do współpracy z mikrokontrolerami, często za pośrednictwem magistrali szeregowej, takiej jak SPI lub I²C. Cyfrowe polecenie określa stan przełączników, które z kolei regulują rezystancję.

Podobnie jak mechaniczne rezystory nastawne, rezystory sterowane elektronicznie mogą być dwu- lub trzykońcówkowe (**rysunek 1**). Potencjometr ma zacisk środkowy (suwak), który łączy się z wybranym punktem elementu rezystancyjnego lub łańcucha rezystorów. Rezystancja potencjometru mierzona między punktami A i B (rysunek 1) jest stała, natomiast regulator mechaniczny lub elektroniczny ustala wartość rezystancji między punktem A a suwakiem oraz między punktem B a suwakiem. Każda z tych rezystancji może przyjmować wartość od zera do rezystancji między punktami A i B, przy czym ich suma jest zawsze równa rezystancji między punktami A i B. Tranzystory polowe w naturalny sposób tworzą pojedyncze rezystory sterowane napięciem, natomiast rezystory sterowane cyfrowo są dostępne zarówno w wersji dwukońcówkowej, jak i potencjometrycznej.



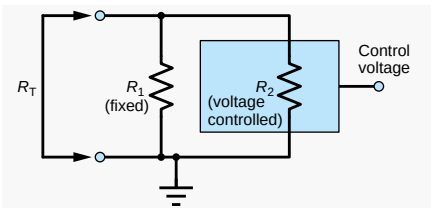
Rysunek 1. Rezystory sterowane elektronicznie.

Wszystkie te elementy mają określone graniczne wartości napięcia i prądu, jakie mogą przenosić, jednak w przypadku rezystorów sterowanych elektronicznie dopuszczalne zakresy mogą być bardziej ograniczone niż w przypadku mechanicznych elementów o podobnej rezystancji. Rezystory sterowane elektronicznie mogą mieć również inne ograniczenia, takie jak konieczność uziemienia jednego z ich wyprowadzeń.

Rezystory sterowane elektronicznie można stosować wszędzie tam, gdzie wykorzystuje się mechaniczne rezystory nastawne, potencjometry lub potencjometry montażowe, jeśli zachodzi potrzeba zastosowania sterowania cyfrowego za pomocą komputera lub mikrokontrolera, a tym samym zwiększenia funkcjonalności projektowanego urządzenia. Rezystory sterowane napięciem są powszechnie wykorzystywane do analogowej regulacji wzmocnienia oraz charakterystyki częstotliwościowej wzmacniaczy i filtrów, między innymi w układach automatycznej regulacji wzmocnienia (AGC), filtrach adaptacyjnych i oscylatorach sterowanych napięciem.

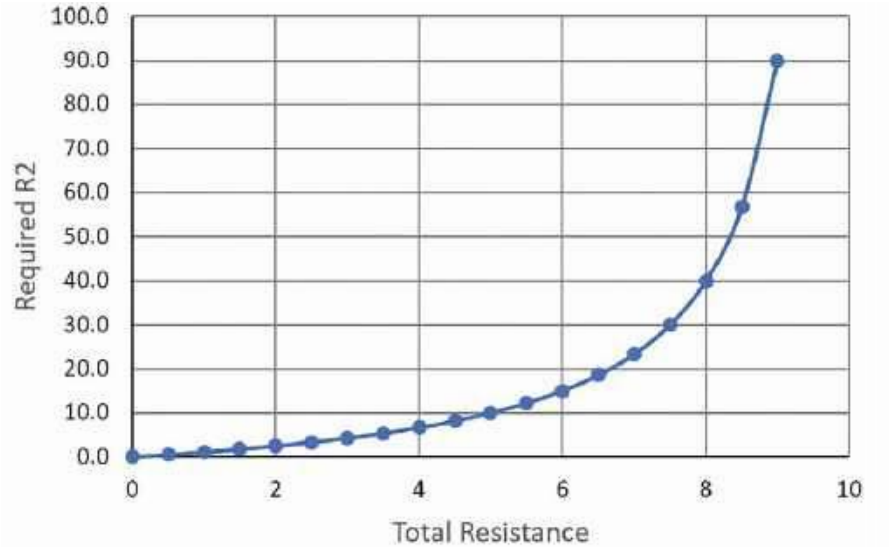
Rezystory równoległe

W swoim poście na forum EEWeb Kintaro opisuje połączenie równoległe rezystora o stałej rezystancji z rezystorem sterowanym elektronicznie (**rysunek 2**). Przyjrzyjmy się pokrótce tej sytuacji. Jednym z najbardziej znanych wzorów w elektronice jest zależność określająca rezystancję zastępczą RZ zestawu rezystorów R1, R2, R3 ... RN połączonych równolegle. Odwrotność rezystancji RZ jest równa sumie odwrotności rezystancji poszczególnych rezystorów:



Rysunek 2. Rezystor R1 połączony równolegle z rezystorem sterowanym napięciem R2, tworzące rezystancję zastępczą RZ.

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 3. Wykres pokazujący, jaką wartość powinien mieć rezystor R2 w układzie z rysunku 2, aby uzyskać określoną wartość rezystancji RZ przy R1 = 10 Ω.

$$\frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{RN}$$

W przypadku dwóch rezystorów połączonych równolegle, jak w układzie Kintaro pokazanym na rysunku 2, rezystancja zastępcza wynosi:

$$R_Z = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Jeden z rezystorów ma stałą wartość, a drugi zmienianą, razem stanowią pożądaną wartość RZ. Możemy przekształcić powyższy wzór, aby określić wymaganą wartość R2 pozwalającą osiągnąć określoną rezystancję całkowitą RZ:

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_Z}{R_1 - R_Z}$$

Nie jest to funkcja liniowa. Na **rysunku 3** przedstawiono wartość rezystancji R2 wymaganą do uzyskania rezystancji RZ z zakresu od 1 do 9 Ω, przy R1 = 10 Ω. Jeżeli pierwotne napięcie sterujące (X w poście Kintaro) zmienia się liniowo, a rezystancja R2 również zmienia się liniowo wraz z napięciem sterującym, nie można go bezpośrednio wykorzystać do liniowego sterowania rezystancją RZ (rysunek 2).

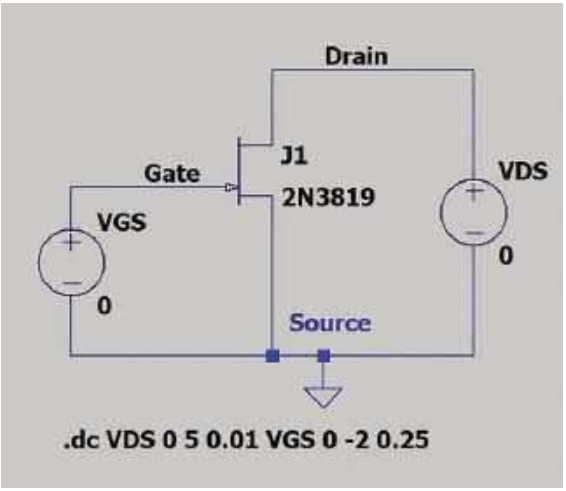
Aby uzyskać liniową charakterystykę sterowania, należałoby odwzorować wejściowe napięcie sterujące (X z postu Kintaro) na napięcie sterujące wymagane do uzyskania odpowiedniej wartości rezystancji R2. Można to zrealizować za pomocą mikrokontrolera mierzącego napięcie X przy użyciu przetwornika analogowo-cyfrowego i wyznaczającego wymagane napięcie sterujące na podstawie tablicy wartości lub obliczeń wykonywanych z wykorzystaniem powyższego wzoru. Następnie przetwornik cyfrowo-analogowy mógłby wytwarzać odpowiednie napięcie sterujące rezystorem R2.

Nie wiemy, czy powyższe rozwiązanie jest możliwe do zastosowania, ponieważ nie znamy wymaganego czasu reakcji ani żadnych innych szczegółów. Kolejną kwestią jest to, że opis „X woltów jako X omów" sugeruje małe wartości rezystancji przy typowych napięciach układowych z zakresu od kilku do kilkudziesięciu woltów, co może być trudne do zrealizowania.

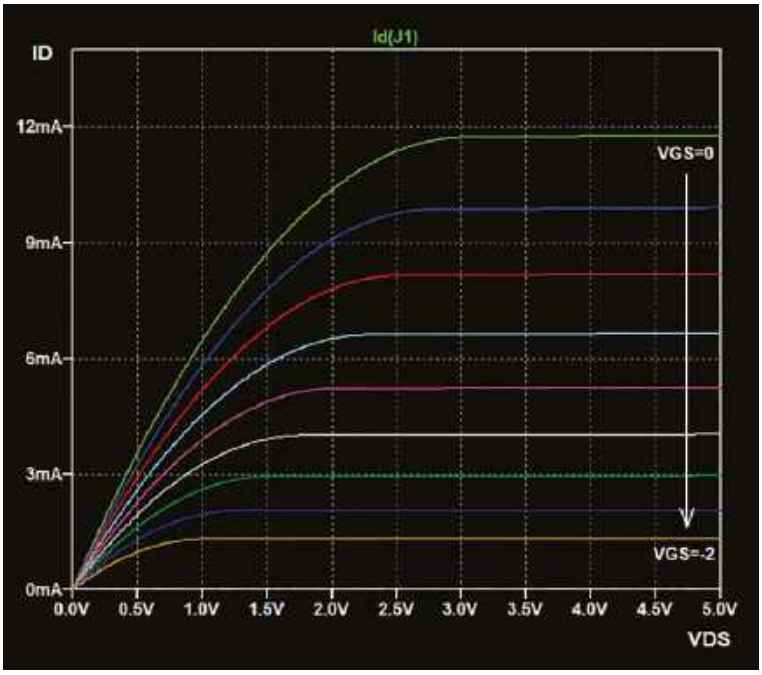
Tranzystory polowe (FET) jako rezystory sterowane napięciem

Jak wspomniano wcześniej, tranzystory JFET są powszechnie stosowane do realizacji rezystorów sterowanych napięciem. Schemat układu przedstawiony na **rysunku 4** został przygotowany w programie LTspice i umożliwia wyznaczenie charakterystyk tranzystora. Tranzystory JFET mają trzy wyprowadzenia: bramkę, źródło i dren. Napięcie bramka–źródło (VGS) steruje prądem drenu (ID), którego wartość zależy również od napięcia dren–źródło (VDS). Polaryzacja napięć i prądów tranzystora JFET zależy od jego typu – z kanałem n lub z kanałem p – podobnie jak w przypadku tranzystorów bipolarnych NPN i PNP.

Układ przedstawiony na rysunku 4 zawiera tranzystor JFET z kanałem typu n, który

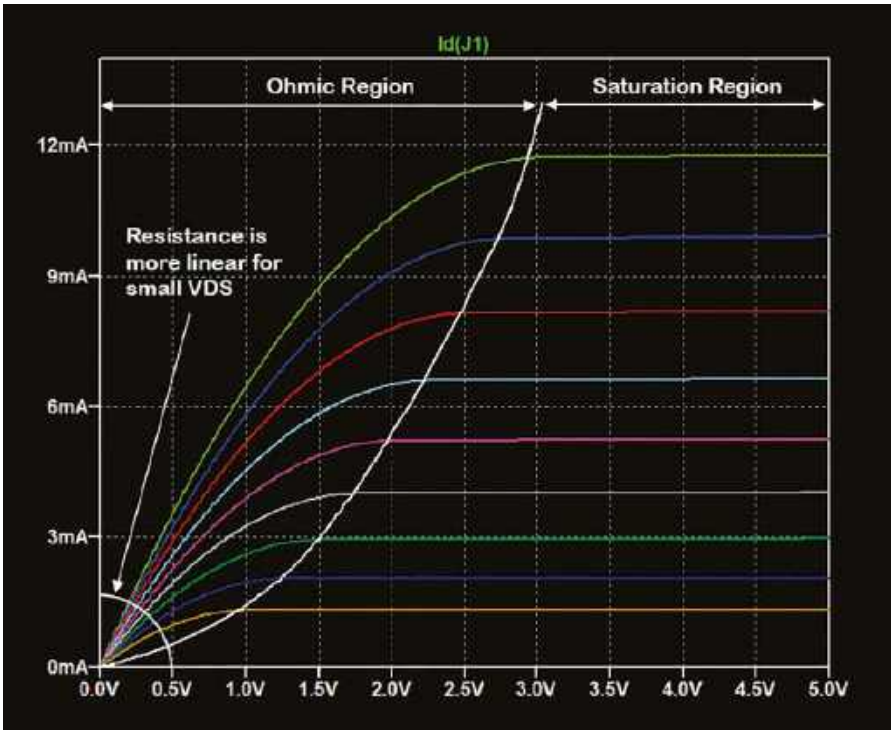


Rysunek 4. Schemat w programie LTspice służący do wyznaczania charakterystyk tranzystora JFET przez zmianę napięć VGS i VDS.

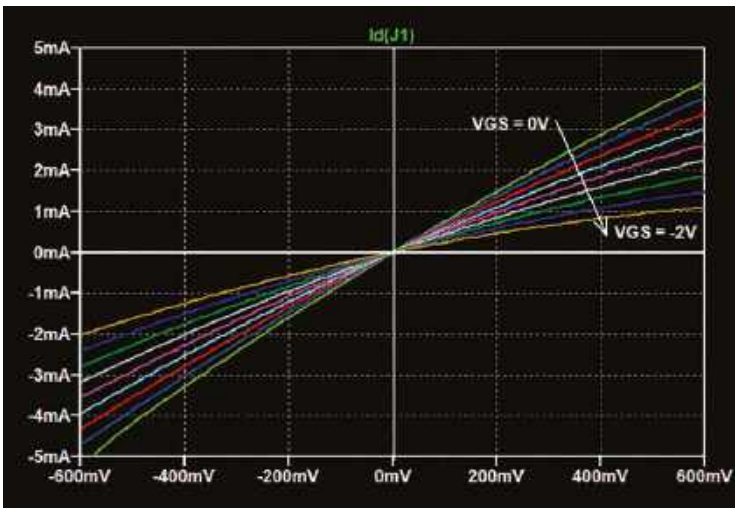


Rysunek 5. Typowe charakterystyki tranzystora JFET przedstawiające obszar omowy (po lewej) i obszar nasycenia (po prawej).

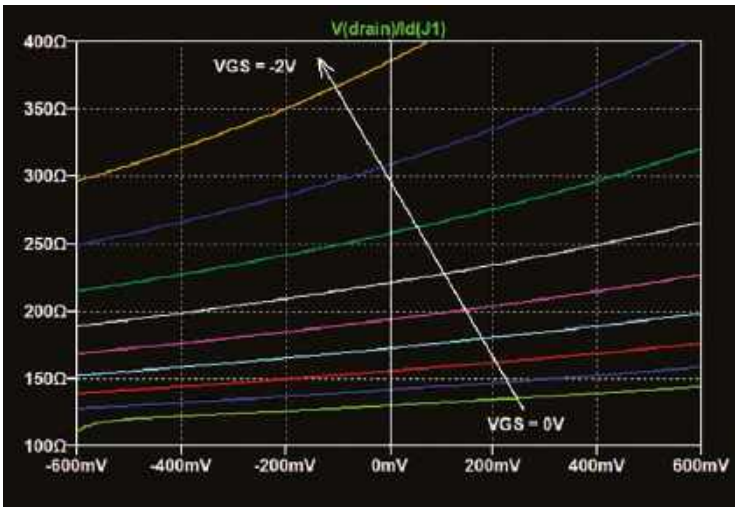
eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 6. Obszary pracy tranzystora JFET (ID w funkcji VDS dla różnych wartości VGS).



Rysunek 7. Charakterystyka tranzystora JFET dla różnych napięć bramka-źródło przy napięciach dren-źródło bliskich zeru.



Rysunek 8. Rezystancja dren-źródło tranzystora JFET dla różnych napięć bramka-źródło przy napięciach dren-źródło bliskich zeru.

wymaga ujemnego napięcia między bramką a źródłem oraz zazwyczaj dodatniego napięcia między drenem a źródłem, choć, jak zobaczymy, możliwa jest również praca przy ujemnym napięciu VDS. Napięcie między bramką a źródłem steruje prądem drenu, który wpływa do drenu. Należy zauważyć, że prąd bramki jest znikomy, dlatego tranzystor JFET uważa się za element sterowany napięciem, w odróżnieniu od tranzystora bipolarnego, w którym prąd kolektora można rozpatrywać jako zależny od prądu bazy lub napięcia baza–emiter.

Symulację w programie LTspice skonfigurowano tak, aby zmieniać zarówno napięcie VDS, jak i napięcie VGS w typowym zakresie pracy tranzystora. W rezultacie otrzymano charakterystyki przedstawione na **rysunku 5**, podobne do tych, które można znaleźć w notach katalogowych tranzystorów.

Wykres przedstawiony na rysunku 5 uzyskano za pomocą analizy stałoprądowej (dyrektywa SPICE .dc) z wykorzystaniem dwóch źródeł napięcia o zmiennej wartości. Pierwszym z nich jest źródło VDS. Wartości tego napięcia tworzą oś X charakterystyk generowanych przez program LTspice. Drugim źródłem jest VGS. Każda wartość tego napięcia powoduje narysowanie oddzielnej krzywej. Na osi Y wykreślany jest prąd drenu ID(J1).

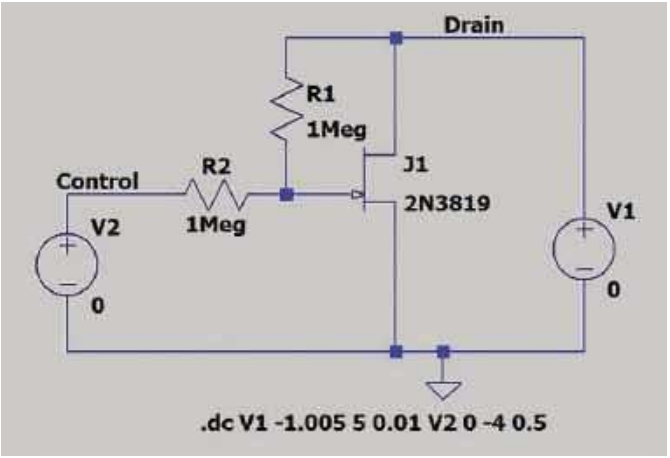
Parametry VDS 0 5 0.01 zamieszczone w dyrektywie .dc widocznej na rysunku 4 oznaczają, że napięcie dren–źródło będzie zmieniało się od 0 do 5 V z krokiem 0,01 V. Powoduje to utworzenie dużej liczby punktów na każdej krzywej, co umożliwia dokładne powiększanie wykresu. Parametry VGS 0 −2 0.25 oznaczają natomiast, że napięcie bramka–źródło będzie zmieniało się od 0 do −2 V z krokiem 0,25 V. Daje to dziewięć wartości, z których każda tworzy na wykresie z rysunku 5 oddzielną krzywą. Liczbę kroków dla napięcia VGS celowo ograniczono, aby nie zaciemniać wykresu nadmierną liczbą charakterystyk.

Z charakterystyk przedstawionych na **rysunku 6** wynika, że obszar pracy tranzystora JFET można podzielić na dwa zakresy: obszar nasycenia i obszar omowy.

Obszar nasycenia, widoczny po prawej stronie rysunku, występuje przy stosunkowo wysokich napięciach dren–źródło i charakteryzuje się niemal stałym prądem drenu przy danym napięciu bramka–źródło. Obszar ten wykorzystuje się podczas pracy tranzystora JFET jako wzmacniacza.

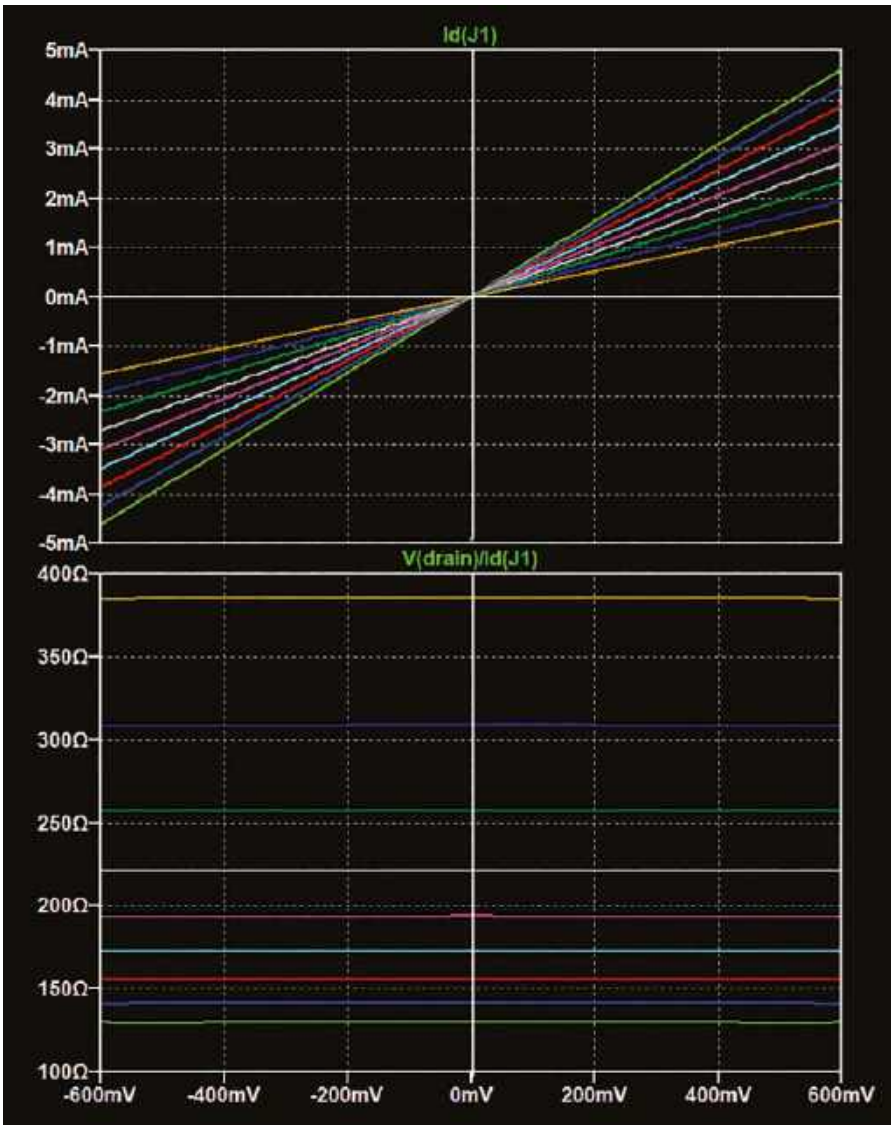
Obszar omowy, widoczny po lewej stronie rysunku, charakteryzuje się wzrostem prądu drenu wraz ze wzrostem napięcia

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 9. Rezystor sterowany napięciem ze sprzężeniem zwrotnym zapewniającym bardziej stałą wartość rezystancji przy zmianach napięcia dren-źródło.

dren–źródło. Tranzystor wykazuje w tym zakresie właściwości zbliżone do rezystora, jednak – jak wyraźnie pokazano na rysunku 6 – zależność prądu od napięcia nie jest liniowa, ponieważ charakterystyki nie są prostoliniowe w całym obszarze omowym. Jeżeli jednak przyjrzymy się zakresowi małych napięć dren–źródło, zauważymy, że krzywe są tam znacznie bliższe liniom prostym. Właśnie ta część charakterystyki, znajdująca się w obrębie łuku zaznaczonego w pobliżu początku układu współrzędnych, może zostać wykorzystana do realizacji rezystora sterowanego napięciem.



Rysunek 10. Charakterystyka tranzystora JFET i rezystancja dren-źródło przy zastosowaniu sprzężenia zwrotnego, jak pokazano w układzie symulacyjnym z rysunku 9.

Na **rysunku 7** przedstawiono powiększony fragment wykresu z rysunku 6, obejmujący obszar w pobliżu początku układu współrzędnych. Wykres rozszerzono o ujemne wartości napięcia dren–źródło, aby zilustrować, że rezystor sterowany napięciem zbudowany z tranzystora JFET działa przy obu polaryzacjach napięcia dren–źródło. Widać, że zależność prądu od napięcia jest dość bliska liniowej, choć nie jest idealnie liniowa.

Aby lepiej zrozumieć działanie tranzystora jako rezystora sterowanego napięciem, warto przedstawić na wykresie bezpośrednio wartości rezystancji. W idealnym przypadku byłyby one stałe i różne dla każdej wartości napięcia bramka–źródło. Program LTspice umożliwia wykreślanie zależności obliczanych na podstawie wielkości występujących w układzie. W tym przypadku rezystancję dren–źródło wyznacza się, dzieląc napięcie dren–źródło przez prąd drenu. Otrzymany wykres przedstawiono na rysunku 8. Wynika z niego, że rezystancja tranzystora JFET zmienia się od około 130 Ω do 390 Ω, gdy napięcie VGS zmienia się od 0 V do −2 V (dla VDS = 0 V). Rezystancja pozostaje prawie stała w zakresie napięć dren–źródło od −600 mV do +600 mV, przy czym najlepszą stałość uzyskuje się dla mniejszych wartości napięcia bramka–źródło.

Polecenie analizy stałoprądowej wykorzystane do uzyskania **rysunków 7** i **8** różniło się nieco od przedstawionego na rysunku 4 i miało postać:

```
.dc VDS −1.005 5 0.01 VGS 0 −2 0.25
```

Jedną ze zmian było rozpoczęcie przemiatania napięcia VDS od wartości bliskiej −1 V, co pozwoliło na wykreślenie charakterystyk dla obu polaryzacji napięcia. Ponadto przemiatanie rozpoczyna się od pozornie dziwnej wartości −1,005 V. Ma to na celu uniknięcie punktu pomiarowego odpowiadającego napięciu VDS = 0 V, ponieważ w tym punkcie prąd drenu również wynosi zero, a wyznaczenie rezystancji na podstawie ilorazu napięcia i prądu jest niemożliwe. Chociaż rzeczywista rezystancja nie jest równa zeru, nie można jej obliczyć w punkcie odpowiadającym zerowemu napięciu i zerowemu prądowi. Powodowałoby to pojawienie się anomalii na wykresie, której uniknięto dzięki zastosowaniu opisanych

eprasa.pl 17a47aa7e2

parametrów przemiatania. Należy zauważyć, że mimo iż wykresy przedstawione na rysunkach 7 i 8 uzyskano przez powiększenie obrazu w programie LTspice, duża liczba punktów obliczeniowych zapewnia zachowanie dokładnego przebiegu charakterystyk.

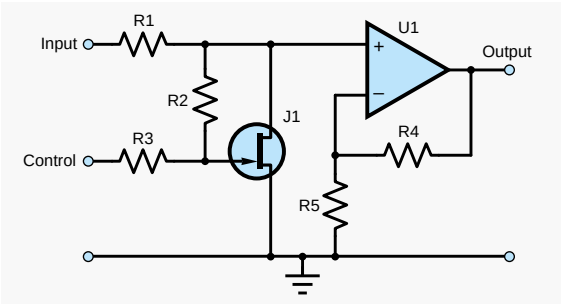
Z rysunku 8 wynika, że rezystancja tranzystora JFET nie jest całkowicie stała przy zmianach napięcia dren–źródło. Może to powodować zniekształcenia, jeśli tranzystor JFET zostanie wykorzystany w torze sygnałowym. Rezystancja tranzystora ma tendencję do wzrostu wraz ze wzrostem napięcia dren–źródło. Można to skompensować, doprowadzając część napięcia dren–źródło do obwodu bramki, tak aby wraz ze wzrostem napięcia dren–źródło zwiększało się również napięcie bramka–źródło. Powoduje to wzrost prądu drenu (w porównaniu z układem bez sprzężenia zwrotnego), a tym samym zmniejszenie efektywnej rezystancji.

Układ zapewniający bardziej stałą wartość rezystancji przedstawiono na **rysunku 9**. Rezystory tworzące obwód sprzężenia zwrotnego muszą mieć dużą rezystancję, aby nie obciążały układu, w którym tranzystor JFET pracuje jako rezystor sterowany napięciem. W przedstawionym przykładzie zastosowano rezystory o wartości 1 MΩ, choć nie występuje tu żaden dodatkowy układ, który mógłby zostać obciążony. W praktyce w tego typu rozwiązaniach stosuje się rezystory o wartościach od kilkuset kiloomów do kilku megaomów.

Wyniki symulacji układu przedstawionego na rysunku 9 pokazano na **rysunku 10** w postaci podobnej do tej z rysunków 7 i 8. Parametry przemiatania zmieniono, aby uwzględnić fakt, że rezystory R1 i R2 tworzą dzielnik napięcia o przełożeniu 1:2, zmniejszający o połowę wpływ napięcia sterującego na napięcie bramka–źródło tranzystora JFET. Dlatego zakres zmian napięcia oraz wartość kroku zwiększono dwukrotnie – odpowiednio do –4 V i 0,5 V. Wyniki wskazują na znaczną poprawę stałości rezystancji, innymi słowy rezystancja tak utworzonego elementu zmienia się tylko nieznacznie wraz ze zmianą napięcia dren–źródło.

Tranzystor JFET wykorzystany w tych przykładach został wybrany przypadkowo – był po prostu pierwszym elementem z listy dostępnej w programie LTspice. Nie został dobrany jako element optymalny do zastosowań w charakterze rezystora sterowanego napięciem. Posłużył jedynie do zilustrowania podstawowych zasad działania takiego układu oraz pokazania, że w tej roli można wykorzystać praktycznie każdy tranzystor JFET. Dostępne są jednak specjalne tranzystory JFET zoptymalizowane do pracy jako rezystory sterowane napięciem, na przykład tranzystor VCR4N z kanałem typu n firmy InterFET. Takie elementy są znacznie droższe. W chwili pisania artykułu pojedynczy tranzystor 2N3819 kosztował w firmie Mouser 93 pensy, natomiast VCR4N – 11,54 funta (stan na wrzesień 2022 r.).

Na koniec spójrzmy na rysunek 11 przedstawiający przykładowy układ wykorzystujący rezystor sterowany napięciem zbudowany na tranzystorze JFET. Jest to wzmacniacz o napięciowo sterowanym wzmocnieniu. Rezystor R1 oraz rezystor sterowany napięciem utworzony przez tranzystor JFET (J1) i rezystory sprzężenia zwrotnego R2 oraz R3 tworzą dzielnik napięcia. Poziom sygnału wyjściowego zależy od wartości regulowanej rezystancji, a następnie jest buforowany i wzmacniany przez wzmacniacz operacyjny. Napięcie sterujące ma wartość ujemną, podobnie jak w układach przedstawionych na rysunkach 4 i 9, jednak przy typowym symetrycznym zasilaniu wzmacniacza operacyjnego nie stanowi to istotnego problemu. Sygnał wejściowy powinien być symetryczny względem 0 V i mieć odpowiednio małą amplitudę, aby układ z tranzystorem JFET pracował przy zadanej, w przybliżeniu stałej wartości rezystancji. ■



Rysunek 11. Wzmacniacz z regulacją wzmocnienia za pomocą rezystora sterowanego napięciem zbudowanego na tranzystorze JFET.

Ian Bell

Ten artykuł był wcześniej opublikowany na łamach „Practical Electronics", wrzesień 2022 (www.epemag3.com)

REKLAMA

eprasa.pl 17a47aa7e2

Patronat EdW nad szkołami i uczelnianymi Kołami Naukowymi rozkwita i daje redakcji EdW impulsy zachęcające do wspierania edukacji szkolnej i uczelnianej. Działa sprzężenie zwrotne. Dostajemy mnóstwo wiadomości od uczniów, nauczycieli i studentów. Dla nich jest ta rubryka.

Z płyty Audio CD odczytywanych jest co najmniej 1 411 200 bitów na sekundę. Odczyt ten musi przebiegać bezbłędnie, dlatego opracowano bardzo złożony system wykorzystujący takie rozwiązania, jak kodowanie CIRC, kompensacja DSV, bity parzystości, bity dopełniające (packing bits) itp.

Przypis redaktora: Choć płyta Audio CD należy dziś do technologii o znaczeniu głównie historycznym, warto poznać lub przypomnieć sobie zasady jej działania. Był to jeden z najbardziej dopracowanych systemów cyfrowego zapisu danych swoich czasów, a wiele zastosowanych w nim rozwiązań – między innymi kodowanie kanałowe, korekcja błędów i synchronizacja danych – do dziś stanowi podstawę współczesnych systemów cyfrowych.

Powierzchnia płyty kompaktowej
Od analogowego sygnału audio do 2 × 16 bitów

Jak zapewne wiadomo, dwa analogowe sygnały audio – lewego i prawego kanału – są zapisywane na płycie Audio CD w postaci cyfrowej. Z obu sygnałów pobiera się 44 100 próbek na sekundę. Próbki te są przekształcane w 16-bitowe słowa cyfrowe w procesie zwanym liniową modulacją PCM (Linear PCM). Każda próbka jest digitalizowana w ten sam sposób. Nawet jeśli próbka zawiera jedynie niewielki poziom szumu tła, i tak jest przekształcana w 16-bitowe słowo cyfrowe. To, że większość bitów takiego słowa ma wartość „L", uznano za rzecz oczywistą – podczas opracowywania systemu Audio CD nie dysponowano jeszcze metodami pozwalającymi na bardziej inteligentną digitalizację.

1 411 200 bitów audio na sekundę

Oznacza to, że w każdej sekundzie odtwarzania na powierzchni płyty Audio CD zapisanych jest nie mniej niż 1 411 200 bitów audio. Łatwo to sprawdzić. Digitalizacja dwóch kanałów z rozdzielczością 16 bitów daje łącznie 32 bity na każdą próbkę. Jeżeli próbkowanie odbywa się 44 100 razy na sekundę, otrzymujemy strumień danych o przepływności 1 411 200 bitów na sekundę.

Oczywiście na płycie Audio CD zapisane są również inne informacje, takie jak nazwy utworów, wykonawcy, czas trwania utworów, dane o położeniu utworów na spirali, informacje wykorzystywane do korekcji błędów itp.

Nośnik informacji na płycie Audio CD

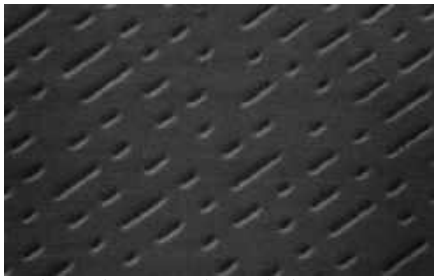
Płyta Audio CD składa się z krążka z tworzywa akrylowego o grubości około 1,2 mm i średnicy 12 cm. Informacja dźwiękowa jest zapisana na górnej powierzchni tego krążka w postaci bardzo dużej liczby tzw. pitów i landów. Pity (pits) są mikroskopijnymi zagłębieniami wytłoczonymi w powierzchni płyty. Landy (lands) stanowią nienaruszoną powierzchnię pomiędzy pitami. Przejścia między pitami i landami nazywane są zboczami. Każdy pit ma więc dwa zbocza: jedno na jego początku, a drugie na końcu. To właśnie zbocza, a nie same pity czy landy, stanowią najważniejsze źródło informacji na płycie Audio CD.

Pity nie są oczywiście rozmieszczone na powierzchni przypadkowo, lecz wzdłuż spiralnej ścieżki. Spirala ta ma średnio około 20 000 zwojów, co odpowiada około 600 zwojom na milimetr. Odległość między sąsiednimi zwojami spirali wynosi 1,6 μm. Pity mają głębokość 0,12 μm, szerokość 0,6 μm oraz długość od 0,8 μm do 3,5 μm.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Dla jasności: jeden mikrometr stanowi jedną tysięczną milimetra.

Na zakończenie na powierzchnię płyty napylana jest warstwa aluminium, dzięki której staje się ona powierzchnią odbijającą światło.



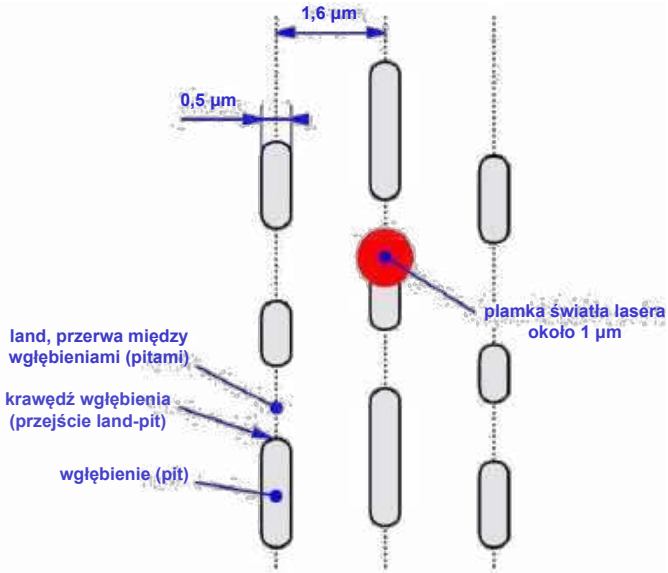
Powierzchnia płyty Audio CD widziana pod mikroskopem elektronowym (© 2007 Wikimedia Commons)

Wymiary zagłębień

Podczas produkcji płyty zagłębienia są wytłaczane pod dużym ciśnieniem w półpłynnym materiale nośnika. Aby na jednej płycie zmieścić jak najwięcej informacji, zagłębienia muszą być możliwie najmniejsze. Istnieją jednak ograniczenia technologiczne i wynikające z konstrukcji układu odczytu, które wyznaczają ich minimalne wymiary. Najważniejszym z nich jest zdolność rozdzielcza układu optycznego odczytującego płytę Audio CD za pomocą wiązki lasera. Opisuje ją wielkość nazywana aperturą numeryczną.

Z teorii optyki wynika, że dla zastosowanego układu można uzyskać aperturę numeryczną równą 0,5. Oznacza to, że średnica plamki świetlnej w ognisku wynosi około 1 μm. Aby tak mała plamka mogła być prawidłowo odczytywana, zagłębienia nie mogą być węższe niż około 0,5 μm, a ich minimalna długość musi wynosić 0,8 μm. Rozmieszczenie zagłębień i płaskich obszarów między nimi przedstawiono na poniższym rysunku.

Zagłębienie ma szerokość około 0,5 μm i jest oświetlane wiązką lasera o średnicy 1 μm. Zwoje spiralnej ścieżki są oddalone od siebie dokładnie o 1,6 μm. Długość zagłębień mieści się w zakresie od 0,8 μm do 3,5 μm. Minimalna długość wynika ze średnicy plamki świetlnej. Gdyby zagłębienia były krótsze, nie mogłyby zostać wykryte przez wiązkę o średnicy 1 μm. Maksymalna długość nie wynika z ograniczeń technologicznych, lecz jest określona przez sposób kodowania sygnału zapisywanego na płycie (o tym później).

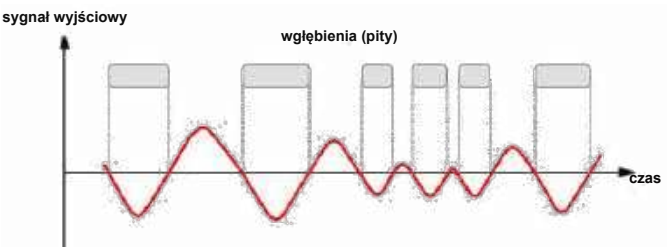


Wymiary elementów nośnika informacji na płycie Audio CD (© 2020 Jos Verstraten)

Odczyt spiralnej ścieżki

Ze względu na ograniczenia technologiczne zagłębienia nie mają idealnie ostrych krawędzi, lecz są nieco zaokrąglone. Ma to niekorzystny wpływ na odczytywany sygnał i jest jedną z przyczyn konieczności stosowania wielu etapów kodowania i przekształcania sygnału. Spiralna ścieżka jest oświetlana czerwonym światłem lasera. Jak wiadomo, powierzchnia płyty jest lustrzana, dlatego światło lasera odbija się od niej. Stopień odbicia zależy jednak od tego, czy wiązka pada na zagłębienie, obszar między zagłębieniami czy ich krawędź. Odbita wiązka jest odbierana w głowicy optycznej przez zespół czułych fotodiod. W ten sposób informacja zapisana na płycie Audio CD zostaje przekształcona w sygnał elektryczny.

Sygnał ten ma postać szeregowego strumienia danych. W idealnym przypadku powinien składać się z prostokątnych impulsów o stromych zboczach. Ze względu na zaokrąglone i nierówne krawędzie zagłębień tak jednak nie jest. Powstający sygnał elektryczny ma stosunkowo długi czas narastania. Jego przebieg pokazano na poniższym rysunku. Ma on kształt zbliżony do trójkątnego, a ponadto jego amplituda nie jest stała. Długie czasy narastania i opadania wynikają z nieostrego przejścia między zagłębieniem a obszarem między zagłębieniami. Zależność amplitudy impulsu od długości zagłębienia jest natomiast skutkiem fizycznych i elektronicznych ograniczeń fotodetektorów zastosowanych w głowicy odczytującej. W rezultacie odczytany sygnał nie ma postaci idealnego cyfrowego przebiegu prostokątnego, lecz bardziej przypomina sygnał analogowy. Dlatego konieczne jest zastosowanie układu z przerzutnikiem Schmitta. Jak okaże się w dalszej części artykułu, układ ten działa poprawnie tylko wtedy, gdy sygnał zostanie zakodowany w odpowiedni sposób.



Sygnał elektryczny generowany przez głowicę optyczną (© 2020 Jos Verstraten)

Format zapisu danych na płycie Audio CD Krawędzie odpowiadają logicznej jedynce

Jednym z najczęściej spotykanych nieporozumień dotyczących sposobu zapisu danych na płycie Audio CD jest przekonanie, że zagłębienia i obszary między nimi odpowiadają stanom logicznym „0" i „1" kodu cyfrowego. Nic bardziej mylnego! Jak pokazano na poniższym rysunku, zarówno zagłębienia, jak i obszary między nimi odpowiadają stanowi logicznemu „0". Jedynie przejścia między nimi, czyli ich krawędzie, odpowiadają stanowi logicznemu „1". Prowadzi

Zależność między szeregowym strumieniem danych a rozmieszczeniem zagłębień i obszarów między nimi na płycie (© 2020 Jos Verstraten)

eprasa.pl 17a47aa7e2

to do dość zaskakującej konsekwencji: w strumieniu danych nigdy nie mogą wystąpić dwie kolejne logiczne jedynki. Do tego zagadnienia wrócimy w dalszej części artykułu.

Format kodowania

W systemie Audio CD dwa analogowe sygnały audio są próbkowane z częstotliwością 44,1 kHz i przekształcane w dwa 16-bitowe słowa odpowiadające kolejnym próbkom. Zanim jednak dane audio zostaną zapisane na płycie CD, są poddawane wielu operacjom i uzupełniane dodatkowymi informacjami. Są to:

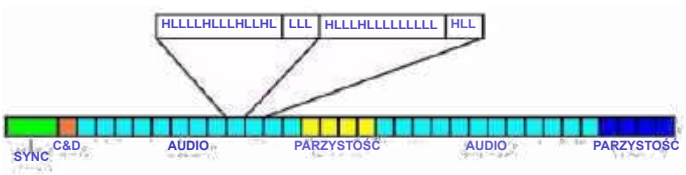
- kod synchronizacji (SYNC), wykorzystywany w odtwarzaczu CD do odtworzenia sygnału zegarowego, z którym zapisano bity na płycie;
- kod C&D, zawierający dodatkowe informacje, między innymi o czasie odtwarzania oraz numerze odtwarzanego utworu;
- osiem kodów parzystości, zgrupowanych w dwa zestawy po cztery, umożliwiających elektronice odtwarzacza CD sprawdzenie, czy odczytane dane są poprawne. Jeżeli wykryty zostanie błąd, informacje zawarte w tych kodach pozwalają na jego skorygowanie, dzięki czemu dźwięk nie ulega zniekształceniu;
- kod dopełniający (packing code), niezbędny do prawidłowego przekształcenia analogowego sygnału wyjściowego z głowicy odczytującej w cyfrowy ciąg impulsów.

Ramka danych na płycie Audio CD

Wszystkie te dane cyfrowe są zapisywane na spiralnej ścieżce płyty Audio CD według określonego wzorca. Taki wzorzec nazywany jest ramką (frame), a jego strukturę przedstawiono na poniższym rysunku.

W każdej ramce zapisywanych jest po sześć próbek z każdego z dwóch kanałów audio. Ponieważ, jak już wiadomo, sygnał jest próbkowany z częstotliwością 44,1 kHz, na płycie musi zostać zapisanych 44 100 ÷ 6 = 7350 ramek na sekundę.

Każdy kwadrat na rysunku odpowiada jednemu bajtowi CD. Dwanaście próbek (po sześć z każdego kanału) zajmuje łącznie 24 bajty CD (2 × 12). Wynika to z prostego faktu, że jednoczesne przetwarzanie 16-bitowych słów reprezentujących zdigitalizowany dźwięk byłoby zbyt złożone.



Struktura jednej ramki danych na płycie Audio CD (© 2020 Jos Verstraten)

Łącznie każda ramka zawiera:

- 1 bajt synchronizacji (SYNC),
- 1 bajt C&D,
- 12 bajtów audio,
- 4 bajty parzystości,
- 12 bajtów audio,
- 4 bajty parzystości.

Wspomniany wcześniej kod dopełniający (packing code) jest wpleciony w poszczególne bajty i dlatego nie występuje jako osobny element struktury ramki.

Bajt CD

Jak zostanie wyjaśnione w dalszej części artykułu, podstawowy bajt CD nie składa się z 8 bitów, jak ma to miejsce w większości systemów cyfrowych, lecz aż z 17 bitów. Czternaście z nich zawiera właściwe informacje, natomiast trzy dodatkowe bity (kod dopełniający, packing code) są dodawane z powodów, które zostaną omówione później.

Szczegółowe omówienie

W kolejnych rozdziałach szczegółowo omówimy przeznaczenie, konieczność stosowania, budowę oraz konsekwencje wszystkich opisanych wcześniej dodatkowych metod kodowania.

Digitalizacja sygnału audio

Pierwszym etapem jest oczywiście digitalizacja dwóch analogowych sygnałów audio. Proces ten obejmuje:

- próbkowanie sygnałów analogowych i przekształcanie każdej próbki w 16-bitowe słowo,
- podział dwóch 16-bitowych słów odpowiadających próbkom na cztery 8-bitowe bajty,
- zebranie danych z sześciu kolejnych próbek,
- pogrupowanie bajtów o numerach parzystych i nieparzystych,
- połączenie wszystkich tych danych w szeregowy strumień bitów.

Sygnał jest próbkowany z częstotliwością 44 100 Hz i rozdzielczością 16 bitów, co oznacza, że łącznie trzeba przetworzyć 2 × 44 100 × 16 = 1 411 200 bitów na sekundę.

Struktura kodu

Dwa 16-bitowe słowa odpowiadające każdej próbce są dzielone na bajt młodszy (LSB) i bajt starszy (MSB), z których każdy ma długość 8 bitów. Cztery takie bajty stanowią cyfrową reprezentację jednej chwili próbkowania, a każdy z tych 8-bitowych bajtów nazywany jest symbolem audio. Symbole audio pochodzące z sześciu kolejnych próbek są następnie łączone w jedną ramkę. Ramka ta zawiera zatem 32 symbole audio, z których każdy ma długość 8 bitów.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Niezbędna korekcja błędów

Można praktycznie wykluczyć, aby choć jedna płyta Audio CD została wytłoczona bez choćby kilku tysięcy uszkodzonych zagłębień spośród miliardów znajdujących się na jej powierzchni. Wystarczy, że podczas napylania odbijającej światło warstwy aluminium na powierzchnię płyty opadnie drobinka kurzu. Może ona sprawić, że kilkadziesiąt zagłębień przestanie odbijać światło, a tym samym nie będzie mogło zostać prawidłowo odczytanych.

Znaczne zniekształcenia dźwięku

Każdy błędnie odczytany bit powoduje zniekształcenie odtworzonych próbek sygnału audio. Jeżeli taki uszkodzony kod zostanie przekształcony przez przetwornik C/A w odtwarzaczu CD na sygnał analogowy, w sygnale wyjściowym mogą pojawić się bardzo krótkie, lecz bardzo strome impulsy. Każdy błędnie odczytany kod powoduje więc słyszalne trzaski podczas odtwarzania. Bez rozbudowanych układów korekcji błędów płyta Audio CD prawdopodobnie trzeszczałaby i strzelała jeszcze bardziej niż nawet najbardziej zniszczona analogowa płyta winylowa.

Cyfrowa korekcja błędów

W cyfrowym przetwarzaniu dźwięku można na szczęście zastosować dowolnie rozbudowane mechanizmy korekcji błędów. Trzeba jednak znaleźć kompromis między prawdopodobieństwem, że do przetwornika C/A mimo wszystko trafią błędne dane, a stopniem złożoności układów elektronicznych niezbędnych w urządzeniu odtwarzającym.

W systemie Audio CD zastosowano dwie techniki korekcji błędów:

- **Dodawanie bitów parzystości.** Bity te są wyznaczane na podstawie zawartości bajtów audio. Sprawdzana jest liczba bitów o wartości logicznej „0” i „1” w odpowiednio utworzonej macierzy. Za pomocą bitów parzystości liczba ta jest doprowadzana do wartości parzystej lub nieparzystej.
- **Kodowanie CIRC cyfrowego strumienia danych.** Skrót CIRC pochodzi od Cross-Interleaved Reed–Solomon Code. Na tym etapie kolejne bajty strumienia danych są w bardzo złożony sposób przeplatane. Ma to na celu rozproszenie błędów powstających w nośniku, tak aby uszkodzenie kolejnych bajtów nie spowodowało zniszczenia żadnego z bloków danych w stopniu uniemożliwiającym jego odtworzenie.

Dodawanie bitów parzystości Q

Łatwo zauważyć, że pojedynczy mechanizm kontroli oparty na bitach parzystości nie zapewnia stuprocentowej skuteczności. Mogłoby się bowiem zdarzyć, że błędnie odczytane zostaną dwa lub więcej bitów, a mimo to kontrola parzystości wykaże poprawną liczbę logicznych jedynek. Z tego powodu stosowane są dwa niezależne mechanizmy kontroli parzystości. Do cyfrowego strumienia danych wprowadzane są dwa rodzaje bitów parzystości:

- bity parzystości Q,
- bity parzystości P.

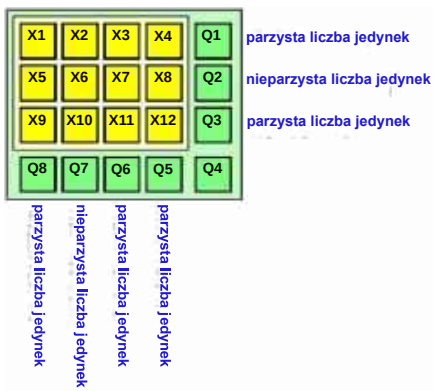
Bity parzystości Q są dodawane przed kodowaniem CIRC, natomiast bity parzystości P – po jego wykonaniu.

Kodowanie macierzowe i dodawanie bitów parzystości

Dodanie bitów parzystości Q stanowi pierwszy etap złożonego systemu korekcji błędów. Zasada tworzenia tych bitów jest dość prosta i została w uproszczony sposób przedstawiona na poniższym rysunku. Cyfrowe dane audio są rozmieszczane w macierzy złożonej z określonej liczby wierszy i kolumn. W każdym punkcie przecięcia wiersza i kolumny umieszczany jest jeden bit.

Na rysunku pokazano uproszczony przykład z bitami X1...X12, umieszczonymi w macierzy składającej się z trzech wierszy i czterech kolumn. Następnie do każdego wiersza i każdej kolumny dodawany jest bit parzystości Q (Q1...Q3 oraz Q5...Q8), tak aby liczba logicznych jedynek w każdym wierszu i każdej kolumnie była parzysta. Jeżeli na przykład w górnym wierszu, obejmującym bity X1...X4, tylko jeden bit ma wartość logicznej jedynki, wówczas bit parzystości Q1 również otrzyma wartość logicznej jedynki, dzięki czemu łączna liczba jedynek w tym wierszu stanie się parzysta.

Na końcu dodawany jest jeszcze bit parzystości Q4, który zapewnia, że również liczba logicznych jedynek w zbiorze bitów parzystości będzie parzysta.



Sposób tworzenia bajtu parzystości Q (© 2020 Jos Verstraten)

Dekodowanie w odtwarzaczu CD

W odtwarzaczu CD układy elektroniczne najpierw sprawdzają, czy liczba logicznych jedynek w bajtach parzystości jest parzysta. Jeżeli tak nie jest, oznacza to, że błąd wystąpił w samym bajcie parzystości i nie można zastosować opisanej metody korekcji błędów.

Jeżeli natomiast liczba logicznych jedynek jest parzysta, bajt parzystości uznawany jest za poprawny. Wówczas układ dekodujący odtwarza macierz i sprawdza, czy w każdym wierszu i każdej kolumnie znajduje się parzysta liczba logicznych jedynek. Jeśli warunek ten jest spełniony, dane zostają uznane za poprawne. Jeżeli jednak w którymś wierszu lub kolumnie liczba logicznych jedynek jest nieparzysta, układ może w prosty sposób ustalić, który bit został błędnie odczytany.

Załóżmy na przykład, jak pokazano na poprzednim rysunku, że w drugim wierszu i w drugiej kolumnie stwierdzono nieparzystą liczbę logicznych jedynek. Układ elektroniczny jednoznacznie wskazuje wtedy, że błędnie odczytany został bit X6. Bit ten może zostać poprawiony, a błąd zostaje usunięty.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Kodowanie CIRC

System wykorzystujący bajty parzystości działa bardzo dobrze, dopóki błędnie odczytanych zostanie tylko kilka bitów w obrębie bajtu. Ponieważ jednak bity zajmują na spiralnej ścieżce bardzo mało miejsca, w praktyce rzadko zdarza się, aby uszkodzeniu uległo jedynie kilka bitów. W przypadku uszkodzenia płyty Audio CD błędnie odczytywane są całe bajty, a niekiedy nawet całe próbki sygnału audio. W takich sytuacjach sam system parzystości nie jest już wystarczający.

Reed i Solomon

Już w 1960 roku Irving S. Reed i Gustave Solomon opisali metodę kodowania korekcyjnego, która wiele lat później została wykorzystana przez firmy Sony i Philips w standardzie Audio CD.

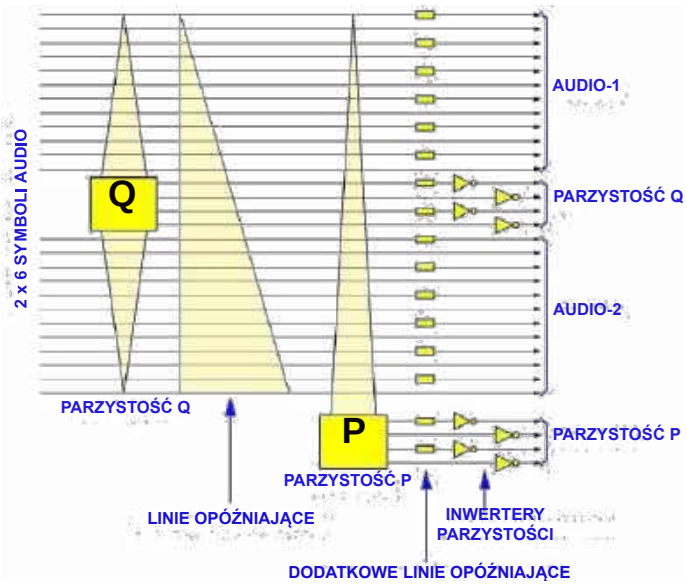
Prawdopodobieństwo błędnego odczytu całej 16-bitowej próbki audio można zmniejszyć, rozpraszając informacje zawarte w jej bajtach na dłuższym odcinku spiralnej ścieżki. Jeżeli nie da się tego osiągnąć przez zwiększenie długości poszczególnych bitów, można uzyskać ten efekt przez przeplatanie danych należących do kolejnych próbek, dzięki czemu informacje odpowiadające jednej próbce audio są zapisywane w znacznie oddalonych od siebie miejscach spiralnej ścieżki.

CIRC – przeplatany kod Reeda–Solomona

Wspomniani wcześniej matematycy opracowali metodę zapewniającą możliwie najlepszy kompromis między złożonością układów dekodujących w odtwarzaczu CD a skutecznością odzyskiwania danych uszkodzonych wskutek błędów odczytu. System ten nosi nazwę CIRC (ang. Cross-Interleaved Reed–Solomon Coding), a sposób jego działania po stronie kodowania, czyli podczas przygotowywania materiału do zapisu na płycie, przedstawiono schematycznie na poniższym rysunku.

Bajty audio oraz bajty parzystości Q są kierowane do układów opóźniających, przedstawionych schematycznie w postaci dużego trójkąta. Każdy bajt otrzymuje inne opóźnienie. W systemach cyfrowych nie stanowi to żadnego problemu. Wystarczy doprowadzić kolejne bajty do szeregowych rejestrów przesuwnych o odpowiednio dobranej liczbie komórek. Wszystkie rejestry są taktowane wspólnym sygnałem zegarowym. Jeżeli rejestr składa się z ośmiu komórek, bajt podany na jego wejście pojawi się na wyjściu po ośmiu okresach zegara. Oznacza to opóźnienie wynoszące osiem taktów.

W rezultacie na wyjściach rejestrów przesuwnych nadal znajdują się bajty audio i bajty parzystości Q, jednak nie pochodzą one już z tej samej ramki. Gdy bajty odpowiadające górnym próbkom opuściły już linię opóźniającą, bajty odpowiadające dolnym próbkom wciąż znajdują się w swoich rejestrach przesuwnych. Na wyjściach najdłuższych rejestrów pojawiają się więc bajty audio pochodzące z wcześniejszych próbek.



Schemat działania kodowania CIRC (© 2020 Jos Verstraten)

Dodawanie bitów parzystości P

Na przeplatanych bajtach wykonywany jest następnie drugi etap kontroli parzystości – P. Cztery wyznaczone bajty parzystości P są dołączane za ostatnim blokiem danych audio.

Skuteczność korekcji błędów
Dwa rodzaje błędów odczytu

Podczas odczytu płyty Audio CD mogą wystąpić dwa rodzaje błędów:

- błędy krótkotrwałe,
- błędy długotrwałe.

Krótkotrwałe błędy odczytu

Przeplatanie bajtów oraz ich zróżnicowane opóźnianie, dzięki czemu dane pochodzące z przemieszanych próbek trafiają do kolejnych bloków danych, doskonale sprawdza się przy korygowaniu niewielkich błędów obejmujących pojedyncze bity. Na podstawie informacji zawartych w bajtach parzystości P dekoder w odtwarzaczu CD może szybko wykryć błędne bity i skorygować ich wartości.

Długotrwałe błędy odczytu

Większe uszkodzenia powierzchni płyty Audio CD powodują, że kilka kolejnych bloków danych staje się całkowicie nieczytelnych. W takiej sytuacji wykorzystuje się fakt, że dane należące do jednej próbki zostały wcześniej przeplecione i rozproszone pomiędzy wiele kolejnych bloków danych. Dzięki temu dekoder w odtwarzaczu CD niemal zawsze odnajdzie w tych blokach przynajmniej część nieuszkodzonych danych należących do dwóch sąsiednich próbek audio. Na podstawie tych informacji oraz bajtów parzystości Q podejmowana jest

eprasa.pl 17a47aa7e2

próba odtworzenia jak największej liczby brakujących bajtów. Jeżeli nie jest to możliwe, uruchamiany jest algorytm interpolacji, w którym brakujące dane są wyznaczane jako wartość pośrednia między poprzednią a następną próbką.

Skuteczność kodowania CIRC

Kodowanie CIRC umożliwia skorygowanie błędów obejmujących do 4000 bitów przy wykorzystaniu samych mechanizmów korekcji błędów. Po zastosowaniu interpolacji możliwe jest zamaskowanie uszkodzeń obejmujących nawet 12 000 bitów. W przypadku płyty Audio CD odpowiada to długości ścieżki wynoszącej około 7,5 mm.

Bajt C&D

Skrót C&D oznacza Control and Display (sterowanie i wyświetlanie). Ten jeden bajt przypadający na każdą ramkę zawiera wiele informacji o zawartości płyty CD, danych czasowych, a nawet danych alfanumerycznych, które mogą być wyświetlane na ekranie odtwarzacza CD wyposażonego w wyświetlacz.

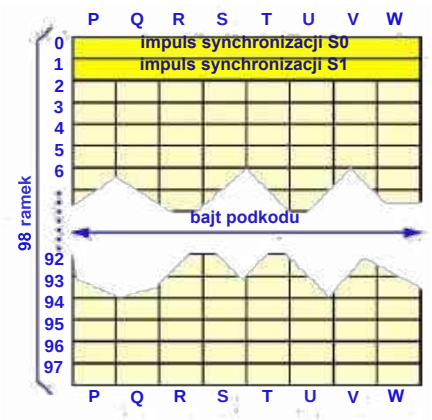
Wszystkie te informacje z łatwością mieszczą się w jednym bajcie każdej ramki. Należy pamiętać, że na płycie zapisywanych jest 7350 ramek na sekundę, a więc z taką samą szybkością odczytywane jest również 7350 bajtów C&D na sekundę.

Poszczególne bajty C&D nie są jednak traktowane oddzielnie, lecz grupowane w tzw. bloki danych subkodów. Każdy taki blok składa się z 98 bajtów C&D pochodzących z 98 kolejnych ramek. Oznacza to, że w ciągu sekundy odczytywanych jest 7350 ÷ 98 = 75 bloków danych.

Struktura bloków danych

Budowę bloków danych przedstawiono na poniższym rysunku. Bajty są zapisywane w macierzy złożonej z 8 kolumn i 98 wierszy. Dwa pierwsze wiersze, a więc dwa pierwsze bajty bloku, zawierają impulsy synchronizujące S0 i S1. Mają one unikatową strukturę, dzięki czemu układy elektroniczne odtwarzacza CD mogą je łatwo rozpoznać.

Pozostałe dane są odczytywane wierszami. Każdy blok danych zawiera osiem słów, z których każde ma długość 96 bitów. Słowa te oznaczono literami P, Q, R, S, T, U, V i W. Spośród nich największe znaczenie mają słowa P i Q.



Struktura bloku danych subkodów złożonego z 98 bajtów C&D (© 2020 Jos Verstraten)

Słowo P

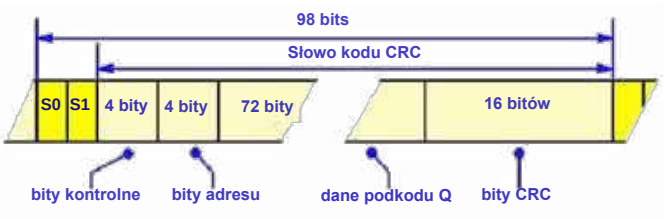
Słowo P zawiera informacje, dzięki którym odtwarzacz CD może rozpoznać początek nowego utworu lub kolejnego fragmentu utworu muzyki klasycznej. Służy do tego tzw. znacznik początku (start flag), tworzony przez zapisywanie przez dwie sekundy słów P wypełnionych wyłącznie logicznymi jedynkami. Dzięki temu mikrokontroler odtwarzacza CD może bardzo szybko przechodzić od jednego znacznika początku do następnego. Ponieważ znacznik ten trwa stosunkowo długo, nie ma potrzeby odczytywania wszystkich zwojów spiralnej ścieżki. Głowica optyczna może więc szybko przemieszczać się po powierzchni płyty, ponieważ znacznik początku obejmuje wiele zwojów spirali.

Drugą funkcją słowa P jest informowanie układów odtwarzacza o zakończeniu płyty. W końcowej części spiralnej ścieżki słowo P jest modulowane z częstotliwością 2 Hz naprzemiennymi logicznymi zerami i jedynkami. Mikrokontroler odtwarzacza rozpoznaje ten kod i podejmuje odpowiednie działania: kończy odczyt płyty, rozpoczyna jej ponowne odtwarzanie, jeśli wybrano funkcję REPLAY, lub – w przypadku zmieniarki płyt CD – przełącza na następną płytę.

Słowo Q

Strukturę słowa Q przedstawiono na rysunku. Pierwsze dwa bity należą do sekwencji synchronizacyjnych S0 i S1 i nie stanowią części właściwej struktury słowa Q. Następnie występują cztery grupy bitów o następującym znaczeniu:

- **Bity sterujące (Control bits).** Te cztery bity zawierają informacje o właściwościach płyty kompaktowej. Znaczenie poszczególnych bitów przedstawiono w tabeli na poniższym rysunku. Wynika z niej, że już na etapie opracowywania standardu przewidziano możliwość pojawienia się systemów czterokanałowych, zastosowania zabezpieczeń przed kopiowaniem w odtwarzaczach CD, a także wykorzystania znanej z techniki płyt winylowych preemfazy, poprawiającej odtwarzanie wysokich częstotliwości.
- **Bity adresowe (Address bits).** Zgodnie z kodowaniem przedstawionym w tabeli, zawartość czterech bitów adresowych określa tryb pracy słowa Q. Tryb ten informuje, jakie znaczenie mają bity danych Q.



Struktura słowa Q (© 2020 Jos Verstraten)

BITY STERUJĄCE				
BIT 1	BIT 2	BIT 3	BIT 4	ZNACZENIE
L				AUDIO-CD JEST STEREOFONICZNE
H				AUDIO-CD JEST CZTEROKANAŁOWE
		L		KOPIOWANIE DOZWOLONE
		H		KOPIOWANIE ZABRONIONE
			L	BRAK PRE-EMFAZY
			H	PRE-EMFAZA WYSTĘPUJE

BITY ADRESU				
BIT 1	BIT 2	BIT 3	BIT 4	ZNACZENIE
L	L	L	H	NUMER TRYBU 1
L	L	H	L	NUMER TRYBU 2
L	L	H	H	NUMER TRYBU 3

Znaczenie bitów sterujących i bitów adresowych (© 2020 Jos Verstraten)

Tryby pracy słowa Q

Trzy tryby definiowane przez bity adresowe mają następujące znaczenie:

eprasa.pl 17a47aa7e2

- **TRYB 1.** W trybie 1 72 bity danych Q zawierają informacje o czasie rozpoczęcia, czasie trwania oraz numerze odtwarzanego utworu. Dzięki tym informacjom odtwarzacz CD może bardzo szybko wybrać żądany utwór. Ponadto w danych Q prowadzony jest licznik czasu wskazujący całkowity czas odtwarzania płyty Audio CD.
- **TRYB 2.** W trybie 2 dane Q zawierają tzw. Disc Catalogue Number (DCN) – numer katalogowy płyty, z którego można odczytać informacje, takie jak data wydania, producent czy wykonawca. Numer ten mieści się w 52 bitach, dzięki czemu w słowie pozostaje wystarczająco dużo miejsca na skopiowanie licznika czasu z trybu 1.
- **TRYB 3.** W trybie 3 dane Q zawierają tzw. International Standard Recording Code (ISRC). Kod ten składa się z pięciu znaków alfanumerycznych i siedmiu cyfr. ISRC jest jednoznacznym i trwałym identyfikatorem konkretnego nagrania i może być zapisany w postaci cyfrowego „odcisku palca" w każdej publikacji tego nagrania. Umożliwia to automatyczną identyfikację nagrań, na przykład na potrzeby rozliczania tantiem. Kod ISRC jest przypisany do samego nagrania, a nie do nośnika, na którym zostało ono wydane. To samo nagranie opublikowane na płycie Audio CD i na płycie DVD-Audio ma więc identyczny kod ISRC.

Modulacja EFM (Eight-to-Fourteen Modulation)

Jak już wspomniano, głowica optyczna nie generuje sygnału o stałej amplitudzie. Jego amplituda zależy od długości zagłębień. Oznacza to, że nie można wyznaczyć wartości logicznej sygnału („0" lub „1") na podstawie jego amplitudy. Z tego powodu przyjęto, że logiczną jedynkę reprezentują przejścia między zagłębieniami i obszarami między nimi, natomiast zarówno zagłębienia, jak i obszary między nimi odpowiadają logicznemu zeru. Wystarczy więc wykrywać przejścia w sygnale, aby odzyskać zapisany kod cyfrowy, co można zrealizować w stosunkowo prosty sposób za pomocą komparatora.

Zwiększenie częstotliwości zegara

Opisany sposób reprezentowania logicznej jedynki przez przejścia między zagłębieniami ma jeszcze jedną zaletę. Krawędź przejścia jest znacznie węższa niż samo zagłębienie. Oznacza to, że logiczna jedynka nie musi być już reprezentowana przez zagłębienie o minimalnej długości 0,8 μm, lecz może odpowiadać znacznie krótszemu zdarzeniu. Wykorzystano to, zwiększając częstotliwość zegara używanego podczas zapisu danych na płycie Audio CD do 4,3218 MHz.

Jak wiadomo, przetwornik A/C generuje w ciągu sekundy $2 \times 16 \times 44\,100 = 1\,411\,200$ bitów. Oznacza to, że częstotliwość strumienia danych audio wynosi 1,4112 MHz. Częstotliwość zegara można więc zwiększyć około trzykrotnie, co mogłoby sugerować, że na płycie kompaktowej zmieści się trzykrotnie więcej informacji. Jak za chwilę zobaczymy, w rzeczywistości tak nie jest.

Osiem bitów to za mało

Wszystkie 32 bajty należące do jednej ramki mają długość 8 bitów. Mogą więc przyjmować dowolną z 256 możliwych kombinacji. Oznacza to, że wiele bajtów będzie zawierało dwie lub więcej kolejnych logicznych jedynek. Jeżeli jednak przyjmiemy, że logiczna jedynka jest reprezentowana przez przejście między zagłębieniem a obszarem między zagłębieniami, z wyższej częstotliwości zegara będzie można skorzystać tylko wtedy, gdy dwie logiczne jedynki nie będą występowały bezpośrednio po sobie. Dwie kolejne jedynki musiałyby zostać przedstawione jako dwa przejścia, czyli sekwencja: obszar między zagłębieniami – zagłębienie – obszar między zagłębieniami. W takim przypadku jeden bit ponownie zajmowałby długość zapisu równą 0,8 μm, a korzyść wynikająca z bardzo małej szerokości przejścia oraz możliwości zastosowania wyższej częstotliwości zegara zostałaby utracona.

Z ośmiu do czternastu

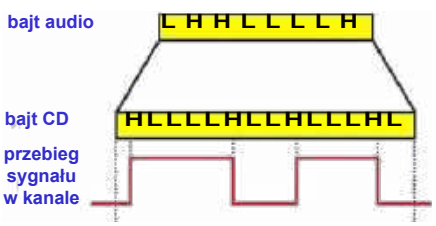
Aby rozwiązać ten problem, opracowano nowy sposób kodowania, w którym nigdy nie występują dwie kolejne logiczne jedynki. Ponadto pomiędzy dwiema jedynkami zawsze znajdują się co najmniej dwa logiczne zera, a liczba kolejnych zer nigdy nie przekracza dziesięciu.

Oznacza to, że dwie logiczne jedynki są zawsze oddzielone co najmniej dwoma logicznymi zerami, dzięki czemu sekwencję 1-0-0-1 można przedstawić za pomocą pojedynczego zagłębienia o minimalnej długości 0,8 μm. Taki sposób kodowania pozwala bez problemu zapisywać dane z częstotliwością 4,3218 MHz.

Ograniczenie do maksymalnie dziesięciu kolejnych logicznych zer wynika z wymagań układu synchronizacji w odtwarzaczu CD. Przejścia odpowiadające logicznym jedynkom są bowiem wykorzystywane również do synchronizacji generatora zegarowego odtwarzacza z sygnałem zapisanym na płycie. Gdyby przez zbyt długi czas nie wystąpiło żadne przejście, układ synchronizacji mógłby utracić synchronizację.

Pozostaje jeszcze pytanie, jak długie powinno być nowe słowo kodowe. Obliczono, że spośród 16 384 kombinacji możliwych dla słowa 14-bitowego aż 267 spełnia wszystkie trzy wymienione warunki. To w zupełności wystarcza do odwzorowania 256 kombinacji występujących w 8-bitowym bajcie. Dlatego każdy 8-bitowy bajt danych jest przekształcany w odpowiednie 14-bitowe słowo kodowe. Na potrzeby tej konwersji opracowano znormalizowaną tablicę kodowania, dzięki czemu we wszystkich studiach przygotowujących materiał do zapisu na płytach Audio CD stosowany jest identyczny sposób kodowania.

Ten etap kodowania nosi nazwę Eight-to-Fourteen Modulation (EFM). Na poniższym rysunku przedstawiono zależność między bajtem danych audio, odpowiadającym mu 14-bitowym słowem kodowym oraz wzorem zagłębień i obszarów między nimi wytłoczonych na płycie Audio CD.



Zależność między bajtem danych audio, słowem kodowym EFM oraz zagłębieniami i obszarami między nimi na spiralnej ścieżce (© 2020 Jos Verstraten)

Dodawanie bitów łączących

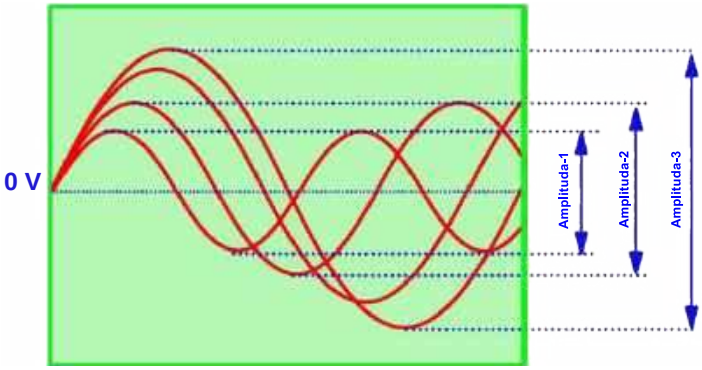
Jak już wspomniano, głowica optyczna nie generuje idealnego sygnału cyfrowego, lecz przebieg o kształcie zbliżonym do sinusoidalnego, którego amplituda zależy od długości

eprasa.pl 17a47aa7e2

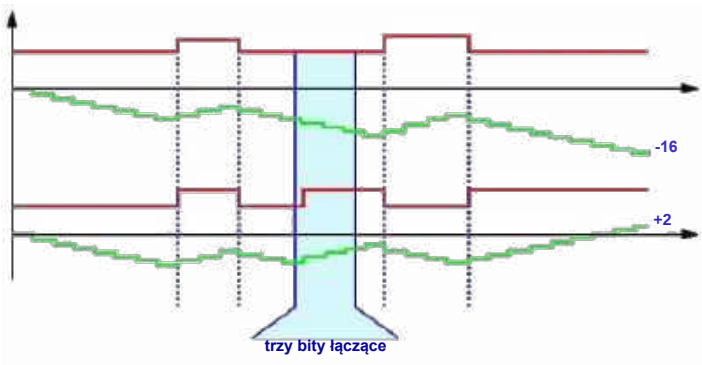
zagłębień. Na poniższym rysunku pokazano typowy przebieg widoczny na ekranie oscyloskopu podczas pomiaru napięcia wyjściowego głowicy optycznej z wyzwalaniem ustawionym na poziom 0 V.

Ponieważ układ zagłębień i obszarów między nimi na płycie Audio CD jest całkowicie losowy, amplituda odtworzonego sygnału również zmienia się w sposób losowy, przyjmując wartości od minimalnej do maksymalnej. W rezultacie sygnał nie jest symetryczny względem poziomu 0 V. Losowa sekwencja zagłębień i obszarów między nimi, o dodatkowo losowych długościach, powoduje, że wartość średnia sygnału w jednej chwili może być nieco dodatnia, a chwilę później nieco ujemna. Oznacza to pojawienie się składowej stałej, nazywanej offsetem sygnału CD (CD offset).

Zjawisko to przedstawiono na górnym wykresie poniższego rysunku. W pokazanym przykładzie odczytywane są dwa bajty CD zawierające więcej stanów niskich niż wysokich. W rezultacie średnia wartość składowej stałej sygnału z głowicy odczytującej przyjmuje dość dużą wartość ujemną.



Sygnał wyjściowy głowicy optycznej na ekranie oscyloskopu (© 2020 Jos Verstraten)



Powstawanie składowej stałej w sygnale wyjściowym głowicy optycznej (u góry) oraz jej kompensacja przez dodanie trzech bitów łączących (u dołu) (© 2020 Jos Verstraten)

Skutki występowania składowej stałej

Obecność składowej stałej jest zjawiskiem bardzo niepożądanym. Może ona bowiem powodować błędy czasowe w układzie przekształcającym napięcie wyjściowe głowicy optycznej w poprawny sygnał cyfrowy. Ponieważ zbocza narastające i opadające tego sygnału są stosunkowo łagodne, chwila przełączania komparatora staje się w pewnym stopniu zależna od wartości składowej stałej. Jest to zjawisko zdecydowanie niepożądane, ponieważ może prowadzić do zniekształcenia proporcji między czasem trwania stanów logicznych „0” i „1”.

Bity łączące i kompensacja DSV

Aby zminimalizować składową stałą wynikającą z Digital Sum Value (DSV) zakodowanego sygnału, do każdego 14-bitowego słowa kodowego dołączane są trzy dodatkowe bity. Nazywa się je bitami łączącymi (packing bits). Metoda ta określana jest jako kompensacja DSV.

Jak pokazano na dolnym wykresie poprzedniego rysunku, wartości tych trzech bitów są dobierane w taki sposób, aby wartość DSV była możliwie najmniejsza. Dzięki temu analogowy sygnał wyjściowy głowicy optycznej praktycznie nie zawiera składowej stałej, a jego wartość średnia pozostaje możliwie bliska 0 V.

W przedstawionym przykładzie trzy dodatkowe bity powodują odwrócenie polaryzacji drugiej ramki. Obszary między zagłębieniami stają się zagłębieniami, a zagłębienia – obszarami między zagłębieniami. Ponieważ zarówno zagłębienia, jak i obszary między nimi odpowiadają stanowi logicznemu „0”, nie wpływa to na zawartość zapisanych danych.

Skutkiem tego odwrócenia jest natomiast to, że średnia wartość sygnału, która po odczytaniu pierwszej ramki była wyraźnie ujemna, ponownie zbliża się do zera.

Druga funkcja bitów łączących

Jak już wspomniano, w strumieniu danych nie mogą wystąpić dwie kolejne logiczne jedynki. Może się jednak zdarzyć, że jedno słowo kodowe kończy się logiczną jedynką, a następne również rozpoczyna się logiczną jedynką. W takiej sytuacji trzy bity łączące przyjmują postać 0-0-0 lub 0-0-1, dzięki czemu obie logiczne jedynki są zawsze rozdzielone co najmniej dwoma logicznymi zerami. Trzeci bit jest jednocześnie dobierany tak, aby dodatkowo minimalizować wartość DSV.

Bajt synchronizacji (SYNC)
Dwie funkcje

Bajt SYNC, oznaczający początek nowej ramki, pełni dwie funkcje. Po pierwsze, jego wykrycie informuje układ sterujący odtwarzacza o rozpoczęciu nowej ramki. Dzięki temu możliwe jest oddzielenie danych subkodów od danych audio oraz podział kolejnych danych na 12 bajtów audio, 4 bajty parzystości Q, następne 12 bajtów audio i na końcu 4 bajty parzystości P. Wszystkie te bajty są następnie kierowane do odpowiednich układów dekodujących.

Drugą funkcją bajtu SYNC jest – zgodnie z jego nazwą – synchronizacja lokalnego generatora zegarowego z zegarem danych zapisanych na płycie Audio CD. W praktyce płyta zawiera jednoznaczną informację jedynie o przejściach między zagłębieniami i obszarami między nimi, odpowiadających logicznym jedynkom. Odcinki odpowiadające logicznym zerom nie są wyznaczane bezpośrednio i muszą zostać odtworzone przez układy odtwarzacza na podstawie odstępów między kolejnymi przejściami. Aby zrobić to bezbłędnie, konieczne jest możliwie najdokładniejsze odtworzenie częstotliwości zegara, z jaką zapisano dane na płycie.

eprasa.pl 17a47aa7e2

Struktura bajtu SYNC

Bajt SYNC jako jedyny zajmuje 27 okresów zegara, dzięki czemu może zostać łatwo rozpoznany przez układy odtwarzacza CD. Jak pokazano na poniższym rysunku, zawiera on 24 bity informacji, do których dołączane są trzy bity łączące służące kompensacji DSV. Ponieważ cały bajt zajmuje dokładnie 27 okresów zegara, układ odtwarzacza może na jego podstawie wyznaczyć częstotliwość zegara danych odczytywanych z płyty i w razie potrzeby skorygować częstotliwość lokalnego generatora za pomocą układu PLL.

Podsumowanie 136 µs jednej ramki

Ponieważ struktura cyfrowego zapisu na powierzchni płyty Audio CD jest dość złożona, na zakończenie przypomnijmy najważniejsze informacje.

Jedna ramka danych na płycie Audio CD zawiera:

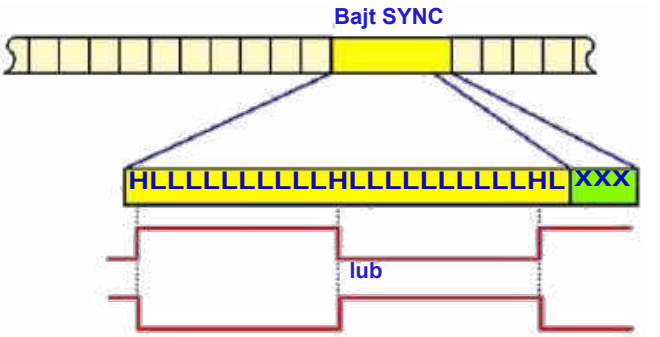
- 27 okresów zegara – bajt synchronizacji SYNC,
- 17 okresów zegara – bajt C&D,
- 204 okresy zegara – pierwszych 12 bajtów audio,
- 68 okresów zegara – bajty parzystości Q,
- 204 okresy zegara – drugich 12 bajtów audio,
- 68 okresów zegara – bajty parzystości P.

Łącznie jedna ramka zajmuje 588 okresów zegara. Częstotliwość zegara kanałowego CD wynosi 4,3218 MHz, a więc okres zegara ma długość około 231 ns. Na tej podstawie można obliczyć, że czas trwania jednej ramki wynosi 136 µs.

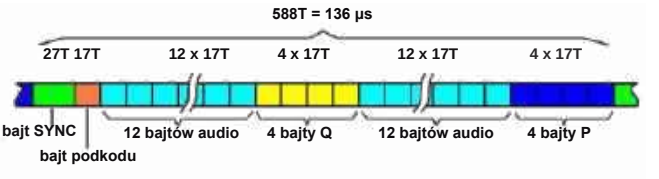
Dowodzi to, że na płycie zapisywanych jest dokładnie 7350 ramek na sekundę.

Podsumowanie graficzne

Na zakończenie tego dość złożonego omówienia rysunek przedstawia szczegółową strukturę jednej ramki zapisanej na spiralnej ścieżce płyty Audio CD. ■



Struktura bajtu synchronizacji (SYNC) (© 2020 Jos Verstraten)

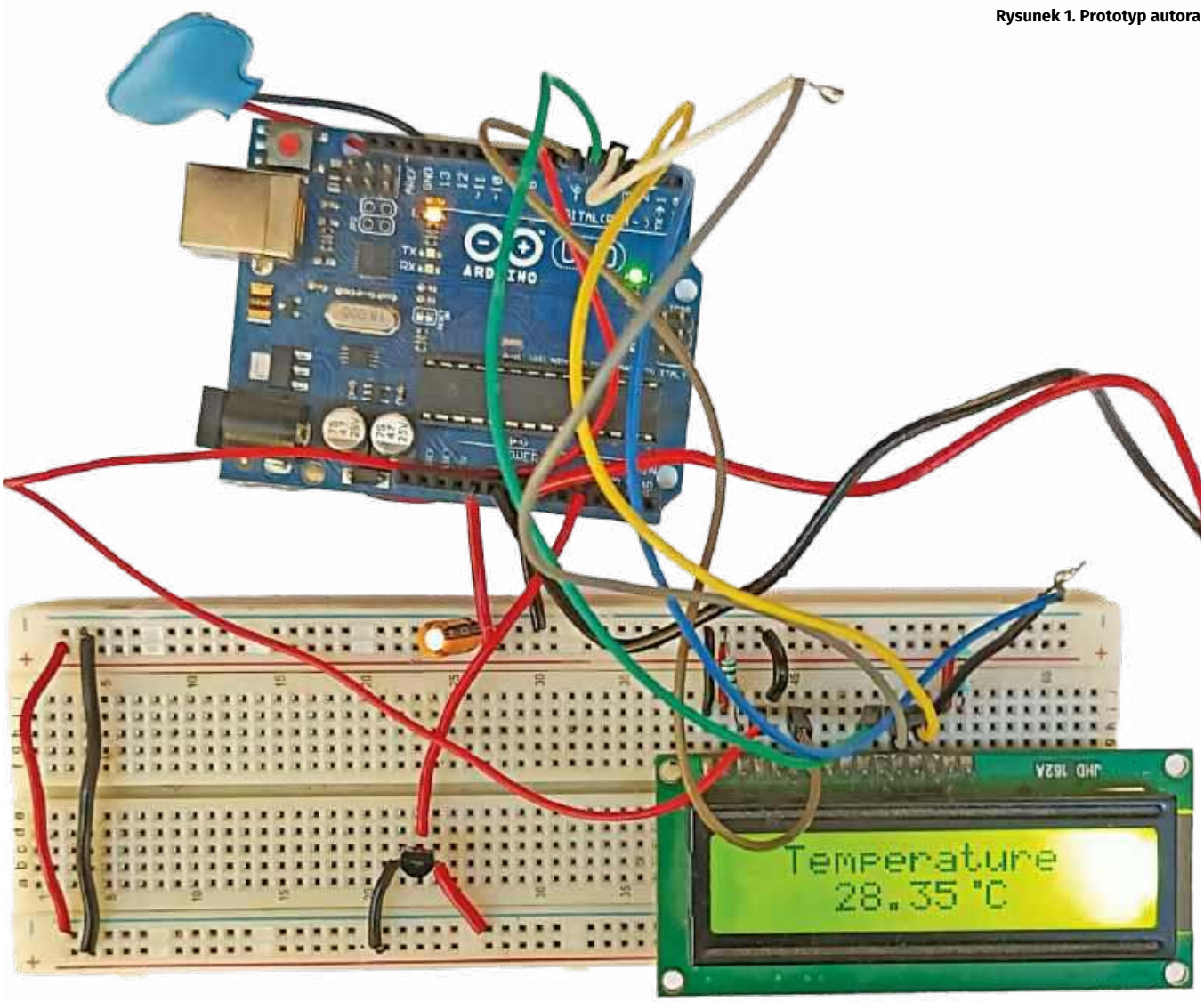


Szczegółowa struktura jednej ramki danych (© 2020 Jos Verstraten)

Jos Verstraten

REKLAMA

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 1. Prototyp autora

Termometr cyfrowy z modułem Arduino Uno

Pomiar temperatury wykonuje się od niepamiętnych czasów. Do jego dokładnego przeprowadzania służą elektroniczne termometry cyfrowe. W przeciwieństwie do tradycyjnych termometrów cieczowych, wykorzystujących rtęć lub inne ciecze, termometry cyfrowe wykorzystują czujniki elektroniczne.

Termometry cyfrowe są powszechnie stosowane w placówkach ochrony zdrowia do pomiaru temperatury ciała pacjentów. Są również nieodzowne w przemyśle spożywczym, gdzie służą do kontroli temperatury podczas przygotowywania i przechowywania żywności. Wykorzystuje się je także do monitorowania warunków środowiskowych.

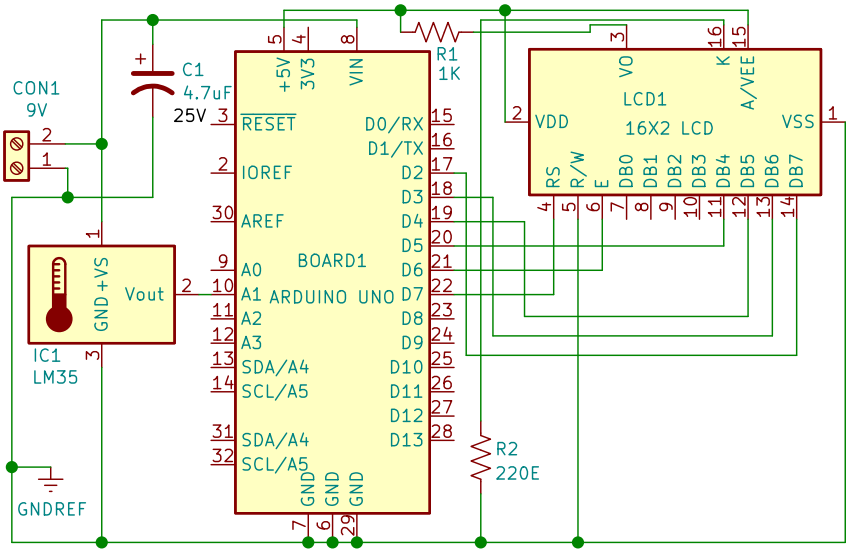
Termometry cyfrowe łączą dużą dokładność z prostotą obsługi, dlatego znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach. Na **rysunku 1** pokazano autorski prototyp termometru cyfrowego zmontowany na płytce stykowej.

Schemat i działanie układu

Schemat ideowy układu przedstawiono na **rysunku 2**. Termometr składa się z modułu Arduino Uno (BOARD1), czujnika temperatury LM35 (IC1), wyświetlacza LCD 16×2 (LCD1) oraz kilku elementów pomocniczych. Aby uruchomić termometr, wystarczy podłączyć do modułu Arduino baterię lub zasilacz o napięciu 9 V.

LM35 jest analogowym czujnikiem temperatury, którego napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do temperatury. Moduł Arduino

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 2. Schemat układu

Wykaz elementów:

Półprzewodniki:
IC1: czujnik temperatury LM35

Rezystory: (wszystkie węglowe, 1/4 W, ±5%)
R1: 1 kΩ
R2: 220 Ω

Kondensatory:
C1: elektrolityczny 4,7 μF / 25 V

Pozostałe:
BOARD1: moduł Arduino Uno
LCD1: wyświetlacz znakowy LCD 16×2
CON1: 2-pinowe złącze zasilania
przewody połączeniowe (15 szt.)
bateria lub zasilacz napięcia stałego 9 V

mierzy to napięcie i obliczoną wartość temperatury wyświetla na wyświetlaczu LCD. Napięcie wyjściowe czujnika zmienia się o 10 mV na każdy 1°C. Oznacza to, że przy napięciu wyjściowym równym 250 mV wskazywana temperatura wynosi około 25°C.

Przypis redaktora: Czujnik LM35 został obszernie omówiony na łamach „Elektroniki dla Wszystkich" w numerze 2/2025.

Moduł Arduino odczytuje napięcie z wyjścia czujnika na wejściu analogowym A1. Wbudowany przetwornik analogowo-cyfrowy przekształca zmierzone napięcie na postać cyfrową, na podstawie której program oblicza bieżącą temperaturę. Następnie wynik jest wyświetlany na wyświetlaczu LCD.

W opisywanym termometrze funkcję układu sterującego pełni moduł Arduino Uno. Jest to uniwersalna platforma sprzętowa typu open source przeznaczona do nauki programowania i budowy prototypów urządzeń elektronicznych. Moduł Arduino Uno jest oparty na mikrokontrolerze z rodziny ATmega.

W systemach wbudowanych powszechnie stosuje się znakowe wyświetlacze LCD 16×2, ponieważ są tanie, łatwo dostępne, niewielkie i proste w obsłudze. Pole wyświetlacza składa się z dwóch wierszy po 16 znaków. Każdy znak jest tworzony na matrycy o wymiarach 5×8 pikseli. Wyświetlacz jest podłączany za pomocą 16 wyprowadzeń, obejmujących 8 linii danych (D0...D7), 3 linie sterujące (RS, R/W i EN) oraz pozostałe wyprowadzenia służące do zasilania, podświetlenia i regulacji kontrastu.

Przejdźmy teraz do opisu programu. W kodzie źródłowym dołączono bibliotekę obsługującą wyświetlacz LCD. Następnie zdefiniowano numery pinów linii sterujących wyświetlaczem oraz wejścia analogowego, do którego podłączono czujnik temperatury. Napięcie z wyjścia czujnika jest odczytywane przez przetwornik analogowo-cyfrowy modułu Arduino za pomocą funkcji `analogRead()`, a uzyskana wartość zostaje zapisana w zmiennej programu. Następnie jest ona przeliczana na temperaturę zgodnie z odpowiednim wzorem. Fragment kodu źródłowego przedstawiono na **rysunku 3**.

```
Thermometer §
LiquidCrystal lcd(7,6,5,4,3,2);
#define sensor A1
byte degree[8] =
                {
                  0b00011,
                  0b00011,
                  0b00000,
                  0b00000,
                  0b00000,
                  0b00000,
                  0b00000,
                  0b00000
                };
void setup()
{
  lcd.begin(16,2);
  lcd.createChar(1, degree);
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("    Digital     ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("  Thermometer   ");
  delay(4000);
  lcd.clear();
  lcd.print(" electronicsforu  ");
```

Rysunek 3. Fragment kodu źródłowego programu

Montaż i uruchomienie

Najpierw należy wybrać typ modułu Arduino oraz numer portu, a następnie wgrać do niego program Thermometer.ino. Kolejnym krokiem jest zmontowanie układu na płytce stykowej lub drukowanej. Połączenia należy wykonać zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 2.

Wyświetlacz LCD 16×2 jest podłączony bezpośrednio do modułu Arduino Uno i pracuje w trybie 4-bitowym. Linie RS, E, D4, D5, D6 i D7 wyświetlacza są połączone odpowiednio z pinami D7, D6, D5, D4, D3 i D2 modułu Arduino. Wyjście analogowe czujnika temperatury LM35 (10 mV/°C) jest podłączone do wejścia analogowego A1. Do modułu Arduino należy również podłączyć baterię lub zasilacz o napięciu 9 V. Po wykonaniu tych czynności termometr jest gotowy do pracy. ■

Suresh Chandra Dwivedi

Materiał filmowy do artykułu:
https://youtu.be/BEjldhnIppk

Ten artykuł był wcześniej opublikowany na łamach „EFY", maj 2024 (efymag.com)

REKLAMA

Znajdziesz nas również na Facebooku:
facebook.com/ElportalPL

eprasa.pl 17a47aa7e2

System monitorowania warunków uprawy pszenicy

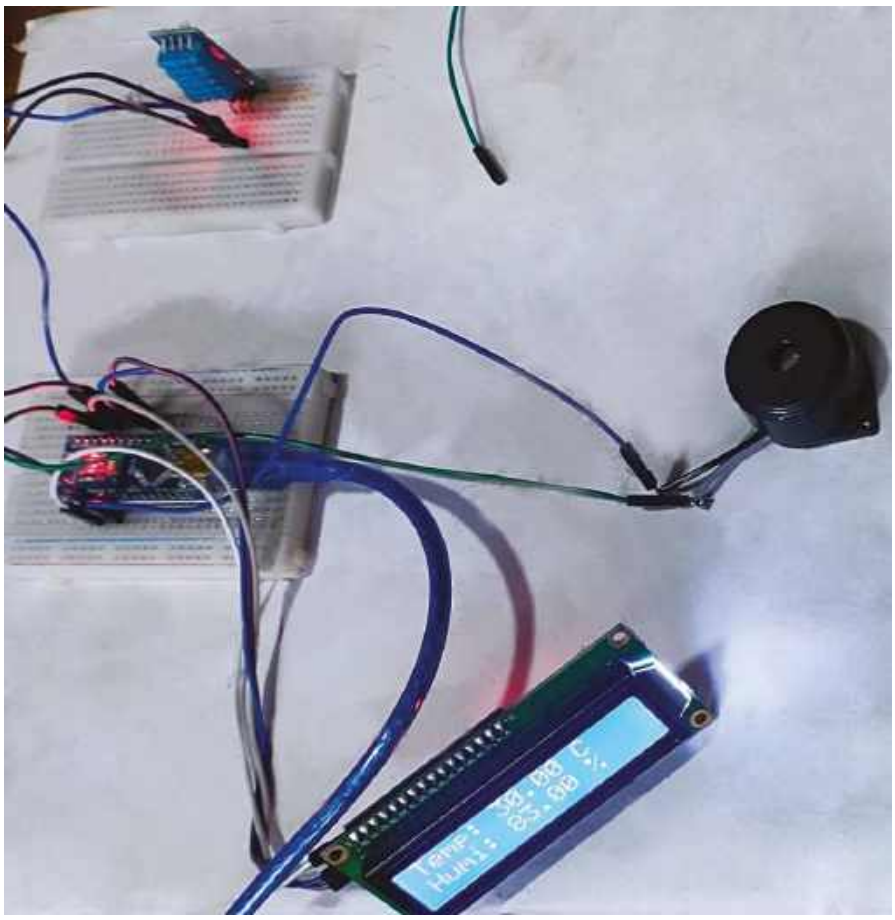
Pszenica należy w wielu krajach do podstawowych roślin uprawnych. Aby uzyskać wysokie plony, konieczne jest monitorowanie warunków środowiskowych, przede wszystkim temperatury i wilgotności. Najkorzystniejsza temperatura kiełkowania nasion pszenicy wynosi około +20°C...+25°C. Długotrwałe lub intensywne opady po siewie mogą prowadzić do nadmiernego uwilgotnienia gleby, utrudniać kiełkowanie oraz sprzyjać rozwojowi chorób grzybowych siewek.

W fazie kłoszenia i kwitnienia zarówno susza, jak i skrajne wahania temperatury mogą niekorzystnie wpływać na rozwój roślin. Z kolei wysoka wilgotność powietrza, w połączeniu z umiarkowaną temperaturą, sprzyja rozwojowi rdzy zbożowej i innych chorób grzybowych. W okresie dojrzewania ziarna korzystne są umiarkowane temperatury, około +14°C...+15°C, które sprzyjają prawidłowemu przebiegowi tego procesu.

Z myślą o monitorowaniu tych parametrów opracowano przedstawiony projekt. Jego zadaniem jest ciągły pomiar temperatury i wilgotności oraz dostarczanie informacji ułatwiających ocenę warunków uprawy pszenicy.

Przypis redaktora: Trudno sobie wyobrazić sterowanie temperaturą na rozległym polu pszenicy. Projekt znakomicie nadaje się natomiast do monitorowania warunków środowiskowych panujących na uprawach. Może być również przydatny do monitorowania warunków na działce, w przydomowym ogródku lub w szklarni.

Prototyp przedstawiony na **rysunku 1** jest wstępną konstrukcją autora. Podzespoły niezbędne do wykonania projektu zestawiono w liście elementów.



Rysunek 1. Prototyp autora

Schemat i działanie układu

Schemat układu przedstawiono na **rysunku 2**. Do wykonania prototypu wykorzystano moduł Arduino Nano (MOD1), wyświetlacz LCD z interfejsem I²C (MOD2), czujnik temperatury i wilgotności DHT11 (S1), brzęczyk piezoelektryczny oraz pozostałe elementy wymienione w liście elementów.

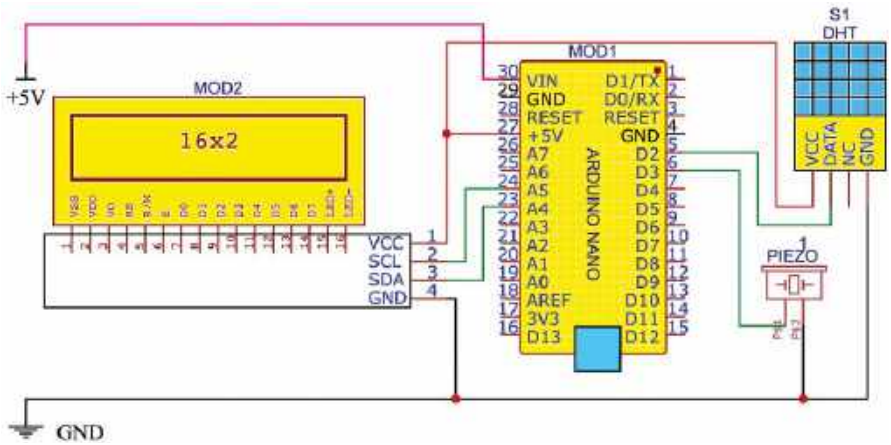
Centralnym elementem układu jest moduł Arduino Nano, który odczytuje wyniki pomiarów z czujnika DHT11, steruje wyświetlaczem LCD oraz brzęczykiem. Brzęczyk sygnalizuje przekroczenie temperatury +25°C. Wyświetlacz prezentuje aktualne wartości temperatury i wilgotności. Wyniki pomiarów są przesyłane z czujnika DHT11 do modułu Arduino Nano. Projekt można łatwo rozbudować, na przykład o moduł ESP8266 lub ESP32, co umożliwi zdalne monitorowanie temperatury i wilgotności.

Wyświetlacz LCD z interfejsem I²C (MOD2) składa się ze standardowego znakowego wyświetlacza LCD opartego na sterowniku HD44780 oraz adaptera I²C/LCD. Wyświetlacze znakowe dobrze sprawdzają się do prezentowania informacji tekstowych. Przykładowo wyświetlacz 16×2 może wyświetlać jednocześnie dwa wiersze po 16 znaków. Adapter I²C/LCD wykorzystuje 8-bitowy ekspander wejść/wyjść PCF8574, który zamienia dane przesyłane magistralą I²C z modułu Arduino na sygnały równoległe wymagane przez sterownik wyświetlacza.

Oprogramowanie

Oprogramowanie projektu napisano w środowisku Arduino IDE w wersji 1.8.19. Wyprowadzenie danych czujnika temperatury i wilgotności DHT11 jest dołączone do pinu D2 modułu Arduino Nano, co umożliwia odczyt temperatury i wilgotności otoczenia. Brzęczyk piezoelektryczny, sterowany

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 2. Schemat układu

```
void loop() {
  float temp = dht.getTemperature();
  float humi = dht.getHumidity();
  if (temp > 25)
  {
    digitalWrite(buzzerPin,HIGH);
  }
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Temp: ");
  lcd.print(temp);
  lcd.print(" C");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Humi: ");
  lcd.print(humi);
  lcd.print(" %");
  delay(2000);
}
```

Rysunek 3. Fragment kodu źródłowego z pętlą główną

Wykaz elementów:

Moduł Arduino Nano (MOD1)

Wyświetlacz LCD RG1602A z adapterem I²C (MOD2)

Czujnik temperatury i wilgotności DHT11 (S1)

Brzęczyk piezoelektryczny (P1)

Zasilacz napięcia stałego 5 V

z pinu D3, sygnalizuje przekroczenie temperatury +25°C.

W pętli głównej programu odczytywane są wyniki pomiarów z czujnika DHT11, aktualizowane są informacje wyświetlane na ekranie LCD oraz sprawdzane jest przekroczenie progu alarmowego. Program zapisuje się jako szkic Arduino z rozszerzeniem .ino. Przed jego wgraniem do modułu Arduino Nano należy w środowisku Arduino IDE wybrać odpowiedni typ płytki oraz port komunikacyjny. Po skompilowaniu programu jest on przesyłany do pamięci mikrokontrolera. Fragment kodu źródłowego zawierający pętlę główną przedstawiono na **rysunku 3**.

Montaż i uruchomienie

Po wgraniu programu do modułu Arduino Nano montujemy układ na płytce prototypowej lub uniwersalnej. Po wykonaniu wszystkich połączeń należy sprawdzić ich zgodność ze schematem przedstawionym na rysunku 2. W razie potrzeby gotowy układ można umieścić w odpowiedniej obudowie.

Następnie doprowadzamy do układu napięcie zasilające 5 V. Po uruchomieniu moduł Arduino Nano rozpoczyna cykliczny odczyt temperatury i wilgotności z czujnika DHT11, a wyniki pomiarów są prezentowane na wyświetlaczu LCD. Po przekroczeniu ustawionego progu alarmowego (+25°C) brzęczyk piezoelektryczny emituje sygnał ostrzegawczy. ■

Navpreet Singh

Materiał filmowy do artykułu:
https://youtu.be/QbXjoKBKjCI

Ten artykuł był wcześniej opublikowany na łamach „EFY", październik 2023 (efymag.com)

REKLAMA

eprasa.pl 17a47aa7e2

Rysunek 1. Prototyp urządzenia.

Zaawansowany wykrywacz alkoholu w wydychanym powietrzu

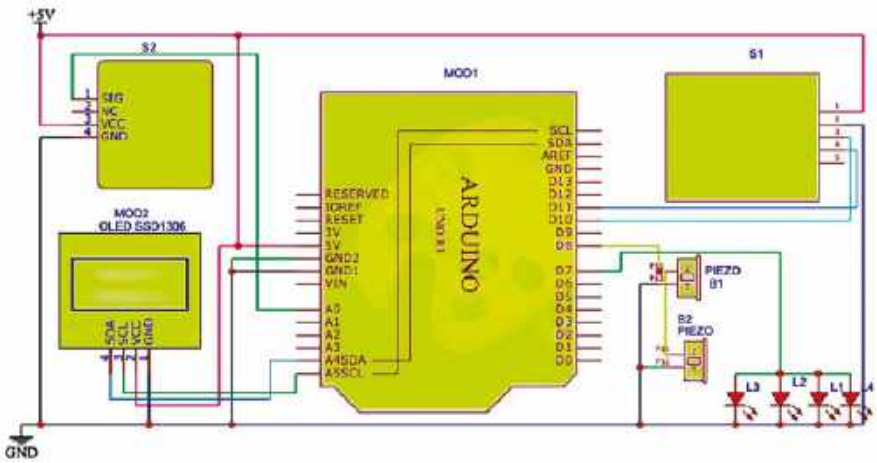
W dzisiejszym świecie media regularnie informują o tragicznych skutkach prowadzenia pojazdów pod wpływem alkoholu. Statystyki wypadków drogowych skłoniły nas do opracowania projektu zaawansowanego wykrywacza alkoholu w wydychanym powietrzu.

Do budowy urządzenia wykorzystano moduł Arduino Uno, odbiornik GPS NEO-6M, diody LED, brzęczyki, wyświetlacz OLED, przewody połączeniowe oraz płytkę prototypową. Głównym celem projektu jest poprawa bezpieczeństwa na drogach przez ograniczenie ryzyka prowadzenia pojazdu przez osobę znajdującą się pod wpływem alkoholu.

Centralnym elementem układu jest czytelny wyświetlacz OLED. Moduł Arduino odbiera i przetwarza dane z odbiornika GPS NEO-6M, dzięki czemu może wyświetlać między innymi prędkość pojazdu. Dodatkową sygnalizację stanowią diody LED i brzęczyki. Gdy czujnik alkoholu MQ-3 wykryje przekroczenie ustawionego progu stężenia alkoholu w wydychanym powietrzu, diody LED zaczynają migać, a brzęczyk emituje głośny sygnał dźwiękowy. Alarm pozostaje aktywny do chwili naciśnięcia przycisku zerowania. Dzięki temu użytkownik otrzymuje wyraźną informację o wykryciu alkoholu w wydychanym powietrzu.

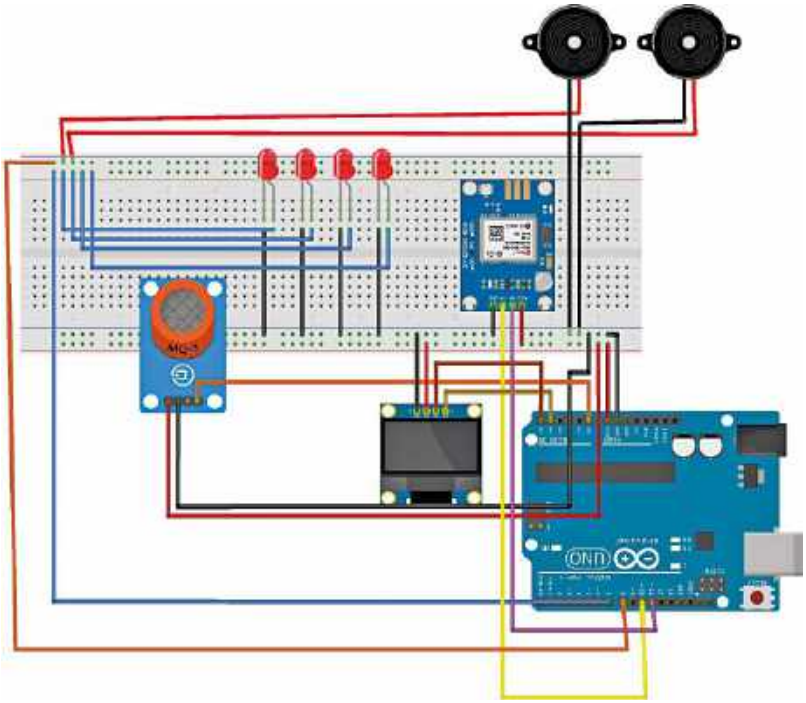
Układ może również współpracować z odbiornikiem GPS, umożliwiając wyświetlanie aktualnej prędkości pojazdu. Jeżeli odbiornik GPS nie jest podłączony, program może pracować w trybie demonstracyjnym, wyświetlając przykładowe wartości prędkości.

Zastosowano moduł GPS NEO-6M, który umożliwia wyznaczanie bieżącej lokalizacji pojazdu. Dane z odbiornika GPS mogą być przekazywane do systemu opartego na Raspberry Pi lub komputera przenośnego. Po wykryciu przekroczenia



Rysunek 2. Schemat ideowy układu.

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 3. Rozmieszczenie elementów na płytce stykowej.

ustawionego progu stężenia alkoholu w wydychanym powietrzu taki system może wysłać wiadomość e-mail na wcześniej zdefiniowany adres, dołączając aktualne współrzędne pojazdu odczytane z modułu GPS.

Prototyp urządzenia przedstawiono na **rysunku 1**. Wykaz zastosowanych elementów zamieszczono na liście elementów.

Schemat ideowy wykrywacza alkoholu przedstawiono na **rysunku 2**. Układ zawiera moduł Arduino Uno (MOD1), cztery diody LED (L1...L4), dwa brzęczyki (B1, B2), wyświetlacz OLED SSD1306 (MOD2), moduł GPS NEO-6M (S1) oraz czujnik alkoholu MQ-3 (S2). Rozmieszczenie elementów pokazano na **rysunku 3**.

```
ALCHOL_code.ino
1  #include <SoftwareSerial.h>
2  #include <TinyGPS++.h>
3  #include <Adafruit_GFX.h>
4  #include <Adafruit_SSD1306.h>
5
6  SoftwareSerial GPS_serial(10, 11);
7  TinyGPSPlus GPS;
8
9  const int MQ3Pin = A0;
10 const float threshold = 400.0;  // change this to your desired threshold value
11 const int buzzerPin = 8;
12 const int ledPin = 7;
13
14 Adafruit_SSD1306 display(128, 32, &Wire, -1);
15
16 void setup() {
17  Serial.begin(9600);
18   GPS_serial.begin(9600);
19
20   pinMode(buzzerPin, OUTPUT);
21   pinMode(ledPin, OUTPUT);
22
23   display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
24   display.clearDisplay();
25   display.setTextSize(2);
26   display.setTextColor(WHITE);
27   display.setCursor(0,0);
28   display.println("00 km/h");
29   display.display();
30 }
31
32 void loop() {
33   // read MQ-3 sensor value
34   float MQ3Value = analogRead(MQ3Pin);
35    while (GPS_serial.available() > 0) {
36       if (GPS.encode(GPS_serial.read())) {
```

Rysunek 4. Fragment kodu źródłowego programu dla modułu Arduino.

Oprogramowanie

Program opracowano w środowisku Arduino IDE. Przed jego skompilowaniem należy zainstalować wymagane biblioteki: TinyGPS++.h, Adafruit_GFX.h oraz Adafruit_SSD1306.h. Są one dołączane do programu i wykorzystywane do obsługi odbiornika GPS oraz wyświetlacza OLED.

W pętli głównej zaimplementowano procedurę wykrywania alkoholu w wydychanym powietrzu. W wersji demonstracyjnej program może wyświetlać przykładowe wartości prędkości. Po podłączeniu odbiornika GPS NEO-6M prezentowana jest rzeczywista prędkość pojazdu wyznaczona na podstawie danych GPS.

Po skompilowaniu programu należy wybrać w środowisku Arduino IDE odpowiedni typ płytki oraz port COM, a następnie wgrać program do modułu Arduino.

Rysunek 4 przedstawia fragment kodu źródłowego.

W celu rozszerzenia funkcjonalności projektu o wysyłanie powiadomień pocztą elektroniczną po wykryciu alkoholu przygotowano program w języku Python. Wymaga on biblioteki pyserial (moduł serial) do komunikacji przez port szeregowy oraz standardowego modułu smtplib do wysyłania wiadomości e-mail.

Program odczytuje dane przesyłane przez port szeregowy i oczekuje na komunikat informujący o przekroczeniu ustawionego progu stężenia alkoholu. Po odebraniu takiego komunikatu wysyła wiadomość e-mail na wcześniej zdefiniowany adres.

W kodzie programu należy podać adres e-mail nadawcy, dane uwierzytelniające do konta pocztowego (np. hasło aplikacji, jeśli jest wymagane) oraz adres e-mail odbiorcy. Fragment programu przedstawiono na **rysunku 5**.

Tworzenie hasła do aplikacji

Aby umożliwić wysyłanie wiadomości e-mail z programu, należy utworzyć hasło do aplikacji dla konta Google. Jest ono wymagane podczas korzystania z programów, które wysyłają pocztę za pomocą protokołu SMTP i nie obsługują logowania metodą „Zaloguj się przez Google".

W tym celu należy wykonać następujące czynności:

eprasa.pl 17a47aa7e2

Wykaz elementów:
Moduł Arduino Uno (MOD 1)
Przewody połączeniowe 20 szt.
Płytka główna
Czujnik MQ3 (S2)
Moduł GPS NEO 6M (S1)
Diody LED (L1, L2, L3, L4) 4 szt.
Brzęczyk (B1, B2) 2 szt.
Wyświetlacz OLED o przekątnej 0,96 cala (MOD 2)

- włączyć weryfikację dwuetapową dla konta Google;
- zalogować się na konto Google i przejść do sekcji Bezpieczeństwo;
- odszukać opcję Hasła do aplikacji;
- wpisać nazwę identyfikującą tworzone hasło (np. „Analizator alkoholu”);
- wybrać polecenie Utwórz;
- skopiować wyświetlony 16-znakowy kod, który będzie hasłem do aplikacji;
- zakończyć konfigurację.

Wygenerowane hasło należy wpisać w kodzie programu Python zamiast hasła do konta Google. Po zakończeniu konfiguracji możliwe będzie wysyłanie wiadomości e-mail przez program.

Montaż i uruchomienie

Montaż urządzenia rozpoczynamy od złożenia układu na płytce prototypowej zgodnie ze schematem, a następnie wgrywamy program do modułu Arduino Uno. Po podłączeniu modułu Arduino do komputera, wybraniu właściwego portu COM i uruchomieniu programu w języku Python rozpoczyna się wymiana danych przez port szeregowy.

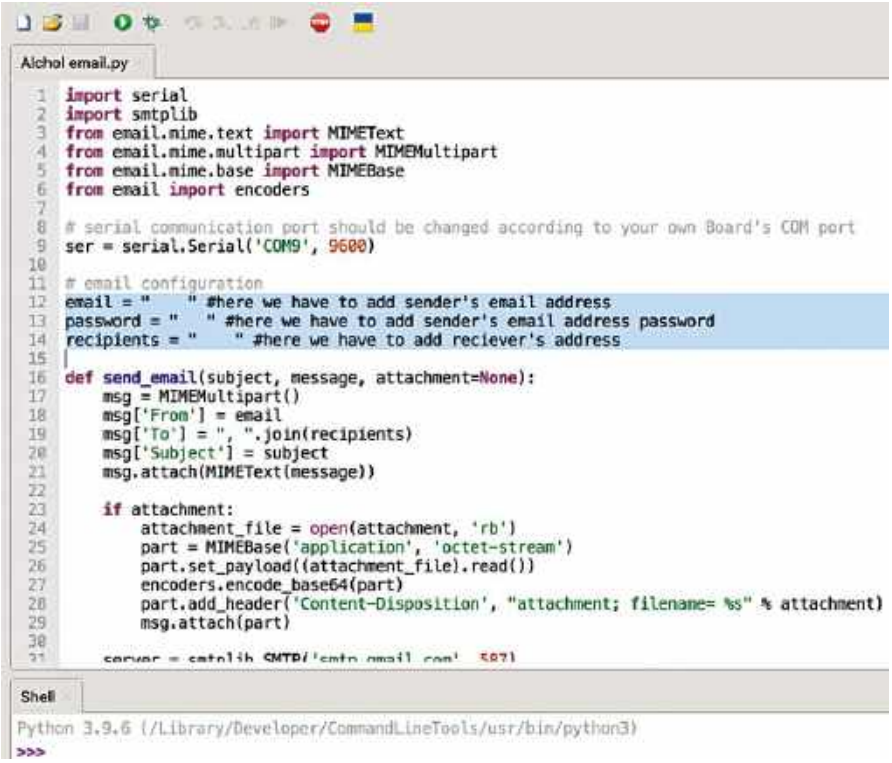
Po wykryciu przekroczenia ustawionego progu stężenia alkoholu w wydychanym powietrzu urządzenie uruchamia sygnalizację dźwiękową. Jednocześnie program w Pythonie wysyła wiadomość e-mail zawierającą bieżącą lokalizację pojazdu wyznaczoną na podstawie danych z odbiornika GPS. Na wyświetlaczu OLED prezentowana jest prędkość wyznaczona z danych GPS.

Rysunek 6 przedstawia ekran z wyświetlaną prędkością, natomiast **rysunek 7** – przykładową wiadomość e-mail wysłaną przez system. ■

Rohan Barnwal

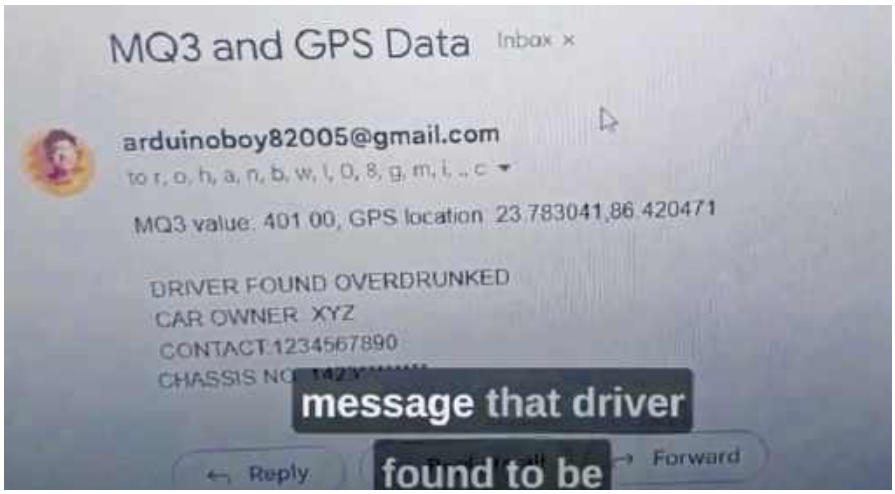
Materiały dodatkowe:
- https://github.com/mikalhart/TinyGPSPlus/blob/master/src/TinyGPS%2B%2B.h
- https://github.com/adafruit/Adafruit-GFX-Library
- https://github.com/adafruit/Adafruit_SSD1306

Ten artykuł był wcześniej opublikowany na łamach „EFY”, październik 2023 (efymag.com)



Rysunek 5. Fragment programu w języku Python z definicjami adresów e-mail oraz hasła do aplikacji.

Rysunek 6. Wyświetlanie prędkości na ekranie OLED.



Rysunek 7. Przykładowa wiadomość e-mail wysłana przez system.

eprasa.pl 17a47aa7e2

ELEKTRONIKA dla wszystkich
nr 08/2026 (26)
JUNIOR

Młodzi Entuzjaści Elektroniki. Na pierwszym planie Adrian. Szkoła Podstawowa nr 86, Wrocław

Wakacje to czas przygód. Jedni wybiorą góry, inni jeziora, lasy, harcerskie obozy albo biwaki pod namiotem. W takich miejscach często okazuje się, że najcenniejsze nie są najnowocześniejsze gadżety ani kosztowny sprzęt, lecz rzeczy proste, niezawodne i zawsze gotowe do działania. To właśnie one pomagają odnaleźć drogę po zmroku, znaleźć zgubiony przedmiot w namiocie, przygotować wieczorny posiłek albo bezpiecznie doprowadzić grupę do obozowiska.

W terenie znacznie większą wartość od elektronicznych nowinek klasy hi-end ma zwyczajna, solidna latarka, która po prostu działa wtedy, gdy jest potrzebna. Podczas wakacyjnych wypraw warto pamiętać, że prawdziwa przygoda idzie w parze z odpowiedzialnością. Dobrze jest być przygotowanym nie tylko na to, co może przydarzyć się nam samym, lecz także na sytuacje, w których nasza pomoc okaże się potrzebna komuś innemu. Oświetlenie drogi koledze, pomoc w odnalezieniu zagubionego plecaka czy bezpieczne odprowadzenie go do namiotu to drobne gesty, które budują poczucie bezpieczeństwa całej grupy. Warto więc mieć pod ręką sprzęt, któremu można zaufać.

Co zbudujemy tym razem?

Tym razem zbudujemy właśnie takie urządzenie – prostą, **podręczną latarkę LED** (**AVTEDU627**). Choć jej schemat ideowy (**rysunek 10**) jest bardzo prosty, konstrukcja kryje kilka ciekawych rozwiązań. Jednym z nich jest możliwość włączenia światła na dwa sposoby. Przycisk umożliwia zaświecenie latarki tylko przez czas jego naciskania, co pozwala oszczędzać baterie podczas krótkiego oświetlania drogi lub przeszukiwania plecaka. Z kolei dodatkowy włącznik pozwala pozostawić światło włączone na stałe, gdy potrzebujemy obu rąk do wykonania jakiejś czynności.

Wykaz elementów:

Rezystory:
R1, R2: 47 Ω (żółty-fioletowy-czarny-złoty)

Półprzewodniki:
LED1, LED2: dioda LED 5 mm biała

Pozostałe:
BAT1: koszyk na 3 baterie AAA (plus baterie)
SW1: przycisk (tact switch 12×12 mm)
SW2: włącznik suwakowy (SS02-12F20)
Drut: np. srebrzanka o średnicy 0,8 mm lub odpowiednio długie odcięte wyprowadzenia przylutowanych komponentów do wykonania obejm na diody LED

Na **fotografii 2a** pokazano komplet elementów potrzebnych do budowy latarki, natomiast na **fotografii 2b** przedstawiono już zmontowany układ. Działanie gotowej latarki LED można zobaczyć na krótkim filmie dostępnym pod adresem: https://youtu.be/JiDUxUZqjg0.

Na pierwszy rzut oka może się wydawać, że to tylko prosta latarka z dwiema diodami LED. Warto jednak zwrócić uwagę na jeszcze jeden szczegół. Diody LED, elementy emitujące światło – a więc krytyczne – zostały dodatkowo unieruchomione obejmą z drutu (**fotografia 3**).

Ktoś mógłby powiedzieć, że to niepotrzebny drobiazg. Tymczasem właśnie takie drobne rozwiązania często decydują o trwałości urządzeń pracujących w trudnych warunkach. Nie bez powodu alarmowe sygnalizatory optyczno-akustyczne czy policyjne lampy błyskowe bywają zabezpieczane metalowymi osłonami. W naszej latarce rolę takiego zabezpieczenia pełni prosta obejma, która chroni diody przed wyginaniem i przypadkowym wyrwaniem z płytki. Dzięki temu latarka ma większe szanse bez uszkodzeń przetrwać podróż w plecaku, nawet jeśli przez wiele godzin będzie ściskana pomiędzy ubraniami, menażką i innym obozowym wyposażeniem. Niby drobiazg, a w praktyce właśnie takie szczegóły często decydują o tym, czy sprzęt okaże się naprawdę niezawodny.

Schemat montażowy

Schemat montażowy to rysunek, który pokazuje, gdzie dokładnie na płytce drukowanej należy umieścić każdy z elementów zestawu. Dzięki niemu łatwo odnaleźć właściwe miejsce dla rezystorów, kondensatorów, diod czy układów scalonych i innych podzespołów, ponieważ wszystkie komponenty są oznaczone takimi samymi desygnatorami, zarówno na schemacie montażowym, liście elementów jak i na schemacie ideowym. Ułatwia to bezbłędne

Fotografia 1. Od lewej: Dawid i Adrian – Młodzi Entuzjaści Elektroniki podczas montażu podręcznej latarki LED (AVTEDU627), Szkoła Podstawowa nr 86, Wrocław

eprasa.pl 17a47aa7e2

Fotografia 2. Zestaw do budowy podręcznej latarki LED (kod AVTEDU627); a) zestaw do samodzielnego złożenia; b) zmontowany układ

i szybkie składanie układu, nawet osobom początkującym. Schemat montażowy pomaga również uniknąć pomyłek, takich jak wlutowanie elementu w niewłaściwe miejsce lub ustawienie go w złej orientacji. Schemat montażowy, który dodatkowo pokazuje układ ścieżek i padów, bardzo pomaga w kontroli poprawności wykonanych połączeń lutowanych. Dzięki temu łatwo ustalić, czy połączenia pomiędzy sąsiednimi polami są przewidziane w projekcie, czy też powstały przez pomyłkę, na przykład na skutek przypadkowego zwarcia ich cyną podczas nieostrożnego lutowania. Taki

Fotografia 3. Krytyczne elementy (diody LED) przytwierdzone do PCB obejmą z drutu

podgląd znacząco ułatwia wykrywanie błędów i zwiększa pewność, że układ został zmontowany prawidłowo. Schemat montażowy pokazano na **rysunku 1**.

Montaż rezystorów

Zgodnie z informacjami z listy elementów przylutuj do płytki rezystory o określonych wartościach rezystancji na odpowiednich pozycjach na płytce drukowanej. Przed przystąpieniem do tej czynności zapoznaj się ze wskazówkami poniżej.

- Rezystor jest elementem, który ogranicza przepływ prądu w obwodzie elektrycznym. Dzieje się tak dlatego, że ma on określoną rezystancję – właściwość materiału wywołującą spadek napięcia podczas przepływu prądu. Energia elektryczna zamienia się w nim na ciepło, co jest naturalnym skutkiem przepływu prądu przez rezystancję.
- Rezystor nie ma biegunowości – działa tak samo niezależnie od kierunku przepływu prądu. Dlatego jego montaż na płytce nie wymaga uwzględniania orientacji. Ważne jest jedynie, aby w danym miejscu umieścić właściwy rezystor o odpowiedniej wartości. Sam kierunek montażu pozostaje dowolny.

Zanim przystąpisz do montażu, zapoznaj się z instrukcjami dostępnymi online:

Lutowanie komponentów przewlekanych do płytki drukowanej
https://elportal.pl/files/2026/02/15/3678-lutowanie-komponentow-przewlekanych-do-plytki-drukowanej.pdf

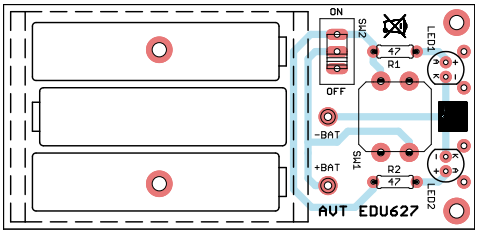
Montaż przyjazny naprawom + Przycinanie nadmiaru wyprowadzeń
https://elportal.pl/files/2026/02/15/3679-montaz-przyjazny-naprawom-przycinanie-nadmiaru-wyprowadzen.pdf

Zagadnienia BHP związane z lutowaniem
https://elportal.pl/files/2026/02/15/3680-zagadnienia-bhp-zwiazane-z-lutowaniem.pdf

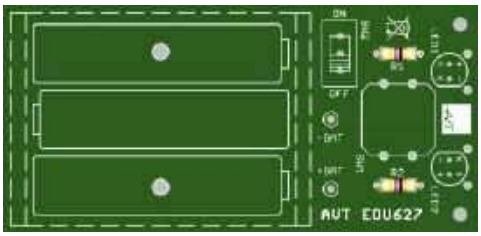
Zagadnienia BHP związane z przycinaniem nadmiaru wyprowadzeń
https://elportal.pl/files/2026/02/15/3681-zagadnienia-bhp-zwiazane-z-przycinaniem-nadmiaru-wyprowadzen.pdf

Zagadnienia BHP związane z uruchamianiem zmontowanego układu
https://elportal.pl/files/2026/02/15/3682-zagadnienia-bhp-zwiazane-zuruchamianiem-zmontowanego-ukladu.pdf

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 1. Schemat montażowy układu



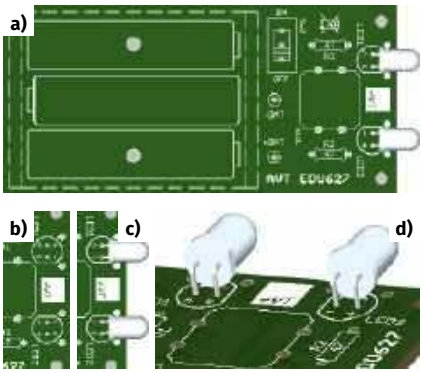
Rysunek 2. Rezystory o odpowiednich wartościach, oznaczone za pomocą kodu kolorowych pasków, zamontowane na właściwych pozycjach, zgodnie z listą elementów

- Rezystory są zazwyczaj jednymi z najniższych elementów montowanych na płytce drukowanej. Ich przylutowanie nie utrudnia późniejszego montażu wyższych komponentów, dlatego lutuje się je zazwyczaj w pierwszej kolejności.
- Spośród wszystkich komponentów znajdujących się w zestawie wyodrębnij rezystory i odłóż je na osobną stertę.
- Pozostałe elementy odłóż na bok, a podczas montażu sięgaj wyłącznie po kolejne rezystory z wcześniej przygotowanej sterty.
- Za każdym razem, gdy weźmiesz do ręki kolejny rezystor, zmierz jego wartość za pomocą multimetru ustawionego w tryb omomierza. Odczytaną rezystancję zapamiętaj.
- Jeśli pomiar rezystorów sprawia Ci trudność, poproś o pomoc kolegę lub osobę prowadzącą zajęcia. Gdy masz dostęp do internetu, możesz też skorzystać z instrukcji dostępnej na stronie https://elportal.pl/do-pobrania – znajdziesz tam dokument „Pomiar wartości rezystorów za pomocą multimetru", przygotowany jako materiał uzupełniający do EdW 11/2024.
- Na dołączonej do zestawu liście elementów odszukaj zmierzoną wcześniej wartość rezystancji (w Ω, kΩ lub MΩ), a następnie odczytaj desygnator lub desygnatory przypisane do tej wartości.
- Zegnij wyprowadzenia rezystora i umieść go w płytce (**rysunek 2**) w miejscu oznaczonym właściwym desygnatorem.
- Zadbaj o to, aby każdy rezystor był włożony do płytki do końca i dobrze do niej przylegał. Estetyczny montaż nie tylko poprawia wygląd gotowego urządzenia, lecz także stabilizuje element w płytce, chroniąc go przed uszkodzeniami mechanicznymi, oraz ułatwia późniejszą diagnostykę i ewentualne naprawy.
- Przylutuj element do płytki. Jeśli nie wiesz, jak to zrobić lub chcesz upewnić się, że wykonujesz tę czynność prawidłowo, przeczytaj sekcję *Zanim przystąpisz do montażu…* oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, w szczególności z instrukcjami BHP.
- Usuń nadmiar wyprowadzeń za pomocą obcinaczek. Jeśli nie wiesz, jak to zrobić lub chcesz upewnić się, że wykonujesz tę czynność prawidłowo, przeczytaj sekcję *Zanim przystąpisz do montażu…* oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, w szczególności z instrukcjami BHP.

Montaż diody LED

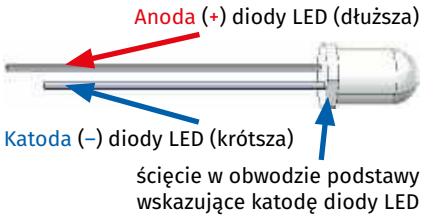
Zgodnie z informacjami z listy elementów na odpowiedniej pozycji przylutuj diody LED o właściwym kolorze. W tym zestawie obie diody LED są koloru białego, natomiast baczną uwagę należy poświęcić nietypowemu sposobowi ich montażu do płytki. Przed przylutowaniem diody LED do płytki zapoznaj się ze wskazówkami poniżej.

- **Zwróć uwagę na nietypowy, poziomy sposób montażu diod LED na płytce PCB. Przed wlutowaniem wyprowadzenia każdej diody należy wygiąć pod kątem 90° w odległości około 1 mm od podstawy obudowy. Zwróć też uwagę na położenie ścięć obudowy oznaczających katody diod. W obu diodach ścięcie jest skierowane do wnętrza płytki, dlatego wyprowadzenia trzeba wygiąć w różny sposób. Po wygięciu diod nie można zamieniać ich miejscami (patrz punkt dotyczący polaryzacji poniżej).**
- Dioda LED to element elektroniczny, który świeci, gdy płynie przez niego prąd w odpowiednim kierunku. Łączy w sobie działanie zwykłej diody – przewodzi prąd tylko w jedną stronę – oraz funkcję źródła światła. Dzięki temu LED-y mogą sygnalizować działanie układu, informować o stanie pracy urządzenia lub pracować w układach generujących efekty świetlne.
- Tak jak każda dioda, LED ma biegunowość. Oznacza to, że musi być podłączona we właściwym kierunku, inaczej nie zaświeci, a w szczególnym przypadku ulegnie uszkodzeniu. Jej katodę najczęściej oznacza ścięcie na obudowie oraz krótsza nóżka (**rysunek 4**). Przed montażem sprawdź, gdzie na PCB znajduje się oznaczenie katody, i ustaw diodę zgodnie z nim.
- Dioda LED jest elementem, który od razu przyciąga wzrok obserwatora, dlatego estetyka jej montażu ma duży wpływ na końcowy wygląd budowanego urządzenia. Zazwyczaj warto zadbać o to, aby LED była ustawiona prostopadle do płytki i równo do niej przylegała – nawet drobne odchylenia mogą być widoczne po uruchomieniu układu, szczególnie gdy diod jest więcej. **W tym projekcie jest jednak inaczej – obie diody LED należy zamontować poziomo, równolegle do powierzchni płytki, po uprzednim wygięciu wyprowadzeń i zgodnie z polaryzacją (patrz wyżej). W dalszej części montażu zostaną one dodatkowo przymocowane do płytki PCB obejmą wykonaną z drutu.**
- Z uwagi na powyższe LED-y najlepiej montować na stosunkowo wczesnym etapie lutowania. Rezystory, podstawki pod układy scalone oraz diody prostownicze i sygnałowe są zazwyczaj nieco niższe, ale zaraz po nich warto umieścić na płytce diody LED. W tym momencie pole lutownicze jest wciąż dobrze dostępne, i nic nie zasłania miejsca



Rysunek 3. a) Lokalizacja diod LED na płytce; b), c), d) poprawny montaż tego elementu z uwzględnieniem obrotu (zwróć uwagę na fragment prostej linii w obrysach diod LED wskazujący katodę)

eprasa.pl 17a47aa7e2

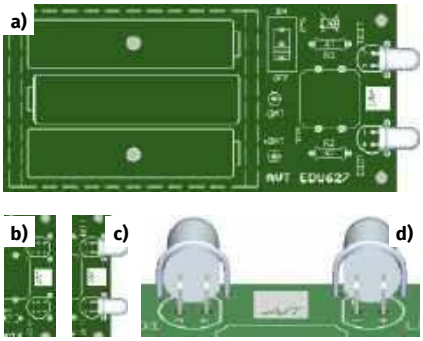


Rysunek 4. Opis wyprowadzeń standardowej diody LED z dwoma wyprowadzeniami („plusowe" wyprowadzenie jest dłuższe, natomiast „minusowe" krótsze)

montażu, co ułatwia przylutowanie LED-ów równo i estetycznie.

- Zanim włożysz diodę LED do płytki, sprawdź w liście elementów, jaki kolor LED-a powinien zostać zamontowany w danej lokalizacji. Same diody – zwłaszcza w bezbarwnych obudowach – mogą wyglądać bardzo podobnie lub wręcz identycznie, dlatego warto upewnić się, jaki kolor świecenia ma LED, który trzymasz w ręku.
- Jeśli w projekcie występuje kilka kolorów diod LED w bezbarwnych obudowach, zasadne jest ich wcześniejsze posegregowanie. Najprościej zrobić to za pomocą multimetru ustawionego w tryb badania diod lub ciągłości obwodu. Przyłożenie sond – czerwonej do anody diody LED i czarnej do jej katody (**fotografia 4**) – spowoduje lekkie świecenie diody LED, co pozwoli od razu ustalić jej kolor. Dzięki temu można przyporządkować poszczególne LED-y do właściwych grup i ułożyć je na osobnych stertach. Takie przygotowanie znacząco zmniejsza ryzyko pomyłek podczas montażu i gwarantuje prawidłowy efekt wizualny w gotowym urządzeniu.

Fotografia 4. Sprawdzanie diody LED za pomocą multimetru ustawionego na funkcję testowania diod. Po przyłożeniu sondy czerwonej do anody, a czarnej do katody, sprawna dioda LED powinna się zaświecić. Jeśli dioda ma odpowiednio długie (jeszcze nie przycięte) wyprowadzenia można się wspomóc krokodylkami



Rysunek 5. a) Lokalizacja obejm dla diod LED na płytce; b), c), d) poprawny montaż obejm

- Jeśli upewniłeś się co do odpowiedniej polaryzacji i kolorów, przylutuj element do płytki. Jeśli nie wiesz, jak to zrobić lub chcesz upewnić się, że wykonujesz tę czynność prawidłowo, przeczytaj sekcję *Zanim przystąpisz do montażu…* oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, w szczególności z instrukcjami BHP.
- Usuń nadmiar wyprowadzeń za pomocą obcinaczek. Jeśli nie wiesz, jak to zrobić lub chcesz upewnić się, że wykonujesz tę czynność prawidłowo, przeczytaj sekcję *Zanim przystąpisz do montażu…* oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, w szczególności z instrukcjami BHP.

Montaż zabezpieczeń diod LED

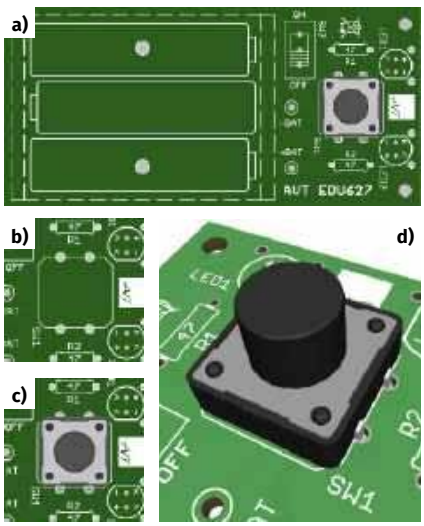
Zamontowane w poprzednim kroku diody LED dodatkowo przytwierdź do płytki PCB za pomocą srebrzanki o średnicy 0,8 mm lub odpowiednio długich odciętych wyprowadzeń wcześniej przylutowanych elementów. Przed ich przylutowaniem do płytki zapoznaj się ze wskazówkami poniżej.

- Zadaniem obejmy jest mechaniczne zabezpieczenie diody LED przed uszkodzeniem. Chroni ona wyprowadzenia przed zginaniem podczas transportu, użytkowania i przypadkowego nacisku na obudowę diody. Dzięki temu zmniejsza się ryzyko pęknięcia wyprowadzeń lub uszkodzenia połączeń lutowanych.
- Obejmę można wykonać z odcinka srebrzanki o średnicy 0,8 mm lub z odpowiednio długiego odciętego wyprowadzenia wcześniej przylutowanego elementu. Wyprowadzenia rezystorów, diod prostowniczych i innych elementów przewlekanych doskonale nadają się do tego celu.
- Przed przylutowaniem obejmy uformuj ją tak, aby miała równomierny kształt i przylegała do obudowy diody LED bez wywierania na nią nadmiernego nacisku. Zbyt mocne dociśnięcie może naprężać wyprowadzenia diod oraz uszkodzić obudowę diody LED.
- Staraj się, aby łuk nad diodą był możliwie symetryczny. Taki sposób wykonania poprawia wygląd gotowego urządzenia i ułatwia ewentualny montaż obudowy.
- Obejmę należy przylutować dopiero po ostatecznym ustawieniu diody LED. Po jej zamocowaniu zmiana położenia diody będzie znacznie trudniejsza.
- Przylutuj elementy do płytki. Jeśli nie wiesz, jak to zrobić lub chcesz upewnić się, że wykonujesz tę czynność prawidłowo, przeczytaj sekcję *Zanim przystąpisz do montażu…* oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, w szczególności z instrukcjami BHP.
- Usuń nadmiar wyprowadzeń za pomocą obcinaczek. Jeśli nie wiesz, jak to zrobić lub chcesz upewnić się, że wykonujesz tę czynność prawidłowo, przeczytaj sekcję *Zanim przystąpisz do montażu…* oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, w szczególności z instrukcjami BHP.

Montaż mikroprzycisku (*tact switch*)

Zgodnie z informacjami z listy elementów zamontuj mikroprzełącznik **SW1** na wskazanej lokalizacji. Przed przystąpieniem do tej czynności zapoznaj się ze wskazówkami poniżej.

- Mikroprzycisk (*tact switch*) to chwilowy przełącznik, który zwiera styki

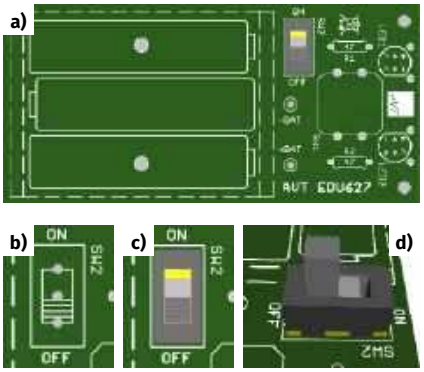


Rysunek 6. a) Lokalizacja mikroprzycisku na płytce; b), c), d) poprawny montaż tego elementu

eprasa.pl 17a47aa7e2

tylko w czasie naciśnięcia przycisku. Po zwolnieniu nacisku automatycznie wraca do stanu początkowego. Najczęściej wykorzystywany jest jako przycisk sterujący, reset lub przycisk funkcyjny.

- Typowy mikroprzycisk ma cztery wyprowadzenia, po dwa połączone ze sobą wewnętrznie. Naciśnięcie przycisku powoduje zwarcie obu par styków. Z tego powodu elektrycznie wystarczy wykorzystać dowolne dwa przeciwległe piny.
- Orientacja montażu mikroprzycisku na płytce PCB nie ma znaczenia elektrycznego, o ile jego wyprowadzenia pasują do otworów w płytce. Ważne jest jedynie prawidłowe dopasowanie mechaniczne do footprintu.
- Włóż mikroprzycisk do płytki tak, aby wszystkie cztery wyprowadzenia swobodnie przeszły przez otwory. Element powinien przylegać płasko do powierzchni PCB.
- Wyprowadzenia mikroprzycisku są specjalnie wyprofilowane w taki sposób, aby po włożeniu do płytki były w niej sprężyście trzymane. Dzięki temu element sam utrzymuje się w otworach PCB i nie ma potrzeby wyginania wyprowadzeń ani przytrzymywania przycisku podczas lutowania.
- Mimo wszystko, nie zaszkodzi postąpić w sposób konwencjonalny: najpierw przylutuj jedno wyprowadzenie. Pozwoli to ustabilizować położenie przycisku i w razie potrzeby skorygować jego ustawienie względem płytki. Jeśli nie wiesz, jak to zrobić lub chcesz upewnić się, że wykonujesz tę czynność prawidłowo, przeczytaj sekcję *Zanim przystąpisz do montażu…* oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, w szczególności z instrukcjami BHP.
- Po upewnieniu się, że mikroprzycisk równo przylega do PCB, przylutuj pozostałe trzy wyprowadzenia. Zapewni to dobrą stabilność mechaniczną elementu.
- Prawidłowe luty powinny być gładkie, błyszczące i mieć kształt niewielkiego stożka. W przypadku wątpliwości przeczytaj sekcję *Zanim przystąpisz do montażu…* oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, w szczególności z instrukcjami BHP.
- Po zakończeniu montażu sprawdź działanie przycisku. Powinien dawać wyraźne „kliknięcie" i sprężyście wracać do pozycji wyjściowej po puszczeniu.



Rysunek 7. a) Lokalizacja przełącznika na płytce; b), c), d) poprawny montaż tego elementu

- W przypadku mikroprzycisków nie ma potrzeby przycinania ich wyprowadzeń. Po przylutowaniu pozostaw je w oryginalnej długości.

Montaż przełącznika suwakowego

Zgodnie z informacjami z listy elementów zamontuj przełącznik SW2 na wskazanej lokalizacji. Przed przystąpieniem do tej czynności zapoznaj się ze wskazówkami poniżej.

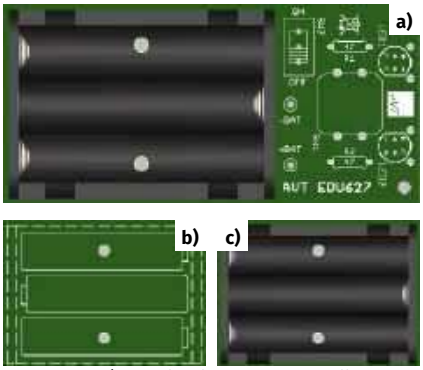
- Przełącznik suwakowy to element, który przełącza połączenie pomiędzy pinem środkowym a jednym ze skrajnych, zależnie od położenia suwaka. W tego typu konstrukcji kierunek montażu nie ma żadnego znaczenia – niezależnie od tego, jak zostanie obrócony, będzie działał prawidłowo.
- Obrys na płytce PCB może zawierać dodatkowe linie symbolizujące położenie suwaka, ale służą one wyłącznie temu, by łatwo rozpoznać miejsce montażu. Nie są to oznaczenia biegunowości ani wymaganej orientacji.
- Włóż przełącznik do płytki tak, aby wszystkie trzy jego wyprowadzenia swobodnie przeszły na drugą stronę PCB. Piny przełącznika są sztywne i nie nadają się do wyginania, dlatego nie należy ich odchylać w celu stabilizacji elementu.
- Ponieważ wyprowadzenia są sztywne, przełącznik trzeba przytrzymać podczas lutowania – można to zrobić ręką albo poprosić o pomoc kolegę lub opiekuna.
- Najpierw przylutuj środkowy pin przełącznika. Ten pojedynczy punkt lutowniczy pozwala ustabilizować komponent i kontrolować jego położenie względem płytki. Jeśli nie wiesz, jak to zrobić lub chcesz upewnić się, że wykonujesz tę czynność prawidłowo, przeczytaj sekcję Zanim przystąpisz do montażu… oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, w szczególności z instrukcjami BHP.
- Po upewnieniu się, że przełącznik dobrze przylega do PCB, przylutuj pozostałe dwa wyprowadzenia. Dzięki temu unikniesz sytuacji, w której element zostanie przylutowany pod kątem lub z przerwą pomiędzy obudową a powierzchnią płytki.
- Prawidłowe luty powinny być gładkie, błyszczące i mieć kształt niewielkiego stożka. W przypadku wątpliwości przeczytaj sekcję *Zanim przystąpisz do montażu…* oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, w szczególności z instrukcjami BHP.
- Po zakończeniu montażu sprawdź mechaniczne działanie suwaka. Przełącznik powinien poruszać się lekko i wyraźnie wskakiwać w dwie pozycje pracy.
- W przypadku tego typu przełącznika nie ma potrzeby przycinania jego wyprowadzeń. Po przylutowaniu pozostaw je w oryginalnej długości.

Montaż koszyka baterii

Zgodnie z informacjami z listy elementów zamontuj koszyk baterii BAT1 na wskazanej lokalizacji. Przed przystąpieniem do tej czynności zapoznaj się ze wskazówkami poniżej.

- Koszyk na trzy baterie AAA służy do mechanicznego zamocowania baterii oraz doprowadzenia zasilania do układu. Dzięki niemu baterie można łatwo wymieniać bez konieczności lutowania, co jest szczególnie ważne w urządzeniach zasilanych bateryjnie.
- Przed zamocowaniem koszyka zwróć uwagę na jego orientację względem płytki PCB. Przewody zasilające lub blaszki stykowe powinny bez problemu sięgać do odpowiednich pól lutowniczych, a sam koszyk nie powinien zasłaniać innych elementów ani utrudniać dostępu do przełącznika, diod LED lub innych części urządzenia.
- Koszyk można zamocować do płytki PCB na kilka sposobów. Najtrwalszym rozwiązaniem jest przykręcenie go odpowiednimi wkrętami i nakrętkami. Jeśli nie ma takiej możliwości, można zastosować piankową taśmę dwustronną lub przykleić koszyk do płytki za pomocą kleju na gorąco.
- Przed przyklejeniem koszyka upewnij się, że powierzchnia płytki PCB jest

eprasa.pl 17a47aa7e2



Rysunek 8. a) Lokalizacja koszyka baterii na płytce; b), c), poprawny montaż tego elementu z uwzględnieniem obrotu

czysta, sucha i odtłuszczona. Zapewni to dobrą przyczepność taśmy dwustronnej lub kleju.

- Jeśli mocujesz koszyk za pomocą taśmy dwustronnej, po dociśnięciu przytrzymaj go przez kilkanaście sekund. W przypadku kleju na gorąco odczekaj, aż całkowicie ostygnie i stwardnieje, zanim przejdziesz do dalszego montażu.
- Przewody lub blaszki koszyka przylutuj do odpowiednich pól oznaczonych na płytce jako „+" i „–". Do zamocowania koszyka najlepiej wykorzystać odcięte wyprowadzenia wcześniej przylutowanych elementów. Po przełożeniu ich przez otwory w płytce i przylutowaniu ich do płytki, od strony elementów należy je również przylutować do wyprowadzeń koszyka (**fotografia 5**). Takie rozwiązanie zapewnia solidne mocowanie elektryczne, a jednocześnie pozwala ponownie wykorzystać materiał, który zazwyczaj trafia do kosza.
- Baterie włóż do koszyka dopiero po zakończeniu montażu i sprawdzeniu poprawności wszystkich połączeń. Zmniejszy to ryzyko przypadkowego zwarcia lub uszkodzenia układu podczas lutowania.
- Z uwagi na swoje stosunkowo duże rozmiary mechaniczne koszyk baterii najlepiej lutować dopiero po zamontowaniu niższych elementów, takich jak rezystory czy podstawki pod układy scalone. Pozwala to zachować wygodny dostęp do pól lutowniczych i zmniejsza ryzyko przypadkowego zahaczenia grotem lutownicy o wyższy element.
- Po umieszczeniu koszyka baterii zgodnie z informacjami powyżej, przylutuj element do płytki. Jeśli nie wiesz, jak to zrobić lub chcesz upewnić się, że wykonujesz tę czynność prawidłowo, przeczytaj sekcję *Zanim przystąpisz do montażu…* oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, w szczególności z instrukcjami BHP.
- Usuń nadmiar wyprowadzeń za pomocą obcinaczek. Jeśli nie wiesz, jak to zrobić lub chcesz upewnić się, że wykonujesz tę czynność prawidłowo, przeczytaj sekcję *Zanim przystąpisz do montażu…* oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, w szczególności z instrukcjami BHP.

Rysunek 9. Wskazówki BHP dotyczące użytkowania kleju na gorąco

Uwaga! Gorący klej również może powodować poważne oparzenia. W zależności od rodzaju wkładów temperatura kleju wypływającego z pistoletu wynosi zwykle około 120°C...200°C. Dla porównania, cyna lutownicza topi się w temperaturze około 183°C (stopy SnPb) lub 217°C...227°C (stopy bezołowiowe), a grot lutownicy podczas pracy ma najczęściej temperaturę 300°C...350°C. Mimo że gorący klej jest zwykle chłodniejszy od grotu lutownicy i ciekłej cyny, może być bardziej niebezpieczny dla skóry, ponieważ – w przeciwieństwie do cyny – przykleja się do niej i przez pewien czas oddaje zgromadzone ciepło. Jeśli dojdzie do poparzenia, nie należy odrywać gorącego kleju na siłę. Oparzone miejsce trzeba jak najszybciej chłodzić pod chłodną, bieżącą wodą przez co najmniej 20 minut. Woda schłodzi zarówno skórę, jak i sam klej, który po ostygnięciu zwykle łatwo odchodzi. W przypadku rozległego oparzenia, silnego bólu lub pojawienia się pęcherzy należy niezwłocznie zwrócić się o pomoc do osoby dorosłej i w razie potrzeby skorzystać z pomocy medycznej.

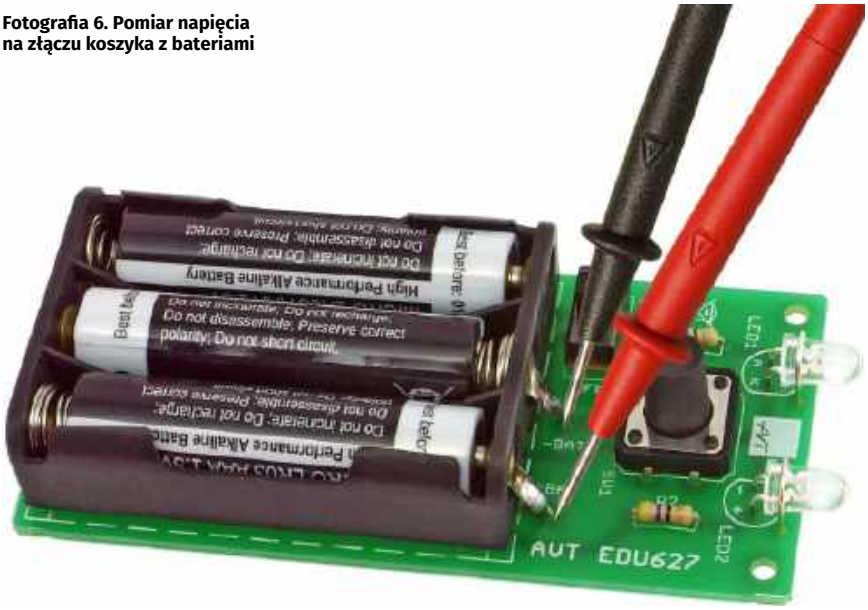
Pierwsze podłączenie zasilania do płytki

Można teraz ustawić przełącznik SW2 w pozycji OFF a następnie włożyć do koszyka na baterie trzy ogniwa AAA (fotografia 5).

Układ jest bardzo prosty i nawet w przypadku pomyłki montażowej praktycznie nie zawiera elementów, których uszkodzenie

Fotografia 5. Ogniwa AAA włożone do koszyka na baterie

eprasa.pl 17a47aa7e2



Fotografia 6. Pomiar napięcia na złączu koszyka z bateriami

wiązałoby się z większymi kosztami lub kłopotliwą wymianą. Nie ma tu również układów scalonych, przed umieszczeniem których w podstawkach należałoby obowiązkowo sprawdzić poprawność napięć zasilających. Teoretycznie można by więc pominąć kontrolę zasilania przed pierwszym uruchomieniem. Zamiast tego zaraz po zamocowaniu baterii w koszyku wystarczy przycisnąć na chwilę przycisk SW1. Jeśli diody w momencie naciśnięcia zaświecą, i zgasną po zwolnieniu przycisku to znaczy, że latarka zadziałała poprawnie. Pozostaje przetestować przełącznik SW2. Po jego ustawieniu w pozycji ON latarka powinna świecić w sposób ciągły, a po przestawieniu w pozycję OFF zgasnąć – oczywiście pod warunkiem, że SW1 nie jest w tym czasie przyciskany.

Nic jednak nie stoi na przeszkodzie, by po umieszczeniu baterii w koszyku zmierzyć napięcie panujące na jego złączu (**fotografia 6**).

Ponieważ w koszyku mieszczą się trzy ogniwa AAA o napięciu znamionowym 1,5 V każde, całkowita wartość napięcia mierzona na złączu koszyka powinna wynieść 4,5 V. W rzeczywistości przy SW2 ustawionym w pozycji OFF (baterie odłączone od diod LED) multimetr wskaże około 4,8 V, a dopiero po załączeniu diod LED (SW2 w pozycji ON lub wciśnięty SW1) napięcie to spadnie do około 4,5 V. Stanie się tak z uwagi na występującą w baterii rezystancję wewnętrzną i spadek napięcia, który na niej wystąpi dopiero wtedy, gdy w obwodzie popłynie prąd.

Podsumowanie montażu

Po ukończeniu montażu sprawdź, proszę, czy wszystkie połączenia lutowane są błyszczące i nie ma zimnych lutów oraz czy żadne sąsiednie pola lutownicze nie są ze sobą błędnie połączone. Poprawnie zmontowany układ przedstawiono na **fotografii 7a** i **7b**.

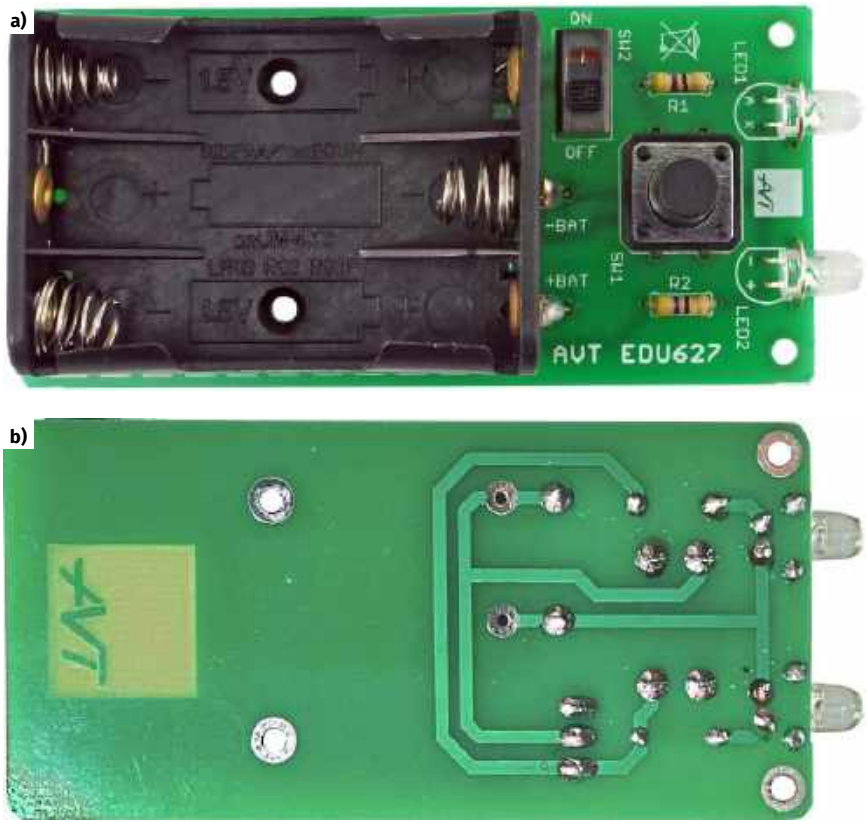
W przypadku wątpliwości dotyczących poprawności wykonanych połączeń lutowanych skorzystaj z poradnika *Lutowanie komponentów przewlekanych do płytki drukowanej* https://elportal.pl/files/2026/02/15/3678-lutowanie-komponentow-przewlekanych-do-plytki-drukowanej.pdf

Ale właściwie... dlaczego to działa?

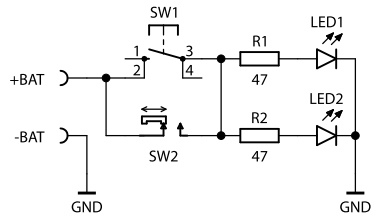
Schemat elektryczny latarki pokazano na **rysunku 10**.

Układ jest prostą latarką zasilaną z baterii. Wyposażono go w dwa elementy sterujące – przycisk chwilowy SW1 oraz przełącznik suwakowy SW2.

Przełącznik SW2 służy do normalnego włączania i wyłączania latarki. Po przesunięciu go w pozycję włączenia dodatni biegun baterii (+BAT) zostaje połączony z obwodem zasilania. Prąd płynie przez dwie równoległe gałęzie. W pierwszej z nich przepływa przez rezystor R1 i diodę LED1, a w drugiej przez rezystor R2 i diodę LED2.



Fotografia 7. Zmontowany układ; a) widok od strony komponentów, b) widok od strony lutowania



Rysunek 10. Schemat ideowy układu

eprasa.pl 17a47aa7e2

Następnie obie gałęzie łączą się i prąd wraca do ujemnego bieguna baterii (GND). Obie diody świecą do chwili wyłączenia przełącznika SW2.

Drugim elementem sterującym jest przycisk chwilowy SW1. Jest on połączony równolegle ze stykami przełącznika suwakowego SW2. Oznacza to, że po naciśnięciu przycisku zasilanie zostaje doprowadzone do układu nawet wtedy, gdy przełącznik SW2 znajduje się w pozycji wyłączenia. Diody LED świecą jednak tylko przez czas naciskania przycisku. Po jego zwolnieniu obwód zostaje ponownie przerwany i diody gasną.

Takie rozwiązanie umożliwia korzystanie z latarki na dwa sposoby. Gdy potrzebne jest długotrwałe oświetlenie, wystarczy przesunąć przełącznik suwakowy SW2 w pozycję włączenia. Jeżeli światło potrzebne jest tylko na chwilę, wygodniej nacisnąć przycisk SW1, bez zmiany położenia przełącznika suwakowego. Takie rozwiązanie często spotyka się w latarkach, które oprócz zwykłego włącznika mają również przycisk chwilowego załączania światła.

Rezystory R1 i R2 o wartości 47 Ω ograniczają prąd płynący przez diody LED, chroniąc je przed uszkodzeniem. Każda dioda ma własny rezystor, dzięki czemu prąd rozdziela się równomiernie i obie diody świecą z podobną jasnością. W miarę rozładowywania baterii napięcie zasilania maleje, dlatego prąd płynący przez diody stopniowo się zmniejsza, a światło staje się coraz słabsze.

Prosty układ jest doskonałą okazją do bliższego przyjrzenia się zagadnieniom, na które przy bardziej rozbudowanych projektach zwykle brakuje czasu. W tym przypadku warto zwrócić uwagę na dwa tematy. Pierwszym jest dobór wartości rezystorów szeregowych ograniczających prąd diod LED, drugim natomiast – przypomnienie zagadnienia rezystancji wewnętrznej baterii.

Rezystory szeregowe ograniczające prąd diod LED

Rezystory R1 i R2 ograniczają prąd płynący przez diody LED. Bez nich diody zostałyby podłączone niemal bezpośrednio do baterii, a prąd ograniczałaby jedynie rezystancja wewnętrzna baterii oraz rezystancja przewodów i połączeń. W większości przypadków prowadziłoby to do przepływu zbyt dużego prądu, który mógłby uszkodzić diody LED. Dlatego praktycznie każda dioda LED zasilana ze źródła napięciowego wymaga zastosowania rezystora szeregowego.

Warto zastanowić się, skąd bierze się wartość tego rezystora. Załóżmy, że zestaw trzech nowych baterii AAA ma napięcie około 4,8 V. Biała dioda LED podczas świecenia odkłada na swoich zaciskach napięcie około 3,2 V. Oznacza to, że z całkowitego napięcia zasilania tylko część przypada na diodę. Pozostałe napięcie musi odłożyć się na rezystorze szeregowym. Można je obliczyć odejmując napięcie diody od napięcia baterii:

$$U_R = U_{BAT} - U_{LED}$$

Po podstawieniu wartości otrzymujemy:

$$U_R = 4,8V - 3,2V = 1,6V$$

Oznacza to, że na rezystorze odkłada się napięcie około 1,6 V. Z prawa Ohma wiadomo, że prąd płynący przez rezystor jest równy napięciu podzielonemu przez jego rezystancję:

$$I = \frac{U_R}{R}$$

Po podstawieniu wartości otrzymujemy:

$$I = \frac{1,6V}{47\Omega} \approx 0,034A \approx 34mA$$

Jest to jednak tylko wynik teoretyczny. Obliczenie wykonaliśmy zakładając, że napięcie baterii przez cały czas wynosi 4,8 V. W rzeczywistym układzie tak nie jest. Jak zostanie pokazane w kolejnym akapicie, każda bateria ma swoją rezystancję wewnętrzną. Po włączeniu latarki przez baterie zaczyna płynąć prąd, dlatego część napięcia odkłada się właśnie na tej rezystancji. W rezultacie napięcie dostępne na zaciskach baterii maleje. Załóżmy, że po włączeniu obu diod spadnie ono z 4,8 V do 4,65 V. Wówczas na rezystorze pozostanie już tylko:

$$U_R = 4,65V - 3,2V = 1,45V$$

a prąd jednej diody wyniesie:

$$I = \frac{1,45V}{47\Omega} \approx 0,031A \approx 31mA$$

Jest to wartość bliższa temu, co rzeczywiście występuje w gotowym układzie. Wraz z rozładowywaniem baterii napięcie będzie dalej stopniowo malało, a więc zmniejszy się również napięcie odkładające się na rezystorach i prąd płynący przez diody LED. Z tego powodu latarka będzie świeciła coraz słabiej.

Można zadać pytanie, dlaczego autor projektu zastosował rezystory o stosunkowo niewielkiej wartości 47 Ω, zamiast na przykład 68 Ω lub 100 Ω. Odpowiedź jest prosta – w latarce najważniejsza jest jasność świecenia. Mniejsza rezystancja powoduje większy prąd, a więc również większą jasność diod, szczególnie wtedy, gdy baterie nie są już całkowicie nowe. W praktyce autor zapewne dobrał tę wartość doświadczalnie. Zmontował układ, sprawdził jego działanie z diodami dołączonymi do zestawu i uznał, że przy rezystorach 47 Ω uzyskuje najlepszy kompromis pomiędzy jasnością świecenia, czasem pracy baterii oraz niezawodnym działaniem całej latarki. Dzięki temu światło pozostaje intensywne przez znaczną część czasu pracy zestawu baterii, mimo że ich napięcie stopniowo maleje.

Rezystancja wewnętrzna baterii

Każda rzeczywista bateria ma pewną rezystancję wewnętrzną, która powoduje spadek napięcia podczas przepływu prądu. Można ją wyobrazić sobie jako niewielki rezystor połączony szeregowo z idealnym źródłem napięcia. Gdy bateria nie zasila żadnego odbiornika, przez jej rezystancję wewnętrzną nie płynie prąd, dlatego na zaciskach mierzymy pełne napięcie. Po podłączeniu obciążenia zaczyna płynąć prąd, na rezystancji wewnętrznej pojawia się spadek napięcia, a napięcie dostępne na zaciskach baterii maleje.

Im większa rezystancja wewnętrzna, tym większy spadek napięcia pod obciążeniem. Z tego powodu zużyta bateria może nadal wskazywać na woltomierzu około 1,5 V, jednak po podłączeniu odbiornika jej napięcie gwałtownie maleje, co może uniemożliwić jego prawidłową pracę.

Z kolei nowa bateria, mierzona bez obciążenia, typowo ma napięcie nieco wyższe od nominalnego, na przykład około 1,6 V zamiast 1,5 V. Nie jest to wada ani oznaka nieprawidłowej pracy. Po podłączeniu typowego obciążenia, na przykład układu z żarówką lub diodami LED, napięcie zwykle obniża się do wartości zbliżonej do napięcia nominalnego, czyli około 1,5 V. Jest to naturalne zjawisko wynikające z niewielkiego spadku napięcia na rezystancji wewnętrznej baterii podczas przepływu prądu.

Jak wyznaczyć rezystancję wewnętrzną baterii?

Rzeczywistą baterię można opisać za pomocą prostego modelu zastępczego: idealnego źródła napięcia połączonego szeregowo z rezystancją wewnętrzną Rw. Rezystancja ta nie jest osobnym elementem znajdującym się w baterii, lecz przedstawia łącznie zjawiska zachodzące w jej elektrodach, elektrolicie i połączeniach wewnętrznych. Gdy do baterii nie jest podłączony odbiornik, prąd praktycznie

eprasa.pl 17a47aa7e2

nie płynie. Na rezystancji wewnętrznej nie występuje więc zauważalny spadek napięcia i woltomierz wskazuje napięcie baterii bez obciążenia U_o. Po włączeniu odbiornika zaczyna płynąć prąd I. Zgodnie z prawem Ohma na rezystancji wewnętrznej powstaje spadek napięcia:

$$U_w = I \cdot R_w$$

Napięcie na zaciskach obciążonej baterii U jest mniejsze od napięcia zmierzonego bez obciążenia U_o. Różnica tych napięć jest właśnie spadkiem napięcia na rezystancji wewnętrznej:

$$U_w = U_0 - U$$

Możemy więc zestawić oba równania:

$$U_0 - U = I \cdot R_w$$

Chcemy obliczyć R_w, dlatego dzielimy obie strony równania przez prąd I:

$$R_w = \frac{U_0 - U}{I}$$

gdzie:

R_w – rezystancja wewnętrzna baterii,

U_0 – napięcie baterii bez obciążenia,

U – napięcie baterii podczas zasilania odbiornika,

I – prąd pobierany przez odbiornik.

Pomiary w omawianym układzie

Układ jest zasilany trzema bateriami AAA połączonymi szeregowo. Ich napięcia sumują się, dlatego nominalne napięcie całego zestawu wynosi: 3·1,5 V=4,5 V

W przypadku nowych baterii napięcie zestawu mierzone bez obciążenia może wynosić około 4,8 V.

Do wyznaczenia rezystancji wewnętrznej całego zestawu należy wykonać następujące pomiary:

- Najpierw należy wyłączyć diody LED i zmierzyć napięcie pomiędzy punktami +BAT i –BAT. Otrzymana wartość jest napięciem bez obciążenia U_0.
- Następnie należy włączyć diody LED i ponownie zmierzyć napięcie pomiędzy punktami +BAT i –BAT. Jest to napięcie pod obciążeniem U.
- Trzeba również zmierzyć całkowity prąd pobierany przez układ. Można tego dokonać na dwa sposoby:
  - Wyjąć jedną z trzech baterii z pojemnika. Następnie w miejsce wyjętej baterii trzeba podłączyć amperomierz i wyjętą baterię szeregowo, tak aby prąd płynął kolejno przez baterię, amperomierz i pozostałą część układu. W ten sposób miernik pokaże prąd pobierany przez cały układ.
  - Prąd można również obliczyć bez rozłączania przewodu zasilającego. W tym celu należy zmierzyć spadki napięcia na rezystorach R1 i R2. Prądy płynące przez poszczególne gałęzie wynoszą:

$$I_1 = \frac{U_{R_1}}{47\Omega} \text{ oraz } I_2 = \frac{U_{R_2}}{47\Omega}$$

a prąd całkowity płynący w obwodzie stanowi ich sumę

$$I = I_1 + I_2$$

Znając napięcie U_0 (diody LED odłączone), U (diody LED załączone) oraz całkowity prąd I można podstawić te liczby do wyprowadzonego wcześniej wzoru:

$$R_{wz} = \frac{U_0 - U}{I}$$

Przykładowe obliczenia

Załóżmy, że wykonano następujące pomiary:

U_0 = 4,8 V

U = 4,65 V

I = 40 mA = 0,04 A

Spadek napięcia wynosi:

U_0 – U = 4,8 V – 4,65 V = 0,15 V

Rezystancja wewnętrzna zestawu jest więc równa:

$$R_{wz} = \frac{0{,}15V}{0{,}04A} = 3{,}75\Omega$$

Jest to łączna rezystancja wewnętrzna trzech baterii, ich styków oraz połączeń w pojemniku. Jeżeli baterie są jednakowego typu, znajdują się w podobnym stanie i mają zbliżoną rezystancję wewnętrzną, można orientacyjnie obliczyć rezystancję jednej z nich:

$$R_w \approx \frac{R_{wz}}{3}$$

W podanym przykładzie:

$$R_w \approx \frac{3{,}75\Omega}{3} = 1{,}25\Omega$$

Jest to jednak tylko wartość średnia. Aby zmierzyć rezystancję wewnętrzną każdej baterii oddzielnie, należy zmierzyć napięcie na jej zaciskach bez obciążenia i podczas pracy układu. Prąd płynący przez każdą z trzech baterii połączonych szeregowo jest taki sam, dlatego dla każdej z nich można zastosować ten sam wzór:

$$R_{w1} = \frac{U_{01} - U_1}{I}$$

Podsumowanie

Mamy nadzieję, że zbudowana własnoręcznie latarka będzie towarzyszyć Wam podczas wielu wakacyjnych wypraw. Niech pomaga odkrywać nowe miejsca, rozświetla leśne ścieżki, prowadzi przez obozowiska, ułatwia odnalezienie zagubionego przedmiotu w namiocie i daje poczucie bezpieczeństwa wtedy, gdy wokół zapada ciemność. Choć jest niewielka, w wielu sytuacjach może okazać się jednym z najbardziej przydatnych elementów wakacyjnego wyposażenia.

Chcielibyśmy jednak, aby po zakończeniu budowy tej latarki pozostało z Wami coś jeszcze ważniejszego niż sama umiejętność lutowania czy wiedza o działaniu diod LED albo o rezystancji wewnętrznej. Wakacje są czasem przygód, zdobywania nowych doświadczeń i sprawdzania własnych możliwości. To dobrze. Warto jednak pamiętać, że prawdziwa odwaga nie polega na podejmowaniu niepotrzebnego ryzyka ani na udowadnianiu innym, że potrafimy zrobić coś bardziej niebezpiecznego od kolegów. Znacznie większą wartość ma umiejętność powiedzenia: „To nie jest dobry pomysł", gdy sytuacja zaczyna wymykać się spod kontroli.

Dbajcie o siebie nawzajem. Zwracajcie uwagę nie tylko na najmłodszych uczestników obozu czy wycieczki, ale również na starszych kolegów. Czasami właśnie ci najbardziej pewni siebie potrzebują kogoś, kto w odpowiednim momencie sprowadzi ich na ziemię i przypomni, że zdrowy rozsądek jest ważniejszy od chwilowych emocji. Nie bójcie się reagować, gdy widzicie, że ktoś chce zrobić coś niebezpiecznego. Prawdziwy przyjaciel nie zachęca do ryzyka – potrafi w porę powiedzieć „stop".

Niech troska o drugiego człowieka stanie się Waszym najlepszym wakacyjnym wyposażeniem. Latarka pomoże rozproszyć mrok wokół Was, ale jeszcze cenniejsze jest to, by swoją obecnością rozpraszać niepewność, strach i samotność innych. Czasem wystarczy podać rękę, oświetlić komuś drogę, poczekać na wolniejszego kolegę albo zapytać, czy wszystko jest w porządku. Takie drobne gesty potrafią znaczyć znacznie więcej niż najbardziej spektakularne wyczyny.

Życzymy Wam wakacji pełnych pięknych przygód, nowych przyjaźni i niezapomnianych wspomnień. Niech każda wyprawa kończy się szczęśliwym powrotem do domu, a wszystkie opowieści, które będziecie po niej snuć, będą wywoływały wyłącznie uśmiech. Pamiętajcie, że żadne wyzwanie, żadna rywalizacja, żaden zakład ani żadna sprawność nie są warte utraty zdrowia lub narażania czyjegoś życia.

Bezpieczeństwo, zdrowie i życie są zawsze najważniejsze. A troska o młodszego kolegę, starszą koleżankę i każdego człowieka, który znajduje się obok Was, niech będzie Waszym najwyższym wakacyjnym nakazem.

Czuwaj! ■

Mariusz Ciszewski

eprasa.pl 17a47aa7e2

Nakładka Sound to Light Color Shield dla OLEDUINO v2

Ten projekt to nakładka Sound-to-Light Color Shield zaprojektowana specjalnie dla modułu OLEDUINO-V2. Płytka zawiera niskonapięciowy przedwzmacniacz mikrofonowy oraz układ prostownika, który przetwarza przemienny sygnał audio (AC) na napięcie stałe (DC). Sygnał DC jest następnie podawany na pin wejścia analogowego (A1) modułu OLEDUINO-V2.

Gdy mikrofon rejestruje dźwięk, przedwzmacniacz generuje niewielkie impulsy DC odpowiadające sygnałowi audio. Mikrokontroler OLEDUINO-V2 odczytuje ten sygnał za pomocą swojego przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC) i przetwarza go w celu sterowania cyfrową taśmą LED RGB NeoPixel.

Na płytce umieszczono 3-pinowe złącze kołkowe (header), które umożliwia łatwe podłączenie taśmy LED. Użytkownicy mogą napisać własny kod, aby tworzyć różnorodne efekty, takie jak:

- Konwersja dźwięku na kolor
- Sterowanie włączaniem/wyłączaniem (ON/OFF) aktywowane dźwiękiem
- Wzory świetlne i animacje oparte na dźwięku

To ciekawy i wszechstronny projekt, który znajdzie zastosowanie w wielu kreatywnych projektach.

3-przewodowy przedwzmacniacz mikrofonu elektretowego

Ten 3-przewodowy przedwzmacniacz mikrofonowy został zaprojektowany przy użyciu wzmacniacza operacyjnego audio OPA1692, który charakteryzuje się niskim poborem prądu, niskim poziomem szumów oraz minimalnymi zniekształceniami. Dzięki temu idealnie nadaje się do zaawansowanych zastosowań z mikrofonami elektretowymi. Układ został zoptymalizowany pod kątem mikrofonów elektretowych wykorzystujących interfejs 3-przewodowy, co pozwala na uzyskanie doskonałej jakości dźwięku przy zachowaniu minimalnego zużycia energii.

Głównym przeznaczeniem tego przedwzmacniacza są bezprzewodowe systemy mikrofonowe, w których kluczowe znaczenie ma wysoka wierność dźwięku (high-fidelity) oraz długi czas pracy na jednym ładowaniu.

Niektóre projekty aktualnie dostępne tylko dla prenumeratorów EdW w rubryce DIY PLUS na www.elportal.pl:

1. Mini Power Monitor Shield dla OLEDUINO v2 z układem INA219
2. Uniwersalna nakładka sterownika silników (Motor Driver Shield) dla OLEDUINO v2
3. Płytka sterująca silnikami elektromagnetycznymi i prądu stałego do OLEDUINO v2
4. Moduł elektronicznej wagi do OLEDUINO v2
5. Wszechstronny odbiornik światłowodowy Versatile Link
6. Wszechstronny nadajnik światłowodowy Versatile Link
7. Bezprzewodowy kontroler samochodu-robota Bluetooth
8. Kontroler ramienia robotycznego wykorzystujący bezprzewodowego pada z konsoli PS3
9. 7-segmentowy mini zegar wykorzystujący PIC16F628A i DS1307 RTC
10. Światło LED oparte na czujniku zbliżeniowym
11. OLEDUINO – wyświetlacz OLED kompatybilny z Arduino
12. Inteligentny regulator lutownicy – precyzyjny regulator grzałki
13. Wskaźnik poziomu paliwa z wyświetlaczem OLED
14. Bezprzewodowy odbiornik wilgotności i temperatury
15. Przerwania zewnętrzne (sprzętowe) i przerwania zegara w MicroPython
16. Laserowy czujnik odległości z wyświetlaczem OLED i RP2040
17. Inklinometr z 17-segmentowym wyświetlaczem słupkowym
18. Izolowany repeater USB – USB 2.0
19. Knight Rider Light – 16 diod LED dużej mocy (kompatybilny z Arduino)
20. Dźwięk do kolorowych efektów świetlnych (kompatybilny z Arduino)
21. Nowy i ulepszony licznik Geigera – teraz z Wi-Fi!
22. Detektor zalania
23. Lampa nastrojowa LED o dużej mocy
24. Kontroler dzwonów kościelnych
25. Arduino Nano – włączanie/wyłączanie urządzeń za pomocą pilota na podczerwień (dwa kanały)
26. Lampa sufitowa LED z czujnikiem ruchu PIR – kompatybilna z Arduino
27. Inteligentny ściemniacz LED z Bluetooth – 4-kanałowy włącznik/wyłącznik Bluetooth
28. Czterokanałowy izolator cyfrowy, wzmocniony, szybki, o niskim poborze mocy
29. Sterowanie prędkością, kierunkiem i zatrzymaniem silnika DC z modułem RF NRF24L01
30. Nadajnik zdalnego sterowania z pojedynczym joystickiem wykorzystujący NRF24L01
31. 8-kanałowy zdalny nadajnik RF z protokołami: Holtek i szeregowym
32. 8-kanałowy zdalny odbiornik RF z protokołami: Holtek i szeregowym
33. Pojemnościowy czujnik wilgotności do konwertera wyjścia analogowego
34. Mostek H dla wysokiej mocy szczotkowego silnika prądu stałego z czujnikiem prądu
35. Przetwornica DC-DC buck 12...75 V na 10 V na wyjściu
36. Czujnik prądu low-side 10 μA...10 mA
37. Kontroler ramienia robota z bezprzewodowym pilotem PS3
38. Termiczny czujnik masowego przepływu powietrza – anemometr stałotemperaturowy
39. Precyzyjny wzmacniacz transimpedancyjny z przełączanym integratorem
40. Wysokowydajny monofoniczny wzmacniacz audio klasy D o mocy 20 W

Miesięcznik „**Elektronika dla Wszystkich**”
(12 numerów w roku) jest wydawany we współpracy z kilkoma redakcjami zagranicznymi

Wydawnictwo:
AVTKorporacja Sp. z o.o.
03-197 Warszawa, ul. Leszczynowa 11
tel. 22 257 84 99, e-mail: avt@avt.pl

Wydawca:
Wiesław Marciniak

Redaktor naczelny:
Mariusz Ciszewski
mariusz.ciszewski@elportal.pl

Adres redakcji:
03-197 Warszawa, ul. Leszczynowa 11
e-mail: edw@elportal.pl, www.elportal.pl

Dział reklamy:
Katarzyna Gugała
katarzyna.gugala@elportal.pl, tel. 22 257 84 64

Szef Pracowni Konstrukcyjnej:
Jakub Sobański
jakub.sobanski@elportal.pl

Sekretarz redakcji:
Dariusz Welik
dariusz.welik@elportal.pl

DTP, redakcja strony internetowej www.elportal.pl:
MAD Sp. z o.o.

Prenumerata:
W Wydawnictwie AVT, e-mail: prenumerata@avt.pl
tel. 22 257 84 22, (godz. 10:00–14:00)
www.ulubionykiosk.pl

Copyright AVTKorporacja Sp. z o.o., Warszawa, ul. Leszczynowa 11. Projekty publikowane w „Elektronice dla Wszystkich” mogą być wykorzystywane wyłącznie do własnych potrzeb. Korzystanie z tych projektów do innych celów, zwłaszcza do działalności zarobkowej, wymaga zgody redakcji „Elektroniki dla Wszystkich”. Przedruk oraz umieszczanie na stronach internetowych całości lub fragmentów publikacji zamieszczanych w „Elektronice dla Wszystkich” jest dozwolone wyłącznie po uzyskaniu pisemnej zgody redakcji. Redakcja nie odpowiada za treść reklam i ogłoszeń zamieszczanych w „Elektronice dla Wszystkich”.

eprasa.pl 17a47aa7e2

TRZECIARĘKA ZD-11P
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk – uchwyt z latarką, ZD11P

TRZECIARĘKA ZD-11P-1
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk – uchwyt z latarką i lupą, ZD11P-1

TRZECIARĘKA SN-394
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk z lupą 50 mm, przykręcany do blatu Proskit SN-394

BESTSELLERY sklepu AVT – sklep.avt.pl

Trzecia ręka

Rabat dla Czytelników EdW przy zakupie podaj kod EdW2505TR **–3%**

Rabat dla Prenumeratorów EdW przy zakupie podaj numer prenumeraty **–6%**

TRZECIARĘKA ZD-11M-1
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk – z uchwytem na szpulkę cyny, ZD11M-1

TRZECIARĘKA ZD-11M-2
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk – uchwyt z lupą i podświetleniem LED ZD11M-2

TRZECIARĘKA ZD-11M-3
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk – uchwyt z lupą i podświetleniem LED ZD-11M-3

TRZECIARĘKA ZD-11M
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk – uchwyt ZD11M

TRZECIARĘKA SN-392
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka” z lupą 90 mm, Proskit SN-392

TRZECIARĘKA
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka” z lupą 60 mm

epresa.pl 17a47aa7e2

KURS PRAKTYCZNY AI

Praktyczne podejście. Zero marketingowej mgły!

Zamów na UlubionyKiosk.pl

eprasa.pl 17a47aa7e2