Edukacja w EdW dla szkół i uczelni:
Wykład 47: Praca z impulsami

JUNIOR



strona 81

ELEKTRONIKA dla wszystkich

nr 11/2026 (370) • listopad • www.elportal.pl

DIY PLUS tylko dla prenumeratorów

PROJEKTY dla elektroników

- Analizator sygnałów mieszanych na Raspberry Pi Pico
- Symulator szumu fal morskich
- Komputer Pico – terminal z modułem Raspberry Pi

DIY dla wszystkich

- Bezbateryjny wyświetlacz e-papierowy
- Pomiar pH w systemie hydroponicznym
- Zliczanie drobnych elementów z wykorzystaniem platformy Edge Impulse

TUTORIALE

- Nauka elektroniki z modułem ESP32, część 4. Wyświetlacze LED
- Chirurgia obwodowa: Rezystancja sterowana elektronicznie, część 4
- Audio OUT: Dyskretny wzmacniacz operacyjny, część 1

Analizator sygnałów mieszanych



Symulator szumu fal morskich

ISSN 1425-1698 Index 33362X
9 771425 169269 1 1 >
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 fb05997b40



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

eprasa.pl fb05997b40

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

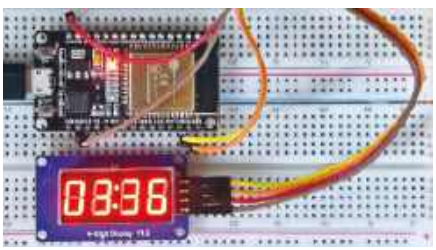
ELEKTRONIKA dla wszystkich

Listopad 2026 • 11 (370)











Projekty dla elektroników:

Analizator sygnałów mieszanych na Raspberry Pi Pico 8

Symulator szumu fal morskich 22

Komputer Pico – terminal z modułem Raspberry Pi 30

Tutoriale:

Nauka elektroniki z modułem ESP32, część 4. Wyświetlacze LED 42

Chirurgia obwodowa: Rezystancja sterowana elektronicznie, część 4 50

Edukacja w EdW dla szkół i uczelni: Wykład 47: Praca z impulsami 54

Audio OUT: Dyskretny wzmacniacz operacyjny, część 1 60

DIY dla wszystkich:

Bezbateryjny wyświetlacz e-papierowy 68

Pomiar pH w systemie hydroponicznym 72

Zliczanie drobnych elementów z wykorzystaniem

platformy Edge Impulse 78

Junior:

Dwudzieste dziewiąte spotkanie z najmłodszymi pasjonatami elektroniki . 81

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

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

Procesor Dźwięku z Efektem 3D 91

Bezprzewodowy monitor natężenia światła – nadajnik 91

Rubryki stałe:

Prenumerata 3

Od redakcji 5

Poczta 6

eprasa.pl fb05997b40

A za miesiąc w grudniowym EdW



Gwiazda RGB LED
Osiemdziesiąt diod WS2812B na białej płytce w kształcie ośmioramiennej gwiazdy potrafi stworzyć znacznie więcej niż jeden świetlny efekt. Układ oferuje 12 wzorów, cztery palety barw, ręczne lub automatyczne przełączanie oraz regulację jasności z automatycznym przyciemnianiem według oświetlenia otoczenia. Artykuł pokazuje budowę, uruchomienie i zasadę działania konstrukcji.

Sterownik nadwyżek energii z instalacji fotowoltaicznej do podgrzewacza wody, część 1
Nadwyżka energii z instalacji fotowoltaicznej może zasilać grzałkę elektrycznego podgrzewacza wody zamiast trafiać do sieci. Opisany sterownik odczytuje z falownika przez Modbus dane o mocy oddawanej do sieci i reguluje moc grzałki sygnałem PWM oraz triakiem załączanym w pobliżu przejścia napięcia przez zero. Pierwsza część przedstawia zasadę działania, układ i montaż płytki drukowanej.

Krótkofalowy odbiornik SSB, część 1
Czy w czasach tanich odbiorników SDR warto budować analogowy odbiornik krótkofalowy? Pierwsza część omawia TRF, superheterodynę, metodę fazową Hartleya i układ Weavera, prowadząc do wyboru superheterodyny SSB. Opisany odbiornik obejmuje pasmo 3...30 MHz, ma cyfrowe strojenie, odbiera USB i LSB oraz oferuje regulację wzmocnienia RF i blokadę szumów. Pokazano też schematy płytki sterującej i płytki RF.

Dla studentów i uczniów:
garść technicznych tutoriali

Dla szukających inspiracji:
ciekawe projekty DIY

Dla najmłodszych:
kolejny zestaw z serii AVTEDU

W kioskach od 27 listopada

Po zmroku



Listopadowe wieczory mają tę zaletę, że łatwiej wtedy docenić światło. Lampka nad biurkiem, świecący wyświetlacz czy diody LED na właśnie uruchamianej płytce przyciągają uwagę bardziej niż zwykle. Dla elektronika to także dobry pretekst, by usiąść przy warsztatowym stole, podłączyć oscyloskop albo wreszcie zająć się układem, który od dawna czekał na spokojną chwilę.

A kiedy już zabieramy się do pomiarów, często próbujemy zobaczyć to, czego gołym okiem dostrzec nie sposób. Richard Palmer proponuje analizator sygnałów mieszanych oparty na module Raspberry Pi Pico, pozwalający jednocześnie obserwować przebiegi cyfrowe i analogowe. Blok PIO, przetwornik ADC i program PulseView pomagają zrozumieć, co rzeczywiście dzieje się w badanym układzie.

Jos Verstraten w swoim artykule poświęconym pracy z impulsami pokazuje, jak wiele informacji można odczytać z przebiegu, który na pierwszy rzut oka wydaje się idealnie prostokątny. Spowolnione zbocza, zmiany poziomu sygnału czy oscylacje towarzyszące przełączaniu potrafią wiele powiedzieć o właściwościach badanego toru. Trzeba tylko wiedzieć, na co zwracać uwagę.

Jake Rothman zachęca z kolei, by nie ograniczać się do korzystania z gotowych „czarnych skrzynek". W artykule o wzmacniaczu operacyjnym zbudowanym z elementów dyskretnych pokazuje, jak analizować jego działanie i eksperymentować z tranzystorami, prądami pracy czy kompensacją częstotliwościową. To podejście szczególnie nam bliskie: nie tylko budować układy, ale też rozumieć zasady ich działania.

Ian Bell kontynuuje rozważania na temat potencjometrów cyfrowych. Zamiast mechanicznego suwaka mamy tu drabinkę rezystorową, elektroniczne przełączniki i sterowanie cyfrowe. Pojawia się też kwestia zapamiętywania nastawy po wyłączeniu zasilania. Niby drobiazg, a w praktyce może decydować o zachowaniu całego urządzenia.

W listopadowym numerze znajdzie się również coś dla zainteresowanych oszczędnym gospodarowaniem energią. Ashwini Kumar Sinha przedstawia bezbateryjny wyświetlacz wykorzystujący papier elektroniczny (E-paper), który zachowuje obraz bez zasilania. Energia potrzebna do jego aktualizacji może pochodzić z pola NFC telefonu lub bezprzewodowego pola zasilającego. Z kolei dr Geetali Saha i Dhruv Vachhani wykorzystują tryb głębokiego uśpienia układu ESP32 w urządzeniu do pomiaru pH roztworu hydroponicznego, które budzi się dopiero po dotknięciu czujnika.

Nie zabraknie też światła w bardziej klasycznej postaci. Mike Tooley prowadzi czytelnika od wyświetlacza siedmiosegmentowego do matryc LED 8×8, komunikatów tekstowych i elektronicznej „kostki" uruchamianej ruchem lub lekkim stuknięciem.

Tim Blythman pokazuje natomiast, jak rozwinąć wcześniejszy projekt terminala w samodzielny komputer. Komputer Pico obsługuje klawiaturę USB, monitor podłączany przez HDMI i pamięć masową, a dzięki PicoMite BASIC pozwala tworzyć własne programy.

A jeśli listopadowa szaruga obudzi w nas tęsknotę za latem, ciepłym piaskiem i szumem morza, John Clarke proponuje małą podróż nad wybrzeże. I to bez wychodzenia z domu! Jego analogowy symulator szumu morskich fal wykorzystuje biały szum, generatory obwiedni, filtry i modulatory, by z głośnika popłynęły dźwięki przypominające fale rozbijające się o brzeg. Wystarczy zamknąć oczy i pozwolić wyobraźni wrócić do wakacyjnych wspomnień. Bez mikrokontrolera, bez programowania – za to z solidną porcją analogowej elektroniki.

Zaglądamy również do naszych Juniorów, którzy tym razem postanowili spróbować swoich sił w technologii montażu powierzchniowego (SMT). To dla nich nowość, bo dotychczas pracowali głównie z elementami przewlekanymi. Teraz komponenty są znacznie mniejsze, a lutowanie wymaga nieco większej precyzji. Cieszy nas, że młodzi entuzjaści elektroniki nie boją się nowych wyzwań. Będziemy uważnie śledzić ich postępy i oczywiście mocno im kibicować. W końcu taka praca uczy cierpliwości i dokładności – cech przydatnych nie tylko przy lutowaniu. A kto wie, czy właśnie poza warsztatem nie okazują się najcenniejsze.

Jak widać, krótsze dni wcale nie oznaczają mniej okazji do eksperymentowania. A gdy za oknem robi się ciemno, światło właśnie uruchomionej diody LED potrafi cieszyć równie mocno, niezależnie od tego, czy jest to nasz pierwszy układ, czy kolejny z wielu.

Mariusz Ciszewski

eprasa.pl fb05997b40

Poczta

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.



Zaczęło się od jednej reklamówki...

Szanowna Redakcjo!

Ostatnio zabrałem się za porządki w piwnicy i trafiłem na kilka kartonów ze starymi czasopismami. Żona od razu zapytała, czy wreszcie zamierzam się ich pozbyć. Powiedziałem, że nie ma mowy, bo prędzej wyrzucę telewizor. Na szczęście nie kazała mi wybierać.

W jednym z kartonów znalazłem pierwsze numery „Elektroniki dla Wszystkich”, które dostałem od starszego kuzyna. Kiedyś przyniósł mi całą reklamówkę przeczytanych gazet i powiedział, żebym sobie przejrzał, bo może mnie coś zainteresuje. No i zainteresowało! Najpierw czytałem te numery po kilka razy, potem zacząłem regularnie kupować nowe w kiosku, a z czasem zdecydowałem się na prenumeratę. I nie żałuję ani jednej wydanej złotówki.

Jeszcze zanim zacząłem czytać EdW, kupowałem „64 Plus 4 & Amiga”, a później także „Commodore & Amiga”. Ech, to były czasy! Pamiętam, jak człowiek chodził do kiosku i wypatrywał kolejnego numeru. A potem pół nocy siedział nad komputerem, przepisując programy z gazety i szukając błędu, kiedy coś nie chciało działać. Ile było radości, gdy wreszcie się udało!

Co ciekawe, niedawno mój syn wyciągnął z kartonu kilka starych numerów EdW i zaczął wypytywać o różne układy. Skończyło się na tym, że odkopałem lutownicę i spędziliśmy razem całkiem ciekawy wieczór.

Tak sobie myślę, że dobrze zrobiłem, nie wyrzucając tych gazet. Tyle lat minęło, a nadal mogą się do czegoś przydać. I to nie tylko do wspominania dawnych czasów.

Pozdrawiam całą Redakcję,

Andrzej z Poznania

Red. Panie Andrzeju, dziękujemy za miły list! Jak widać, stare numery EdW potrafią jeszcze niejednego zaskoczyć. A wspólny wieczór z synem przy lutownicy to chyba najlepszy argument za tym, żeby jednak zostawić te kartony w piwnicy. Serdecznie pozdrawiamy!

Czy sztuczna inteligencja zastąpi projektantów PCB?

Szanowna Redakcjo!

Od kilkunastu lat zawodowo zajmuję się projektowaniem płytek drukowanych. Niedawno natrafiłem w Internecie na kilka filmów pokazujących rzekomo możliwości nowych modeli sztucznej inteligencji. Na jednym z nich system pracował niemal równocześnie nad schematem ideowym, rozmieszczeniem elementów na płytce, prowadzeniem ścieżek i modelem 3D gotowego urządzenia. Wszystko wyglądało tak, jakby zadanie wymagające od doświadczonego projektanta wielu dni, a czasem nawet tygodni pracy, można było wykonać w kilka minut.

Przyznam, że zrobiło to na mnie ogromne wrażenie, choć jednocześnie wzbudziło sporo wątpliwości. Nie wiem, czy oglądałem rzeczywistą demonstrację działającego narzędzia, starannie przygotowany pokaz, czy może po prostu materiał wygenerowany przez AI. Czy modele takie jak GPT-6 rzeczywiście zbliżają się do takich możliwości? A może podobne rozwiązania już istnieją, tylko nie są jeszcze powszechnie dostępne?

Zastanawiam się też nad przyszłością naszego zawodu. Czy projektantów elektroniki czeka podobna rewolucja jak kiedyś konstruktorów przechodzących od desek kreślarskich do programów CAD? Czy powinniśmy obawiać się utraty pracy, czy raczej dostrzegać w tych zmianach ogromny potencjał?

Osobiście chciałbym wierzyć w tę drugą możliwość. W końcu komputer nie sprawił, że przestaliśmy projektować. Pozwolił nam jedynie robić to szybciej i podejmować się znacznie bardziej skomplikowanych zadań. Może ze sztuczną inteligencją będzie podobnie? Może za kilka lat będziemy się dziwić, że kiedyś ręcznie wykonywaliśmy czynności, które dziś zajmują nam całe godziny?

Jestem ciekaw, jak Redakcja patrzy na te zmiany.

Pozdrawiam serdecznie,

Piotr M.

Red. Panie Piotrze, poruszył Pan temat, który zapewne coraz częściej pojawia się w rozmowach elektroników. Trudno się temu dziwić. Perspektywa skrócenia wielodniowej pracy do kilku minut może jednocześnie fascynować i budzić niepokój.

Zacznijmy jednak od filmów prezentowanych w Internecie. Nie każdy efektowny pokaz jest dowodem, że przedstawione narzędzie potrafi samodzielnie zaprojektować kompletną, poprawnie działającą płytkę drukowaną. Czasami oglądamy rzeczywiste możliwości oprogramowania, ale w starannie dobranych warunkach. Innym razem pominięto nieudane próby, ręczne poprawki lub wcześniejsze przygotowanie projektu. Bez dostępu do plików źródłowych

eprasa.pl fb05997b40

i możliwości samodzielnego powtórzenia eksperymentu trudno ocenić, ile pracy rzeczywiście wykonała sztuczna inteligencja.

Nie oznacza to jednak, że cała ta rewolucja jest tylko efektowną reklamą. Sztuczna inteligencja może już wspomagać wiele czynności związanych z projektowaniem elektroniki: analizowanie dokumentacji, tworzenie skryptów automatyzujących pracę, przygotowywanie zestawień elementów czy sprawdzanie wybranych aspektów projektu. Co więcej, istnieją już narzędzia wykorzystujące AI do automatycznego rozmieszczania komponentów i prowadzenia połączeń na płytkach drukowanych. Ich możliwości stale się rozwijają, choć uzyskane rezultaty nadal wymagają weryfikacji.

Trzeba przy tym pamiętać, że poprawne połączenie pól lutowniczych ścieżkami to jeszcze nie koniec projektowania. Pozostają zagadnienia integralności sygnałów, kompatybilności elektromagnetycznej, odprowadzania ciepła, bezpieczeństwa elektrycznego, możliwości produkcyjnych czy późniejszego serwisowania urządzenia. Projektant musi nie tylko wiedzieć, jak coś połączyć, ale również dlaczego właśnie w taki sposób.

Czy sztuczna inteligencja przejmie kiedyś znaczną część tej pracy? Nie sposób tego wykluczyć. Nie wiemy jednak, jak szybko będzie postępował rozwój tych narzędzi ani w jakim stopniu zmieni zapotrzebowanie na pracę projektantów. Z pewnością nie warto utożsamiać efektownej demonstracji z narzędziem gotowym do odpowiedzialnego zastosowania w produkcji.

Podoba nam się natomiast Pańskie porównanie z przejściem od desek kreślarskich do programów CAD. Historia techniki pokazuje, że nowe narzędzia potrafią radykalnie zmieniać sposób wykonywania pracy. Nie zawsze oznacza to jednak, że człowiek przestaje być potrzebny. Często zmienia się przede wszystkim charakter jego zadań.

Być może w przyszłości projektant będzie poświęcał mniej czasu na żmudne prowadzenie ścieżek, a więcej na określanie wymagań, podejmowanie decyzji konstrukcyjnych i weryfikację rezultatów. Być może jeden specjalista zyska możliwość realizowania projektów, które dotychczas wymagały zaangażowania całego zespołu. Ale równie możliwe, że automatyzacja części obowiązków zmieni rynek pracy i postawi przed nami nowe wymagania.

Dlatego zamiast pytać wyłącznie, czy sztuczna inteligencja zastąpi projektanta, warto zastanowić się również, jakim projektantem będzie można się stać dzięki sztucznej inteligencji.

Bo jeśli narzędzie pozwoli wykonać w kilka minut to, co wcześniej zajmowało tydzień, pozostanie jeszcze jedno, być może najciekawsze pytanie: co zrobimy z odzyskanym czasem?

Czy stary regulator mocy poradzi sobie z żarówkami LED?

Szanowna Redakcjo,

Do najmłodszych Czytelników z pewnością już nie należę. Pamiętam jeszcze czasy, kiedy człowiek cieszył się, że udało mu się zdobyć tyrystor, a porządny triak był niemal skarbem. Wtedy też zbudowałem regulator mocy według schematu znalezionego w którymś z czasopism elektronicznych. Czy był to „Radioelektronik”, „Nowy Elektronik”, czy może już „Elektronika dla Wszystkich”? Głowy nie dam, bo przez te wszystkie lata uzbierało mi się ich kilka roczników.

Regulator był prosty, oparty na triaku i sterowaniu fazowym. Służył mi głównie do regulacji jasności żarówki nad warsztatem. Działał znakomicie. Człowiek przekręcał potencjometr, żarówka przygasała, a przy okazji robiło się trochę mniej gorąco.

Niedawno znalazłem to urządzenie podczas porządkowania warsztatu. Włączyła mi się nostalgia, ale zaraz potem przyszła refleksja: przecież zwykłych żarówek praktycznie już nie używam. W całym domu mam LED-y.

I tu pojawia się pytanie. Czy taki stary regulator fazowy będzie współpracował ze współczesnymi żarówkami LED? Wiem, że niektóre są sprzedawane jako ściemnialne, ale czy to oznacza, że można je podłączyć do dowolnego regulatora? Czy wystarczy, że kupię żarówkę z napisem „dimmable”, i mój staruszek znów będzie miał zajęcie?

Trochę szkoda wyrzucać sprawne urządzenie tylko dlatego, że technika poszła naprzód. Z drugiej strony nie chciałbym, żeby eksperyment skończył się błyskami, trzaskiem i koniecznością kupowania kolejnej żarówki.

Pozdrawiam Redakcję i Czytelników

Stanisław, czytelnik od wielu lat

Red. Szanowny Panie Stanisławie!

Stare regulatory fazowe rzeczywiście potrafią służyć przez dziesięciolecia. Niestety, z żarówkami LED sprawa jest nieco bardziej skomplikowana niż z tradycyjnymi żarówkami z żarnikiem wolframowym.

Klasyczna żarówka stanowi obciążenie rezystancyjne. Regulator fazowy z triakiem opóźnia moment załączenia prądu w każdym półokresie napięcia sieciowego, zmniejszając w ten sposób moc dostarczaną do żarnika. Im później triak zostaje wyzwolony, tym słabiej świeci żarówka.

Współczesna żarówka LED zawiera natomiast elektroniczny układ zasilający diody. Nie zachowuje się więc jak zwykły rezystor. Co więcej, wiele takich źródeł światła w ogóle nie jest przystosowanych do współpracy ze ściemniaczami.

A co z żarówkami oznaczonymi jako „dimmable”? Tutaj mamy lepszą wiadomość. Niektóre z nich rzeczywiście mogą współpracować ze starszymi regulatorami fazowymi, ale nie ma takiej gwarancji. Decyduje konstrukcja układu zasilającego LED oraz samego regulatora.

Problemem bywa między innymi niewielki pobór prądu. Dawne ściemniacze projektowano z myślą o żarówkach o mocy kilkudziesięciu, a nawet kilkuset watów. Tymczasem współczesna żarówka LED pobiera często zaledwie kilka watów. Prąd może okazać się za mały, by zapewnić prawidłową pracę triaka. W rezultacie światło może migotać, skokowo zmieniać jasność albo całkowicie gasnąć przy pewnym ustawieniu potencjometru.

Dochodzi jeszcze kwestia rodzaju regulacji fazowej. Starsze konstrukcje triakowe wykorzystują zazwyczaj odcinanie początkowej części półokresu napięcia (leading-edge). Współczesne ściemniacze mogą również odcinać jego końcową część (trailing-edge). Nie każde źródło światła LED obsługuje obie metody.

Czy zatem warto spróbować? Naszym zdaniem najpierw warto odszukać schemat regulatora i sprawdzić, czy urządzenie jest bezpieczne, a jego parametry pozwalają na współpracę z wybranym źródłem światła. Sam napis „dimmable” nie wystarczy. Najlepiej kierować się wykazem kompatybilnych ściemniaczy udostępnianym przez producenta żarówki. Nie zalecamy eksperymentalnego podłączania starego, niesprawdzonego urządzenia do sieci 230 V.

A jeśli okaże się, że regulator nie współpracuje z LED-ami? Nie oznacza to przecież, że stał się bezużyteczny. Być może znajdzie jeszcze zastosowanie do regulacji mocy grzałki lub innego odbiornika o charakterze rezystancyjnym, oczywiście pod warunkiem, że pozwalają na to jego parametry i stan techniczny.

eprasa.pl fb05997b40

Analizator sygnałów mieszanych na Raspberry Pi Pico

Analizator sygnałów mieszanych to przyrząd, który w pracy elektronika nieraz okazuje się nieoceniony. Urządzenie to monitoruje i dekoduje sygnały magistral szeregowych oraz inne przebiegi logiczne, a jednocześnie rejestruje sygnały analogowe. Opisywany model, oparty na module Raspberry Pi Pico, zawiera 20 kanałów cyfrowych i trzy kanały analogowe.



Analizator logiczny stanowi podstawowe narzędzie do wyszukiwania błędów i uszkodzeń w układach cyfrowych, niezależnie od tego, czy chodzi o obwód logiczny o stałej topologii, czy też o system oparty na mikrokontrolerze. Elementy układów cyfrowych są obecnie łączone z mikrokontrolerami nie tylko poprzez magistralę równoległą, lecz również przez interfejsy szeregowe I²C, I³C, SPI i UART. Sygnały cyfrowe często wyzwalają przebiegi analogowe lub są przez nie wyzwalane. Obserwacja wszystkich tych sygnałów to typowy obszar zastosowania oscyloskopu sygnałów mieszanych (MSO).

Opisywany tu analizator nie ma wprawdzie ambicji bycia zaawansowanym oscyloskopem sygnałów mieszanych, tym niemniej zapewnia wszechstronną funkcjonalność analizatora logicznego przy możliwości synchronicznego rejestrowania i oglądania do trzech sygnałów analogowych. Ma zwartą konstrukcję i jest stosunkowo niedrogi.

Układ ogólny

Schemat blokowy układu przedstawiono na **rysunku 1**. Sercem jest moduł Raspberry Pi Pico. Szybki programowalny blok wejścia/wyjścia (PIO = Programmable Input/Output) układu RP2040 pobiera sygnały cyfrowe, a wbudowany w ten układ przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC) rejestruje przebiegi analogowe. Wszystkie sygnały są przekształcane do postaci szeregowej i przesyłane do komputera sterującego poprzez łącze USB.

Dekodowanie i wyświetlanie przebiegów odbywa się w programie open source PulseView.

Zarówno kanały analogowe, jak i cyfrowe są zabezpieczone przed przepięciami i dopasowane do wymaganych poziomów napięciowych wejść mikrokontrolera. W części cyfrowej zastosowano translatory logiczne i zabezpieczające diody Schottky'ego. Kanały analogowe wyposażono we wzmacniacze buforujące, zabezpieczenia diodowe, przełączniki AC/DC oraz potencjometry regulacji wzmocnienia.

Parametry

Podstawowym parametrem analizatora logicznego jest – tak jak w przypadku oscyloskopu cyfrowego – częstotliwość próbkowania, określająca maksymalną częstotliwość sygnału, jaki można prawidłowo wyświetlić, a zatem – co może istotniejsze – najmniejszy przyrost czasowy sygnału, jaki można rozróżnić.

Moduł Raspberry Pi Pico może próbkować do dwudziestu sygnałów cyfrowych z imponującą częstotliwością 240 milionów próbek na sekundę. W tym celu częstotliwość taktowania układu RP2040 została „podkręcona" ze standardowych 133 MHz do 240 MHz, co jednak mieści się w bezpiecznych granicach. Osiągnięta częstotliwość próbkowania zależy od liczby aktywnych kanałów oraz wymaganej liczby rejestrowanych próbek (patrz **tabela 1**). Maksymalna szybkość rejestracji spada, gdy ilość rejestrowanych danych przekracza pojemność wewnętrznego bufora mikrokontrolera i dane te muszą być na bieżąco przesyłane strumieniowo przez łącze USB. Więcej szczegółów można znaleźć w instrukcji obsługi zawartej w plikach do tego projektu (www.siliconchip.au/Shop/6/452).

Parametry analizatora

- ❒ 16 wejść cyfrowych w standardzie 1,8 V, 3,3 V lub 5 V, zabezpieczonych przed zbyt dużym napięciem
- ❒ 3 wejścia analogowe o dokładności nieco ponad 7 bitów, zabezpieczone przed zbyt dużym napięciem
- ❒ 4 dodatkowe wejścia cyfrowe w standardzie 3,3 V, zabezpieczone przed zbyt dużym napięciem
- ❒ Częstotliwość próbkowania sygnałów cyfrowych: 240 MHz
- ❒ Wejścia analogowe mają regulowaną czułość w zakresie 0,33...120 V_{pp} (wartość międzyszczytowa)
- ❒ Maksymalna wspólna częstotliwość próbkowania przetwornika analogowo-cyfrowego wynosi 2,4 MHz
- ❒ Wszechstronne oprogramowanie PulseView z funkcją dekodowania różnych protokołów szeregowych
- ❒ Zasilanie i podłączenie: przez USB

eprasa.pl fb05997b40

Przypis redaktora: Częstotliwość 240 MHz przekracza określoną przez producenta maksymalną częstotliwość 133 MHz dla układu RP2040 przy znamionowym napięciu rdzenia, a zatem jest wynikiem podkręcania układu.

Scalone przetworniki poziomów logicznych obsługują szesnaście wejść cyfrowych w standardzie 5 V, 3,3 V lub 1,8 V (D2...D17). Cztery ostatnie wejścia cyfrowe, D18...D21, nie są wyposażone w przetworniki poziomów i są przeznaczone dla sygnałów o poziomie logicznym 3,3 V.

Wszystkie wejścia analogowe i cyfrowe są zabezpieczone przed przepięciami dodatnimi i ujemnymi. Wejścia cyfrowe tolerują poziomy napięcia od –5 V do +20 V. Górną granicę wejściowego napięcia analogowego określa wytrzymałość kondensatora na wejściu, wynosząca 250 V napięcia stałego, choć ze względów bezpieczeństwa przyłożone sygnały nie powinny przekraczać 25 V wartości skutecznej i 60 V wartości szczytowej.

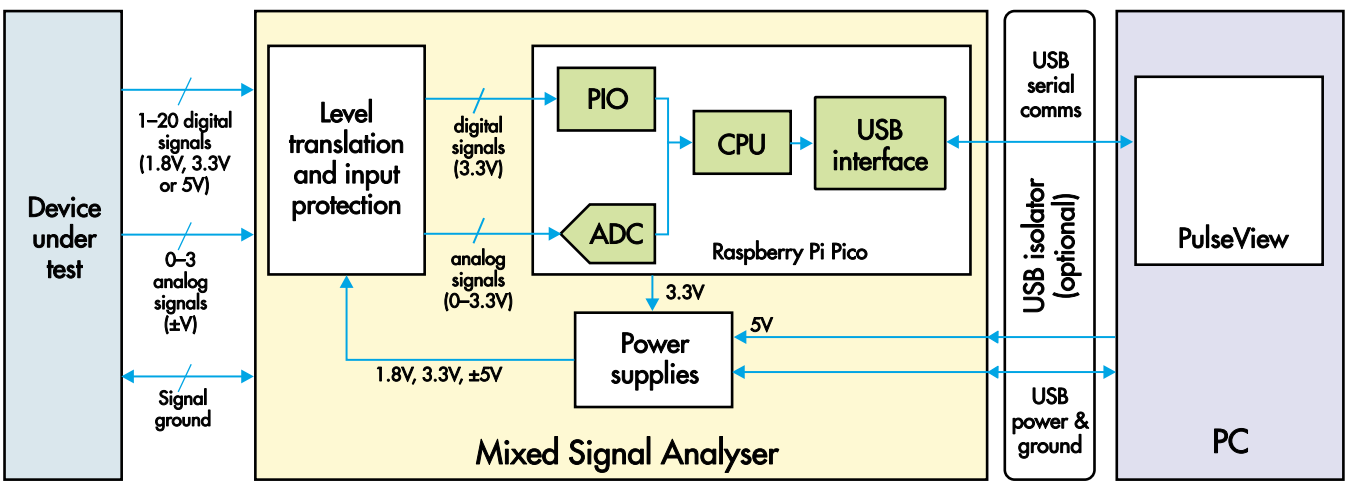
Sygnały analogowe mogą być sprzężone stałoprądowo lub zmiennoprądowo. Każdy kanał zawiera odpowiedni przełącznik wyboru. Maksymalna czułość wejść analogowych wynosi 330 mV dla pełnego zakresu. Wejścia są próbkowane z dokładnością nieco ponad 7 bitów, co przy maksymalnej czułości przekłada się na krok przetwarzania 2,5 mV.

Maksymalna częstotliwość próbkowania sygnałów analogowych jest ograniczona częstotliwością przetwarzania analogowo-cyfrowego wynoszącą 2,4 MHz. Częstotliwość ta jest dzielona między aktywne kanały analogowe (a zatem jeśli obserwujemy trzy kanały, to częstotliwość próbkowania spada do 800 kHz; przypis redaktora).

Program PulseView nie wygładza przebiegów analogowych. W tej sytuacji praktycznym minimum umożliwiającym wyświetlenie rozpoznawalnej fali sinusoidalnej jest pięć próbek na okres (**ekran 1**). Teoretycznie daje to szerokość pasma wynoszącą około 500 kHz przy rejestracji pojedynczego kanału analogowego, a 160 kHz, gdy włączone są wszystkie trzy kanały. Przy zbyt małej liczbie próbek na okres wyświetlanego sygnału, i jeśli okres ten nie jest całkowitą wielokrotnością okresu próbkowania, mogą pojawić się obrazy takie jak na **ekranie 2**. Punkty próbkowania w pobliżu szczytów sygnału występują za każdym

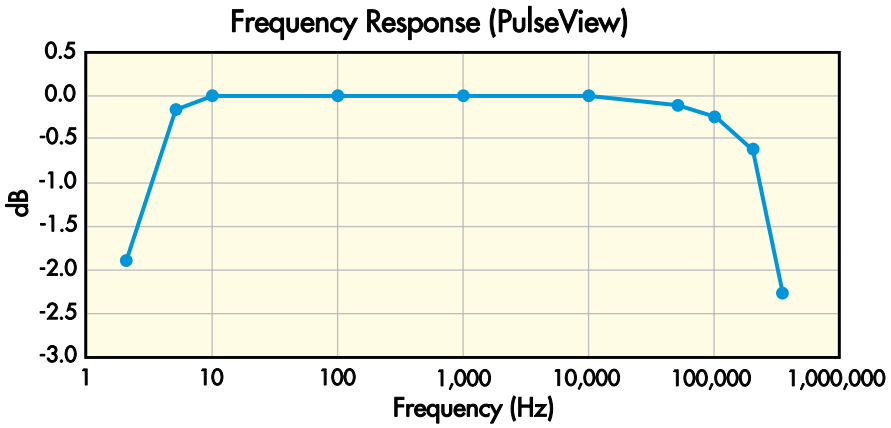
Tabela 1. Maksymalna częstotliwość próbkowania

liczba wejść cyfrowych	liczba wejść analogowych	Liczba próbek	maksymalna częstotliwość próbkowania	czynnik ograniczający
1...4	0	≤200k	240 Msps	PIO
1...4	0	>200k	500 ksps+	transmisja USB z kodowaniem RLE
5...7	0	≤100k	240 Msps	PIO
5...7	0	>100k	500 ksps+	transmisja USB z kodowaniem RLE
8...14	0	≤50k	240 Msps	PIO
8...14	0	>50k	250 ksps+	transmisja USB z kodowaniem RLE
15...20	0	<25k	240 Msps	PIO
15...20	0	≥25k	167 ksps+	transmisja USB z kodowaniem RLE
0	1	≤200k	2,4 Msps	przetwornik analogowo-cyfrowy
0	1	>200k	500 ksps	USB
0	2	≤100k	1,2 Msps	przetwornik analogowo-cyfrowy
0	2	>100k	250 ksps	USB
0	3	<67k	800 ksps	przetwornik analogowo-cyfrowy
0	3	≥67k	160 ksps	USB
1...7	1	≤100 k	2,4 Msps	przetwornik analogowo-cyfrowy
1...7	1	>100k	250 ksps	USB
1...7	2	<67k	1,2 Msps	przetwornik analogowo-cyfrowy
1...7	2	≥67k	160 ksps	USB
1...7	3	≤50 k	800 ksps	przetwornik analogowo-cyfrowy
1...7	3	>50k	125 ksps	USB
8...14	1	<67k	2,4 Msps	przetwornik analogowo-cyfrowy
8...14	1	≥67k	160 ksps	USB
8...14	2	≤50k	1,2 Msps	przetwornik analogowo-cyfrowy
8...14	2	>50k	125 ksps	USB
8...14	3	≤40k	800 ksps	przetwornik analogowo-cyfrowy
8...14	3	>40k	100 ksps	USB

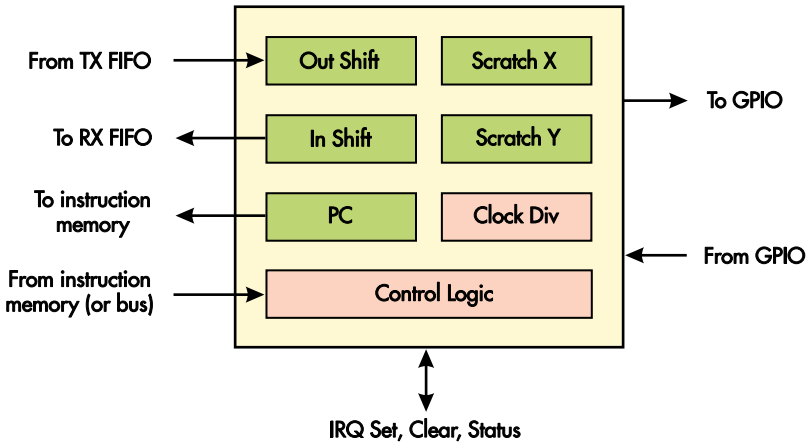


Rysunek 1. Sygnały cyfrowe i/lub analogowe są przed rejestracją przetwarzane w wewnętrznych blokach peryferyjnych mikrokontrolera Pico: PIO (cyfrowym) i ADC (analogowym). Rejestrowane dane są przesyłane przez USB do komputera głównego i wyświetlane w aplikacji open source PulseView

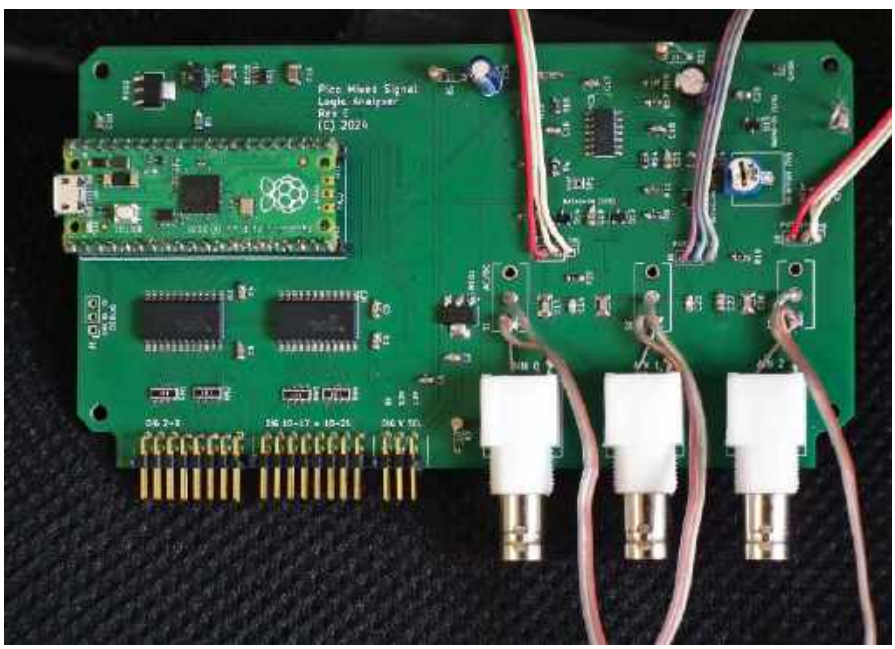
eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 2. Pasmo przenoszenia kanału analogowego w trybie zmiennoprądowym. Szerokość pasma w trybie stałoprądowym wynosi: przy nierównomierności 0,5 dB – 0...100 kHz, przy nierównomierności 2 dB – 0...300 kHz



Rysunek 3. Procesor wejścia/wyjścia PIO (Programmable Input/Output) mikrokontrolera Pico oferuje elastyczne możliwości interakcji z sygnałami z bardzo dużą prędkością, komunikując się z procesorem głównym poprzez kolejki FIFO



Górna strona prototypowej płytki drukowanej z okablowaniem panelu przedniego. W wersji ostatecznej kilka elementów przesunięto, by zrobić miejsce na przełączniki. Przewody są lutowane bezpośrednio do płytki drukowanej, bez złączy, dzięki czemu na potencjometry i przełączniki jest wystarczająco dużo miejsca

razem w nieco innym miejscu, a całość wygląda jak sygnał modulowany amplitudowo. Częstotliwość tej „modulacji" jest powiązana z resztą z dzielenia częstotliwości sygnału przez częstotliwość próbkowania.

Każdy kanał analogowy analizatora ma w trybie sprzężenia stałoprądowego płaską charakterystykę częstotliwościową w zakresie do 100 kHz z nierównomiernością +0/–0,5 dB, a do 300 kHz z nierównomiernością +0/–2 dB. W trybie sprzężenia zmiennoprądowego dolna granica pasma wynosi 2 Hz (–0,5 dB)/5 Hz (–2 dB); patrz **rysunek 2**.

Procesor wejścia/wyjścia

Wbudowany w układ RP2040 blok programowalnych wejść/wyjść (PIO) jest bardzo szybkim, uniwersalnym układem pomocniczym, zoptymalizowanym pod kątem wykonywania operacji wejścia/wyjścia (**rysunek 3**). Może on pracować z częstotliwością taktowania procesora głównego – w naszym przypadku podkręconą do 240 MHz.

Zestaw instrukcji procesora PIO obejmuje zaledwie dziewięć instrukcji. Maksymalna długość programu PIO to 32 instrukcje. Te ograniczenia nie są jednak istotne, ponieważ każde słowo instrukcji PIO może uruchamiać wiele czynności, dzięki czemu nawet złożone programy obsługi wejścia/wyjścia można utworzyć z niewielkiej liczby instrukcji. Na przykład funkcję interfejsu SPI można zrealizować za pomocą zaledwie trzech instrukcji PIO.

W naszym projekcie PIO wykonuje pętlę złożoną z jednej instrukcji: odczytuje dane z określonych pinów i przenosi je do ośmiostopniowej kolejki (FIFO) bloku PIO, skąd są przez procesor główny pobierane do dalszego przetwarzania. Kolejka ma szerokość 32 bitów. Jeśli liczba rejestrowanych wejść cyfrowych jest mniejsza niż 16, układ PIO automatycznie wpisuje do kolejki po kilka zestawów danych naraz.

Oprogramowanie

Oprogramowanie analizatora, opracowane przez autora posługującego się pseudonimem „pico-coder", składa się z kilku głównych elementów. Najpierw komunikuje się ono z programem PulseView, przekazując mu informacje na temat możliwości analizatora, a następnie przyjmuje instrukcje dotyczące liczby używanych wejść, częstotliwości próbkowania oraz rozmiaru rejestracji.

Po kliknięciu w programie PulseView przycisku „Run" analizator rozpoczyna proces zbierania danych i przesyłania ich do programu. Gdy program PulseView zgromadzi wystarczającą ich ilość, wysyła polecenie

eprasa.pl fb05997b40

wyłączenia modułu PIO i zatrzymania strumienia danych.

Wyzwalanie – czyli wybór początku zapisu strumienia danych – pozostawia się programowi PulseView. Realizacja tego zadania przy wyższych częstotliwościach próbkowania przekraczałaby możliwości analizatora.

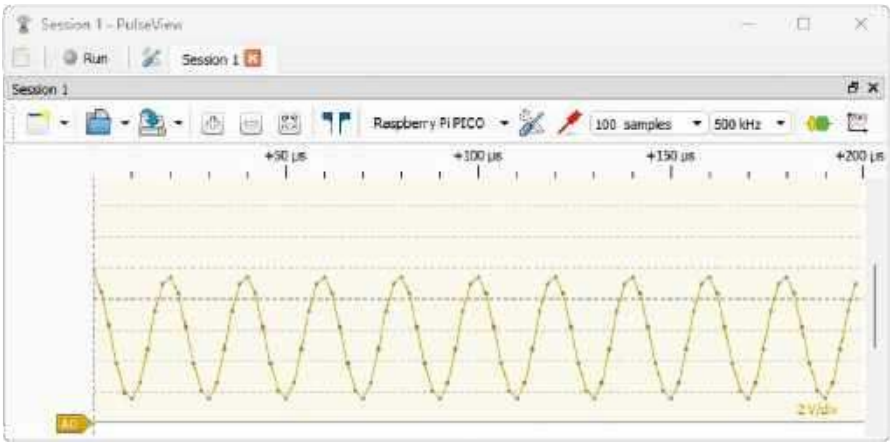
PIO umieszcza dane cyfrowe w kolejce FIFO, skąd są odczytywane przez procesor główny i przekształcane do postaci nadającej się do transmisji przez USB. W trakcie oczekiwania na transmisję próbki cyfrowe są przechowywane w innym buforze, wykorzystującym większość wewnętrznej pamięci RAM mikrokontrolera (264 kB). Rozmiar tego bufora określa maksymalną liczbę próbek sygnałów cyfrowych, które można zarejestrować, gdy częstotliwość rejestracji przekracza prędkość transmisji przez USB.

Urządzenie może pracować z pełną prędkością, gdy całkowity rozmiar pobieranych danych jest nie większy niż ilość pamięci RAM przeznaczonej na bufor. Podczas rejestrowania większej ilości danych prędkość akwizycji jest ograniczona maksymalną prędkością transmisji przez USB wynoszącą 400...800 kB/s. W konkretnym przypadku prędkość zależy od możliwości komputera sterującego.

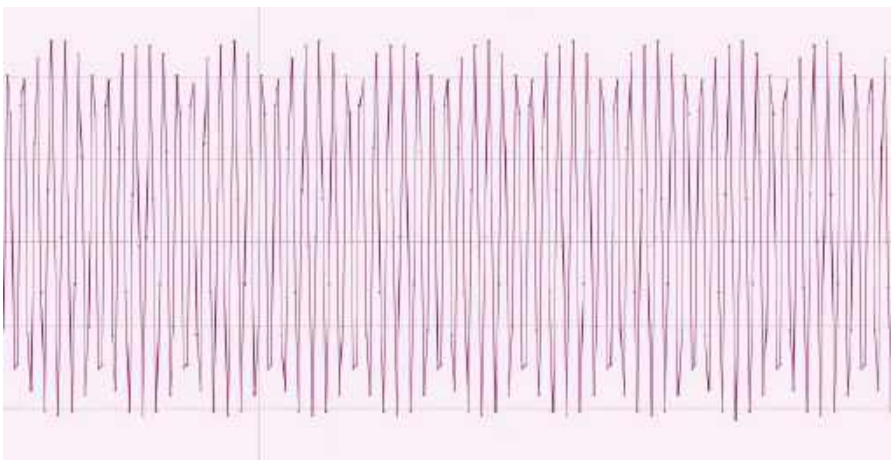
W przypadku sygnałów wyłącznie cyfrowych efektywna prędkość transmisji może ulec znacznemu zwiększeniu dzięki kompresji danych opartej na kodowaniu długości serii (*Run-Length Encoding*; RLE). W przypadkach, kiedy występują krótkie momenty aktywności sygnału cyfrowego przedzielane długimi okresami przerwy – jak na przykład w sygnale I²C na **ekranie 3** – kodowanie RLE poprawia efektywną prędkość transmisji nawet o kilka rzędów wielkości. Jeśli jednak rejestrowane są jakieś sygnały analogowe, kompresja nie jest stosowana.

Przebiegi analogowe są rejestrowane bezpośrednio przez wbudowany przetwornik analogowo-cyfrowy procesora przy użyciu próbkowania typu „round-robin” (naprzemiennego próbkowania kolejnych kanałów; przypis redaktora). Wyniki są zapamiętywane w kolejce. Przetwornik mikrokontrolera ma rozdzielczość dwunastobitową przy maksymalnej częstotliwości próbkowania wynoszącej 500 kHz. Niedoskonałości przetwornika w układzie scalonym zmniejszają jednak dokładność do nieco poniżej dziewięciu bitów.

Dzięki kilku sprytnym modyfikacjom oprogramowania (patrz forum Raspberry Pi: www.siliconchip.au/link/abwb) maksymalną częstotliwość próbkowania przetwornika ADC można zwiększyć do 2,4 MHz. Przy tak dużej częstotliwości dokładność spada do nieco ponad siedmiu bitów. W naszym przypadku kompromis polegający na zmniejszeniu dokładności na rzecz zwiększenia częstotliwości próbkowania jest uzasadniony. Należy pamiętać, że przeciętny tani oscyloskop cyfrowy dysponuje przetwarzaniem jedynie ośmiobitowym.



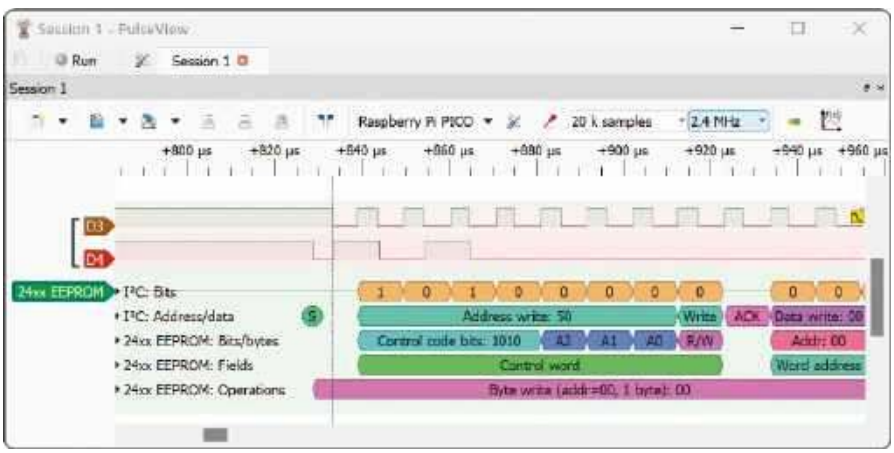
Ekran 1. Sygnał analogowy o napięciu 3 V i częstotliwości 50 kHz, zarejestrowany z częstotliwością próbkowania 500 kHz. Jest dziesięć próbek na okres, dzięki czemu sinusoidalny kształt sygnału daje się łatwo rozpoznać



Ekran 2. Sygnał sinusoidalny o częstotliwości 60 kHz, próbkowany z częstotliwością 250 kHz. Wygląda, jakby był modulowany amplitudowo. Jest to jednak po prostu skrajny przypadek skutków próbkowania, obecnych również na ekranie 1

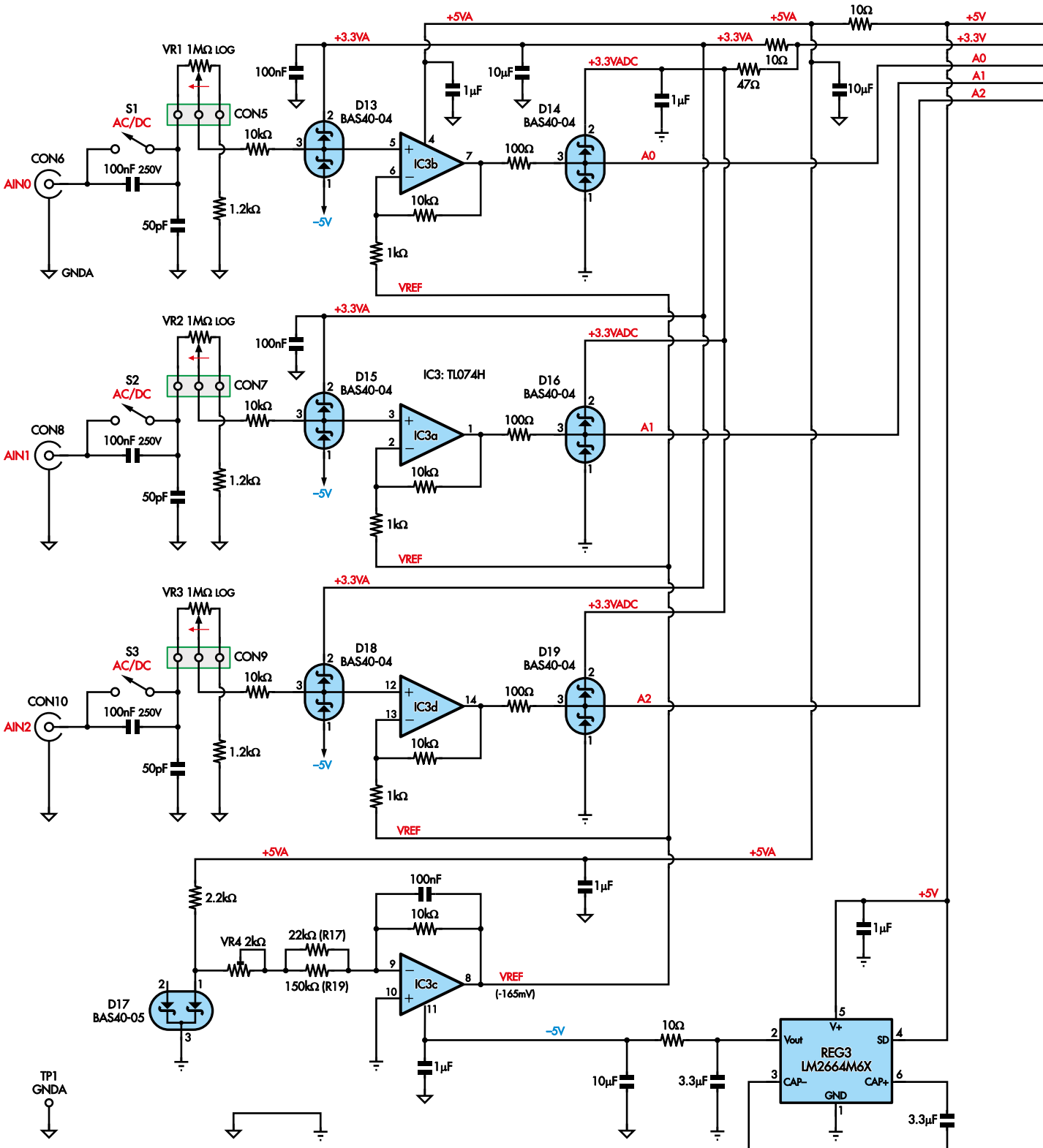
Szczegóły układowe

Pełny schemat układu przedstawiono na **rysunku 4**. Sygnały z pierwszych szesnastu wejść cyfrowych przechodzą przez dwa scalone translatory poziomów logicznych SN74LVCC3245ADW (IC1 i IC2). Są to układy



Ekran 3. Zrzut ekranu programu PulseView przedstawiający zdekodowany sygnał I²C odczytywany z pamięci szeregowej EEPROM przy częstotliwości zegara 400 kHz

eprasa.pl fb05997b40



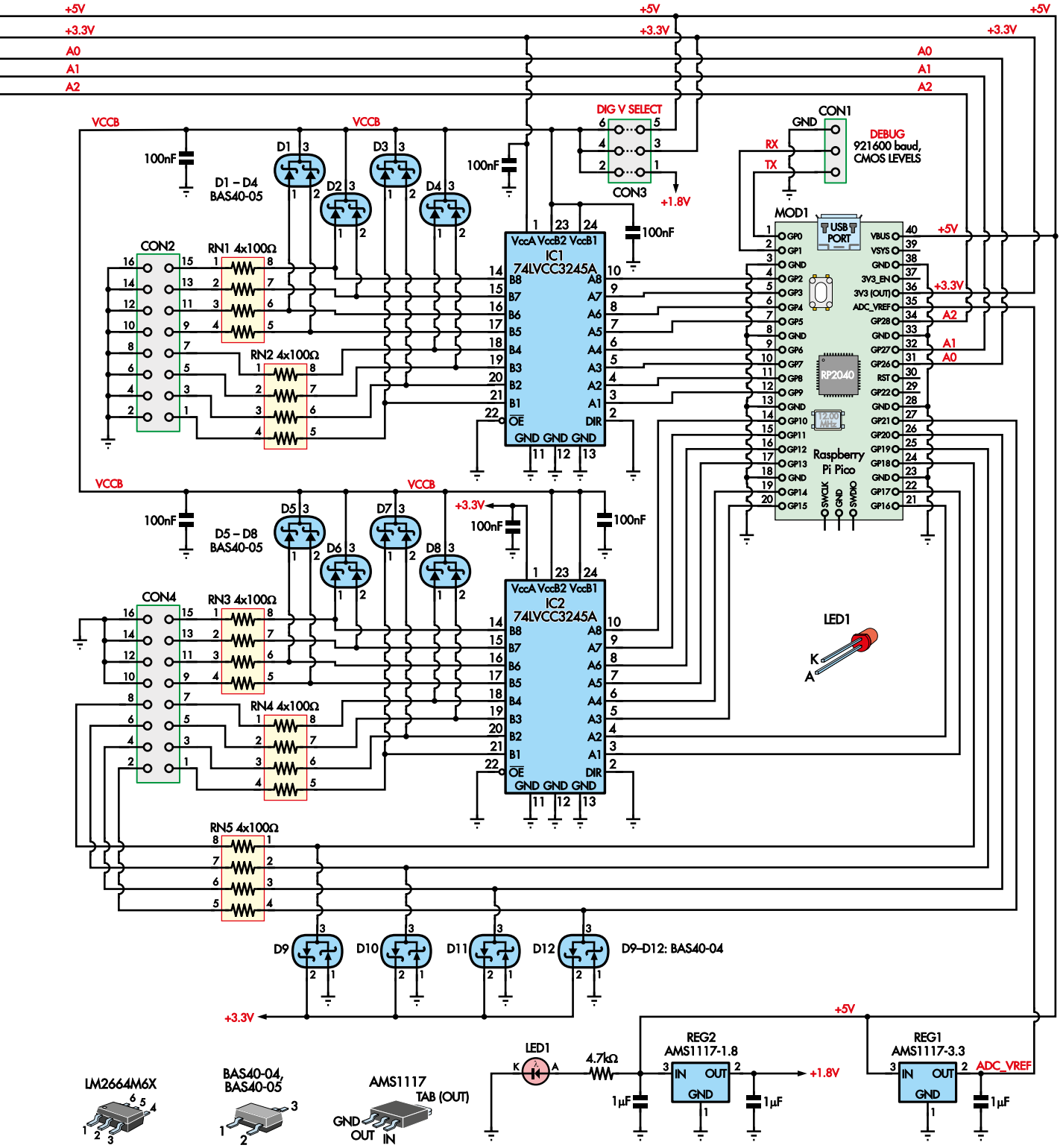
PICO MIXED SIGNAL LOGIC ANALYSER

o wyprowadzeniach zgodnych z 74xx245. Układy takie występują w różnych rodzinach logicznych. Możliwe jest zastosowanie rodziny innej niż LVC, o ile strona A może pracować w standardzie logicznym 3,3 V, a strona B akceptuje poziomy od 1,8 V do co najmniej 5 V.

Napięcie poziomów logicznych na wejściach (VCCB) wybiera się zworką w złączu CON3 (5 V lub 3,3 V z modułu Pico albo 1,8 V ze stabilizatora REG2). Napięcie to dochodzi również do katod diod zabezpieczających wejścia cyfrowe GP2...GP17.

Rozwiązaniem lepszym niż zworka byłby przełącznik wybierający jedno z trzech napięć. Jednak wszystkie przełączniki suwakowe typu SP3T oferowane przez głównych dostawców elementów działają na zasadzie „make-before-break” (nowe połączenie

eprasa.pl fb05997b40

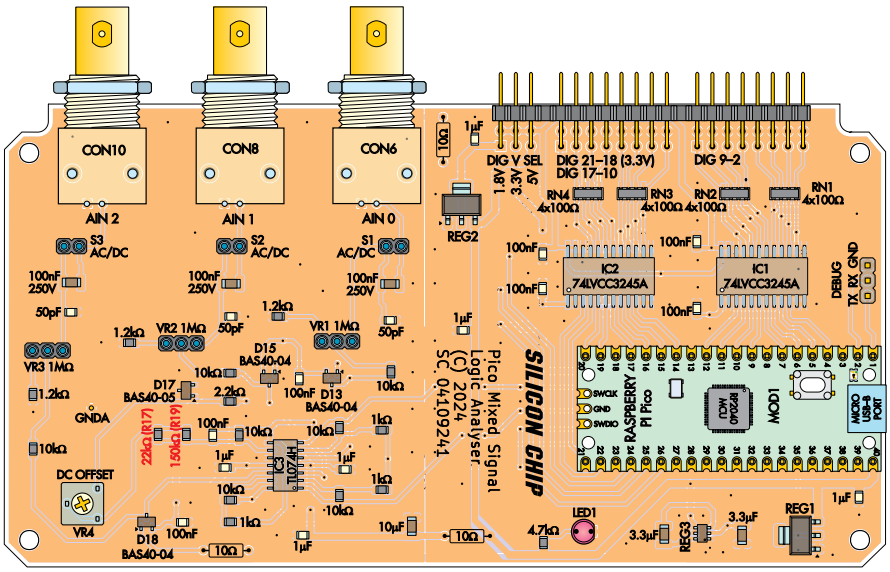


Rysunek 4. Zanim sygnały cyfrowe dotrą do translatorów poziomów logicznych (IC1 i IC2), przechodzą przez rezystory zabezpieczające i są przez diody Schottky'ego ograniczane na poziomie dodatniego napięcia zasilania. Podobne zabezpieczenie zawierają wejścia analogowe. Wejścia te są dodatkowo wyposażone w kondensatory szeregowe zapewniające sprzężenie zmiennoprądowe. Kondensatory można zewrzeć, uzyskując sprzężenie stałoprądowe. Wejścia analogowe zawierają ponadto potencjometry regulacji tłumienia oraz stopnie wzmacniające ze wzmacniaczami operacyjnymi

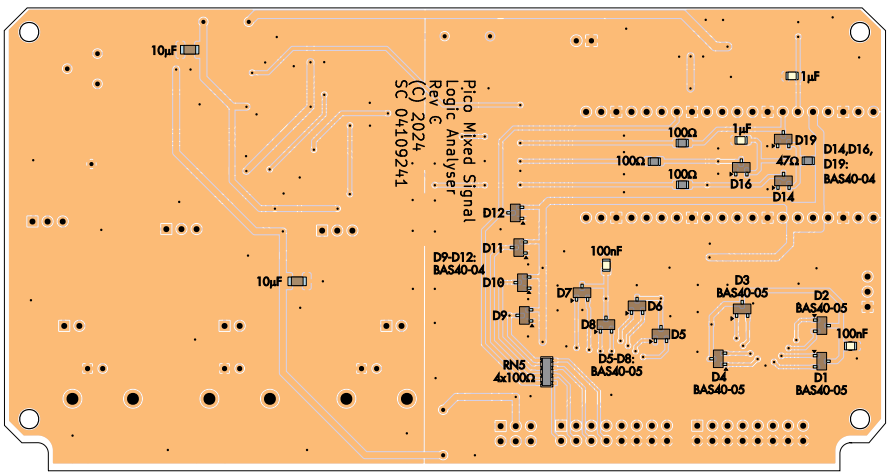
powstaje, zanim stare zostanie rozłączone; przypis redaktora), co podczas przełączania powodowałoby chwilowe zwieranie się ze sobą dwóch linii zasilających!

Układy scalone translatorów są wyposażone w zabezpieczenie diodowe przed ujemnymi napięciami wejściowymi. Ochronę przed przepięciami dodatnimi zapewniają diody Schottky'ego o małej pojemności (BAS40). Każda podwójna dioda chroni po dwa wejścia przed napięciami większymi niż VCCB + 0,3 V. Rezystory

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 5. Na górnej stronie płytki drukowanej montowana jest większość elementów, w tym Raspberry Pi Pico, układy scalone, złącza i większość elementów biernych. Zauważmy, że dwa rezystory oznaczone kolorem czerwonym (R17 i R19) można zastąpić pojedynczym rezystorem 19,1 kΩ umieszczonym na polu lutowniczym R17



Rysunek 6. Na dolnej stronie płytki znajdują się diody podwójne oraz kilka elementów biernych

wejściowe 100 Ω ograniczają prądy wejściowe przepływające przez diody zabezpieczające oraz tłumią oscylacje na wejściowych liniach sygnałowych spowodowane pojemnością rozproszoną i niedopasowaniem impedancji.

Diody BAS40 mają maksymalny prąd ciągły wynoszący 200 mA, a translatory poziomów logicznych mogą wytrzymać –50 mA, więc bezwzględny zakres napięcia wejściowego to –5 V...+20 V.

Ostatnie cztery wejścia cyfrowe (GP18... GP21) akceptują wyłącznie poziomy logiczne standardu 3,3 V. Są wyposażone w zabezpieczenie przed odwróconą polaryzacją oraz przepięciem, zapewniane przez drabinki rezystorowe 100 Ω oraz połączone szeregowo pary diod BAS40-04. Wejścia te są chronione dla zakresu napięć wejściowych ±20 V. Rezystory wejściowe zrealizowano jako poczwórne drabinki SMD, co pozwoliło zmniejszyć liczbę elementów. Można jednak zastosować pojedyncze rezystory SMD o rozmiarze M2012/0805, montowane „na sztorc”.

Trzy analogowe kanały wejściowe są zrealizowane identycznie. Złącza BNC umożliwiają dołączenie standardowych sond oscyloskopowych ×1/×10. W każdym kanale można przełącznikiem dwupozycyjnym wybrać sprzężenie zmiennoprądowe (AC) lub stałoprądowe (DC), a kondensatory 100 nF wraz z rezystancją wejściową 1 MΩ tworzą filtr górnoprzepustowy zapewniający dolną granicę pasma przenoszenia wynoszącą kilka herców.

W przypadku gdy sondy oscyloskopowe działają przy ustawieniu ×10, kondensatory 50 pF w układzie stanowią element kompensacji częstotliwościowej wraz z kondensatorami 20 pF połączonymi w sondzie równolegle z rezystorami szeregowymi 10 MΩ.

Jeśli sondy oscyloskopowe nie będą używane, złącza BNC można zastąpić złączami RCA do montażu na panelu. W takim przypadku należy usunąć kondensatory 50 pF połączone równolegle z potencjometrami, ponieważ powodowałyby one spadek czułości przy wyższych częstotliwościach, zależny od impedancji sygnału źródłowego.

Przetwornik analogowo-cyfrowy procesora Pico ma zakres napięcia wejściowego 0...3,3 V. Wzmocnienie w każdym kanale wynosi 10 (ściślej: 10 kΩ/1 kΩ + 1 = 11; przypis redaktora). Przekłada się to na zakres napięcia wejściowego kanału równy 330 mV. Nastawny tłumik, utworzony w każdym kanale przez potencjometr 1 MΩ i rezystor stały 1,2 kΩ, pozwala jednak na pomiar sygnałów o znacznie wyższym napięciu – o wartości szczytowej sięgającej (ze względów bezpieczeństwa) 60 V.

Zalecamy użycie potencjometrów o średnicy 24 mm, zapewniających płynniejszą pracę niż typy o średnicy 16 mm, o charakterystyce „logarytmicznej” (jak do regulacji głośności; przypis redaktora), co zapewni wygodniejszą regulację czułości wejściowej. Należy unikać potencjometrów o średnicy 9 mm i 12 mm, ponieważ są one zazwyczaj przystosowane do napięcia maksymalnie 20 V.

Rezystory 10 kΩ na wejściach wzmacniaczy operacyjnych ograniczają prąd diod zabezpieczających BAS40-04 oraz oddzielają od wejścia sumaryczną pojemność diod wynoszącą 10 pF. Rezystory te nie mają wpływu na wzmocnienie, ponieważ wzmacniacze operacyjne z wejściami FET charakteryzują się impedancją wejściową wynoszącą 1 TΩ (10^{12} Ω).

Wzmacniacze operacyjne TL074H z wejściami na tranzystorach FET wybraliśmy, by spełnić wymagania dotyczące dużej impedancji wejściowej i odpowiedniej szerokości pasma. W stosunku do standardowych TL074 mają one poprawione parametry. Z naszego punktu widzenia najważniejszy jest iloczyn wzmocnienia i szerokości pasma wynoszący 5,25 MHz. Przy wzmocnieniu ×10 przekłada się to na teoretyczną szerokość pasma dla sygnału o amplitudzie międzyszczytowej 3,3 V wynoszącą ponad 500 kHz.

Wzmacniacze operacyjne tego typu nie mają wprawdzie wyjścia „rail-to-rail” (o zakresie napięcia wyjściowego równym napięciu zasilania; przypis redaktora), ale przy zasilaniu ±5 V napięcie wyjściowe może osiągnąć ponad 4 V.

Napięcie środkowe przetwornika analogowo-cyfrowego (wynoszące +1,65 V; przypis redaktora) jest wyznaczone przez napięcie

eprasa.pl fb05997b40

odniesienia VREF równe –165 mV. Napięcie to wytwarza wzmacniacz odwracający, który zmniejsza do połowy napięcie przewodzenia diody Schottky'ego. Ponieważ napięcie to może się nieznacznie różnić w zależności od prądu diody, rezystor regulacyjny VR4 umożliwia korektę wartości napięcia VREF. Kondensator w obwodzie sprzężenia zwrotnego odfiltrowuje szumy o wyższej częstotliwości.

Rezystancja na wejściu za rezystorem VR4 wynosi około 19,2 kΩ, więc wymagane wzmocnienie wynoszące 0,5 uzyskuje się, gdy VR4 jest ustawiony w pobliżu połowy zakresu. Są produkowane rezystory SMD o wartości 19,1 kΩ (w szeregu E96) i nie jest trudno je zdobyć, niemniej jednak przewidziano zrealizowanie tej rezystancji jako równoległego połączenia rezystorów 22 kΩ i 150 kΩ.

Napięcie zasilające +5 V dla wzmacniaczy operacyjnych jest pobierane z linii zasilającej gniazda USB (VBUS), natomiast napięcie -5 V jest wytwarzane przez inwerter napięcia z przełączanymi kondensatorami (LM2664). W inwerterze zastosowano większe kondensatory ceramiczne SMD (3,2 × 2,5 mm) ze względu na ich niższą rezystancję szeregową (ESR), a co za tym idzie – mniejsze straty.

Na płytce drukowanej przewidziano oddzielne płaszczyzny masy dla części analogowej i cyfrowej układu, co ma na celu ograniczenie przenoszenia zakłóceń z części cyfrowej do analogowej. Obie płaszczyzny są ze sobą połączone po obu stronach płytki w jej środkowej części.

Wszystkie analogowe linie zasilające są odsprzęgnięte od cyfrowej płaszczyzny masy i filtrowane przez rezystory 10 Ω i kondensatory. Ponieważ układ LM2664 ma stosunkowo dużą częstotliwość pracy (160 kHz), odfiltrowanie szumów przełączania tego układu zapewniają filtry z kondensatorami o pojemności zaledwie 10 µF.

Stabilizator liniowy REG1 stanowi niskoimpedancyjne źródło napięcia odniesienia przetwornika analogowo-cyfrowego o wartości 3,3 V, korzystnie wpływając na dokładność przetwarzania, szczególnie przy większych częstotliwościach próbkowania.

Konstrukcja

Analizator sygnałów mieszanych jest montowany na dwustronnej płytce drukowanej o numerze katalogowym Silicon Chip 04109241 i wymiarach 77 × 148 mm. Elementy znajdują się po obu stronach płytki. Podczas montażu należy kierować się **rysunkami 5** i **6**.

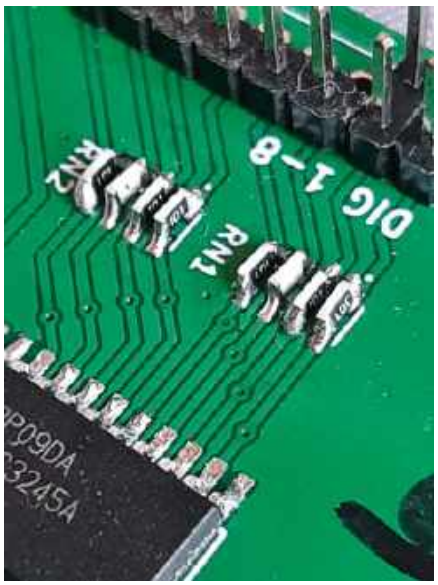
Podczas przygotowywania elementów do montażu należy oddzielić od siebie podwójne diody BAS40-04 (połączone szeregowo) i BAS40-05 (o wspólnej katodzie). Mają one odmienne oznaczenia, jednak rozróżnienie ich może być trudne bez dobrego oświetlenia i lupy. Jedynym miejscem, w którym można użyć dowolnego z tych dwóch typów, jest D17.

Najpierw przylutowujemy układy scalone IC1 i IC2, ponieważ po zamontowaniu złączy modułu Pico dostęp do nich będzie utrudniony. Jeśli dysponujemy piecem do lutowania rozpływowego, możemy użyć pasty lutowniczej. W przypadku korzystania z lutownicy lepiej będzie jednak posłużyć się cyną z topnikiem oraz strzykawką z topnikiem w postaci pasty.

Nakładamy cienką warstwę topnika w postaci pasty na wszystkie pady układu scalonego, a następnie umieszczamy na tych padach układ scalony. Sprawdzamy, czy orientacja pinu nr 1 jest prawidłowa, a następnie nakładamy niewielką ilość cyny na czystą końcówkę lutownicy i dotykamy nią miejsca styku jednego z narożnych pinów z odpowiednim padem. W wyniku tego układ scalony powinien trzymać się na swoim miejscu. Sprawdzamy, czy układ jest prawidłowo ustawiony względem wszystkich padów – jeśli nie, podgrzewamy połączenie i delikatnie przesuwamy układ na właściwe miejsce. Po prawidłowym ustawieniu układu lutujemy w podobny sposób pozostałe trzy narożne piny. Następnie nakładamy więcej cyny na grot lutownicy i delikatnie przesuwamy nim wzdłuż krawędzi pinów po jednej stronie, dotykając płytki drukowanej. Cyna będzie rozpływała się po kolejnych polach lutowniczych. Nie martwmy się, jeśli niektóre piny zostaną zwarte ze sobą. Kontynuujemy nakładanie cyny, aż wszystkie piny po jednej stronie zostaną przylutowane. Czynność tę przeprowadzamy następnie po drugiej stronie układu scalonego.

Po przylutowaniu wszystkich pinów nakładamy nieco więcej topnika w postaci pasty na te piny, między którymi są zwarcia, a następnie grotem lutownicy dociskamy do tych pinów plecionkę lutowniczą, aż wchłonie ona nadmiarową cynę. Po zakończeniu usuwamy pozostałości topnika środkiem do czyszczenia lub alkoholem (na przykład izopropylowym), po czym dokładnie sprawdzamy połączenia, upewniając się, że wszystkie są uformowane prawidłowo. Te, które nie są, poprawiamy, nanosząc na nie niewielką ilość topnika w postaci pasty.

Następnie montujemy trzy stabilizatory napięcia, powiązane z nimi elementy bierne oraz złącza modułu Pico. Wtykamy moduł w złącza i podłączamy go kablem USB do źródła zasilania. Przy pierwszym podłączeniu dobrze jest użyć miernika prądu USB i kontrolować pobór prądu. Prąd powyżej 50 mA wskaże, że z płytką jest jakiś problem.

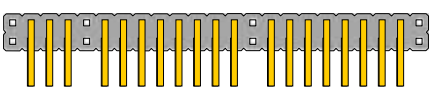


Podczas budowania prototypu nie miałem pod ręką drabinek rezystorowych, więc zastosowałem rezystory SMD 100 Ω o rozmiarze M2012/0805, montowane krawędziowo

Linie zasilania 1,8 V, 3,3 V (ADC_VREF), +5 V i –5 V powinny być już aktywne. Sprawdzamy, czy napięcia są prawidłowe, mierząc multimetrem napięcia na pinach stabilizatorów (uważamy, by nie zrobić jakiegoś zwarcia). Napięcie na linii –5 V może być o kilkaset miliwoltów niższe niż na +5 V z powodu spadku napięcia wewnątrz przetwornicy. W razie jakichkolwiek problemów wyłączamy zasilanie i sprawdzamy wszystko pod lupą.

Jeśli układ przeszedł te testy bez zastrzeżeń, wyłączamy zasilanie i montujemy po obu stronach płytki drukowanej pozostałe układy scalone SMD, diody i elementy bierne. Zalecamy najpierw zamontować wszystkie elementy SMD na górnej stronie płytki, zanim przejdziemy do dolnej. Należy pamiętać o wcześniejszych uwagach: aby nie pomylić ze sobą dwóch różnych typów diod oraz że można zamontować albo pojedynczy rezystor 19,1 kΩ w miejscu oznaczonym na sitodruku R17, albo dwa rezystory: 22 kΩ w miejscu R17 i 150 kΩ w miejscu R19.

Lutowanie pięciu drabinek rezystorowych będzie nieco skomplikowane, ponieważ każda



Rysunek 7. Z podwójnego 23-rzędowego złącza kątowego należy usunąć piny w pokazanych tutaj miejscach. Złącze będzie stanowić mocną konstrukcję. Musi wystawać przez otwór w obudowie. Patrz również fotografie

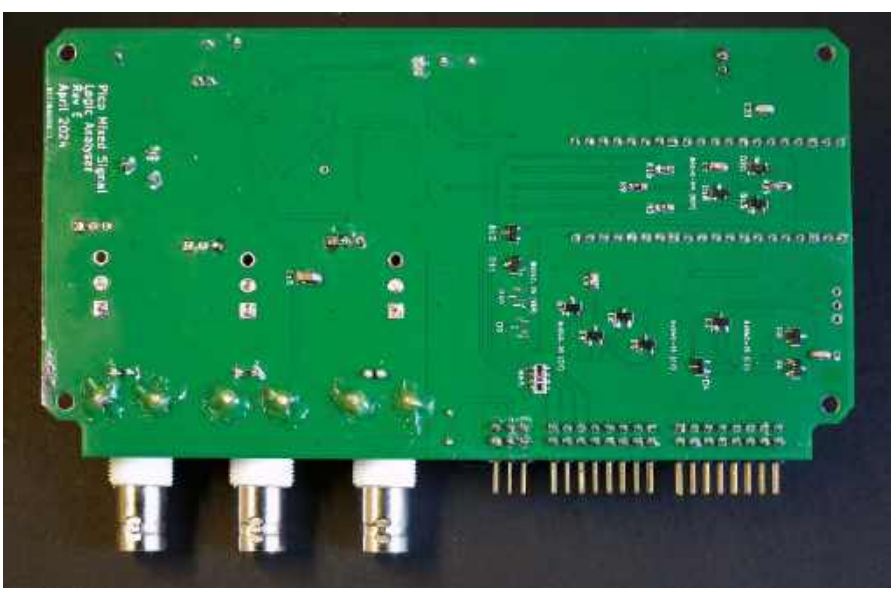
eprasa.pl fb05997b40



Monitor zasilania USB. Przydaje się do wykrywania usterek zwiększających pobór prądu, takich jak na przykład zwarcie linii zasilającej do masy. Tego typu układ opublikowaliśmy w numerze Silicon Chip z grudnia 2012 r. (www.siliconchip.au/Article/460)

Wycięcia w obudowie można zakryć osłonami z grubego kartonu, zapobiegającymi przedostawaniu się do środka kurzu i poprawiającymi estetykę





Górna i dolna strona zmontowanej płytki drukowanej prototypu analizatora. W wersji ostatecznej jest kilka drobnych różnic

z nich jest niewiele większa od pojedynczego rezystora (5,1 × 2,2 mm), a zatem ich pola lutownicze są bardzo małe. Aby cyna przedostała się do wklęsłych wyprowadzeń i na pola pod nimi, konieczne będzie użycie topnika w postaci pasty. Po zakończeniu należy usunąć pozostałości topnika i dokładnie sprawdzić połączenia pod lupą.

Po zamontowaniu wszystkich elementów SMD, usunięciu pozostałości topnika i sprawdzeniu jakości połączeń należy przystąpić do montażu elementów przewlekanych. Zaczynamy od trzech rezystorów osiowych 10 Ω. Następnie montujemy potencjometr regulacyjny, a na koniec pozostawiamy przełączniki, złącza BNC i kątowe złącze wtykowe.

Całe złącze kątowe jest podzielone na dwie sekcje 8×2 oraz jedną 3×2. Ze złącza 23×2 należy usunąć niektóre piny (**rysunek 7**). Taki układ stanowi solidne gniazdo montowane do płytki wewnątrz obudowy, szersze na każdym końcu o jeden raster. Złącze montujemy po usunięciu pinów ze wskazanych kolumn. W środkowe piny sekcji 3×2 wkładamy zworkę (3,3 V).

Złącza BNC można zamontować na tym etapie lub zostawić to na później. Po przylutowaniu należy wzmocnić montaż, nanosząc niewielką ilość kleju na gorąco lub kleju epoksydowego na piny złącz.

Potencjometry ustawiające wzmocnienie kanałów analogowych, przełączniki wejściowe AC/DC oraz dioda LED umieszczona na górze obudowy są dołączone do płytki drukowanej krótkimi odcinkami przewodu izolowanego. Najlepiej sprawdzą się tu grupy przewodów odcięte z kabla taśmowego. Potencjometry i przełączniki znajdują się niemal bezpośrednio nad punktami połączeniowymi na płytce drukowanej, wystarczą zatem przewody o długości 10 cm. Można je przygotować, odcinając grupy po dwa lub trzy przewody z odcinka kabla taśmowego. Przełączniki i potencjometry należy dołączyć do płytki już na tym etapie montażu, ponieważ będą one wymagane do testowania.

Testy

Ze strony www.siliconchip.com.au/Shop/6/452 pobieramy oprogramowanie przeznaczone do wgrania do mikrokontrolera. Następnie podłączamy moduł Pico do komputera. Przy pierwszym podłączeniu w komputerze powinien pojawić się nowy „dysk”. Jeśli tak się nie stanie, moduł Pico odłączamy i podłączamy ponownie, przytrzymując na nim przycisk BOOTSEL. Na nowy „dysk” kopiujemy plik UF2 z pobranego pakietu oprogramowania. Z tym

eprasa.pl fb05997b40

programem Pico będzie działał po ponownym uruchomieniu.

Następnie pobieramy i instalujemy w komputerze program PulseView ze strony https://sigrok.org/wiki/PulseView.

Program PulseView uruchamiamy, podłączamy nasz analizator i na pasku narzędzi klikamy przycisk wyboru urządzenia („<No Device>"); patrz **ekran 4**. W wyskakującym oknie wybieramy z listy rozwijanej „Raspberry-PI PICO". Klikamy przycisk „Serial Port" i wybieramy odpowiedni port szeregowy, pokazywany w menedżerze urządzeń systemu Windows. W nazwie tego portu powinno znajdować się oznaczenie „CDC" i nie będzie to port COM1. Nie ma potrzeby wybierania prędkości transmisji. Klikamy „Step 3: Scan for devices" („wyszukuj urządzenia"). W oknie „Step 4: Select the device" („wybierz urządzenie") powinna pojawić się nazwa „Raspberry Pi Pico with 24 channels" („Raspberry Pi Pico z 24 kanałami"). Zaznaczamy ją i klikamy „OK".

Jeśli podczas tego procesu napotkacie jakiekolwiek trudności, spróbujcie ponownie uruchomić komputer. Aktualizacja czy instalowanie innych wersji sterowników programem Zadig albo innym narzędziem nie powinno być konieczne.

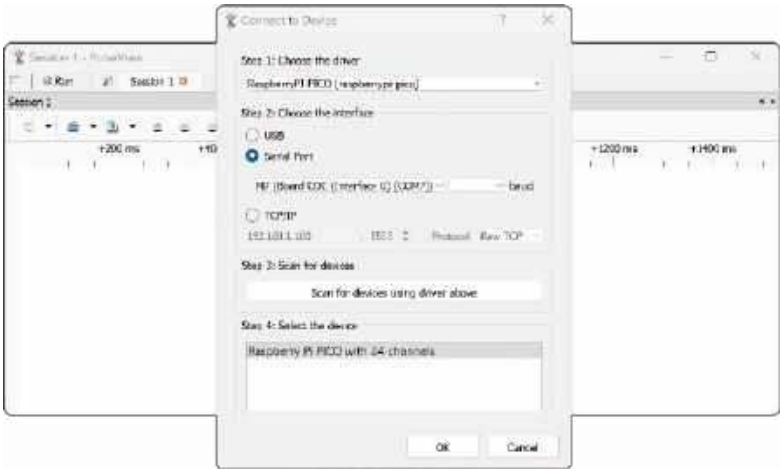
Na ekranie programu PulseView powinno być teraz widoczne okno z dwudziestoma sygnałami cyfrowymi i trzema analogowymi. W celu ujrzenia kanałów analogowych może być konieczne przewinięcie ekranu w dół. Sygnały cyfrowe są numerowane od D2 do D21 – numeracja ta pochodzi od numerów pinów GPIO, do których są one podłączone.

Po kliknięciu na górnym pasku narzędzi przycisku „Run" na ekranie powinny pojawiać się różne przypadkowe wartości zarówno w kanałach cyfrowych, jak i analogowych.

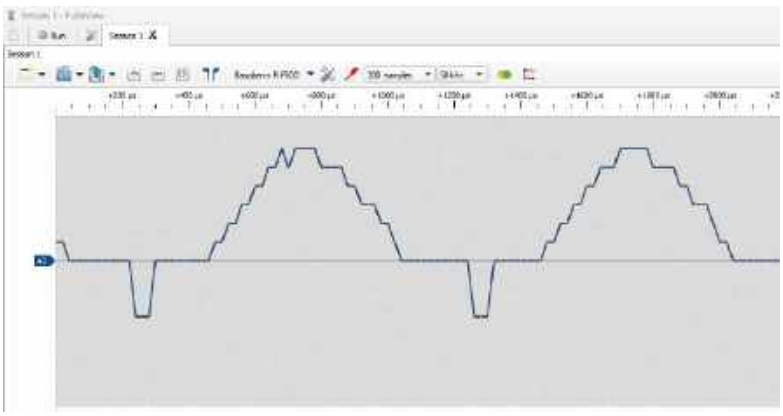
Kalibracja

Wyłączamy w programie wszystkie kanały cyfrowe, pozostawiając aktywne tylko kanały analogowe. Dołączamy sygnał o częstotliwości 1 kHz i amplitudzie 1 V (wartości te nie muszą być dokładne) do dowolnego z wejść analogowych i ustawiamy przełącznik AC/DC w pozycji AC.

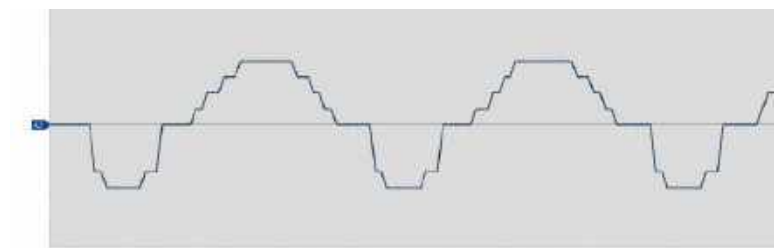
Rejestrujemy 200 próbek przy częstotliwości próbkowania 50 kHz. Rejestrowanie powtarzamy, regulując potencjometr wzmocnienia tak, aby w programie PulseView wyświetlał się przebieg o amplitudzie międzyszczytowej około 200 mV_{pp}. Zarejestrowany przebieg może być przesunięty powyżej lub poniżej linii zera, jak na **ekranie 5**. Regulujemy potencjometr VR4, aż zarejestrowany przebieg



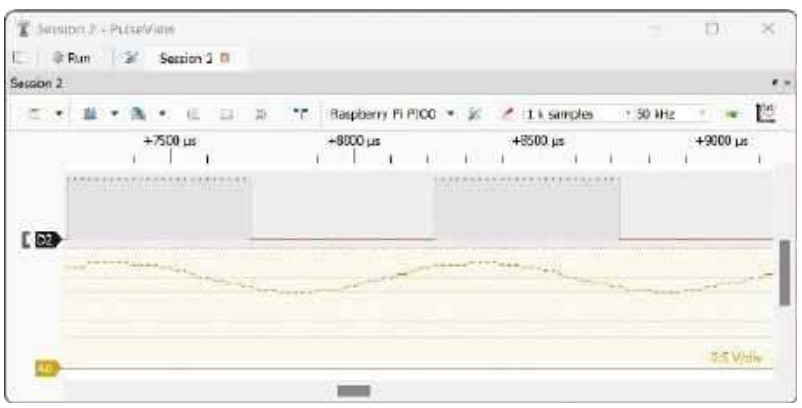
Ekran 4. Ustawienia portu szeregowego USB analizatora na ekranie konfiguracyjnym w programie PulseView



Ekran 5. Sygnał przemienny o częstotliwości 1 kHz, zarejestrowany jeszcze przed regulacją napięcia odniesienia VREF. W programie PulseView występuje przesunięcie przebiegu względem linii zerowej

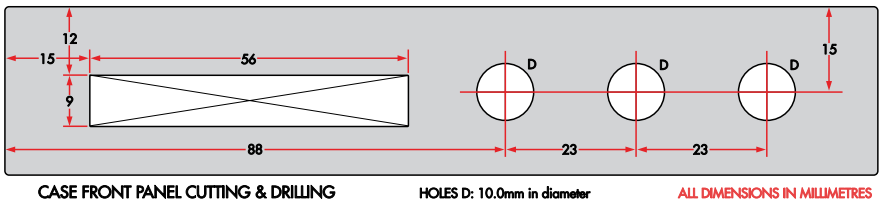


Ekran 6. Jak wyżej, ale po regulacji napięcia VREF. Przebieg jest teraz wyśrodkowany względem linii zerowej

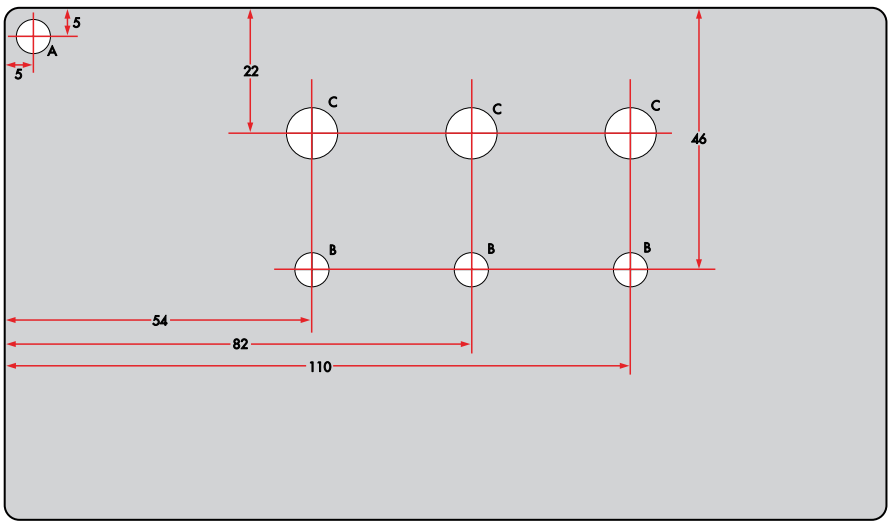


Ekran 7. Zrzut ekranu programu PulseView przedstawiający zsynchronizowane przebiegi: prostokątny (kanał cyfrowy D2) i sinusoidalny (kanał analogowy A0)

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 8. W tylnej części obudowy wykonujemy trzy okrągłe otwory na gniazda wejść analogowych (średnice zależą od typu użytych gniazd) oraz jedno wycięcie prostokątne na złącze wejść cyfrowych. Wycięcie można wykonać, wiercąc szereg okrągłych otworów na obwodzie prostokąta, a następnie wygładzając je pilnikiem płaskim



Rysunek 9. W pokrywie obudowy należy wywiercić siedem okrągłych otworów. Elementy montowane na pokrywie są dołączone do płytki luźnymi przewodami, dokładne położenia otworów nie mają zatem większego znaczenia. Ważne, by efekt końcowy był estetyczny. Zalecamy jednak wywiercenie otworów ściśle według rysunku, co zapewni dopasowanie do naszej etykiety

będzie położony symetrycznie względem zera (**ekran 6**).

Włączamy wszystkie wejścia cyfrowe i ustawiamy zworką w CON3 poziom logiczny na 3,3 V. Sprawdzamy kanały, rejestrując przebieg prostokątny o poziomach 0/3,3 V. Kanały wejściowe testujemy pojedynczo, co pozwoli wykryć ewentualne zwarcia między nimi, trudne do wykrycia gołym okiem na gęsto rozmieszczonych pinach układów translatorów logicznych.

Gdy potwierdzimy, że przyrząd działa prawidłowo, montujemy płytkę drukowaną w obudowie wkrętami samogwintującymi o długości 9 mm. Pomiędzy płytką a obudową należy umieścić podkładki dystansowe o grubości 2 mm, zapobiegając tym samym wystawaniu końcówek wkrętów ze spodu obudowy, gdzie znajdują się cztery wgłębienia. Górna część obudowy ma po obu stronach rzędy wgłębień w kształcie rombu. Jeśli nie mamy podkładek dystansowych 2 mm, stosujemy po dwie podkładki nylonowe 1 mm.

Na panelu bocznym zaznaczamy pozycje otworów, a następnie wiercimy otwory prowadzące o średnicy 3 mm (**rysunek 8**). Stawiamy analizator na stole, przymierzamy panel boczny do złączy BNC i sprawdzamy, czy otwory mają prawidłowe położenia. Otwory rozwiercamy następnie do średnicy 12 mm (w przypadku gniazd RCA – 10 mm).

W przypadku stosowania złączy RCA należy je montować bezpośrednio na panelu bocznym, w jednej linii z polami do gniazd BNC na płytce drukowanej i na tyle wysoko, aby nie stykały się z górną krawędzią płytki drukowanej.

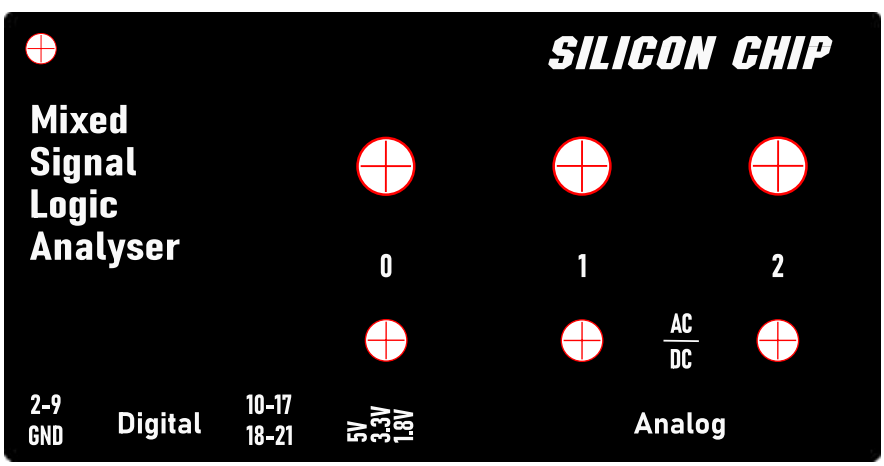
Podobnie postępujemy w przypadku wycięcia na kątowe złącza kołkowe. Na panelu wokół styków powinna być szczelina o szerokości 1 mm, zapewniająca miejsce na przewody pomiarowe oraz zworkę wyboru napięcia cyfrowego.

Na boku obudowy zaznaczamy położenie gniazda USB, wiercimy mały otwór prowadzący i sprawdzamy jego położenie względem gniazda. Powinno wystarczyć wycięcie wielkości wtyczki micro-USB (7×2 mm). Ja zdecydowałem się je zrobić o takich wymiarach jak plastikowa osłona mojego przewodu USB (8×12 mm). Dzięki temu wtyczka wsuwa się do końca bez ocierania się o obudowę.

Na otwór na wtyk USB można sporządzić osłonę z kartonu. Podobną osłonę można zrobić dla złącza cyfrowego. Styki złącza w celu zaznaczenia miejsc otworów wciskamy w karton, a następnie miejsca te przebijamy grubą igłą. Tak przygotowaną osłonę nakładamy na piny złącza.

W pokrywie górnej wiercimy otwory zgodnie z **rysunkiem 9**. Szablon etykiety (**rysunek 10**) można pobrać ze strony internetowej Silicon Chip, wydrukować, zalaminować i przyciąć na wymiar. Otwory należy wybić lub wyciąć ostrym nożem. Powinny być nieco większe niż te w pokrywie, aby podczas wkładania potencjometrów i przełączników nie doszło do rozwarstwienia etykiety. Etykietę można przykleić taśmą dwustronną.

Montujemy potencjometry, przełączniki i diodę LED. Potencjometry i przełączniki mają tylko minimalny prześwit nad płytką drukowaną, dlatego należy je montować bez podkładek i nakrętek między pokrywą a elementem. Wyprowadzenia diody LED należy przyciąć do długości poniżej 1 cm, aby nie stykały się z płytką drukowaną, a połączenia



Rysunek 10. Szablon etykiety. Można go pobrać ze strony www.siliconchip.au/Shop/11/456, wydrukować w rozmiarze rzeczywistym i przymocować na pokrywie

eprasa.pl fb05997b40

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

z przewodem łączącym zaizolować rurką termokurczliwą.

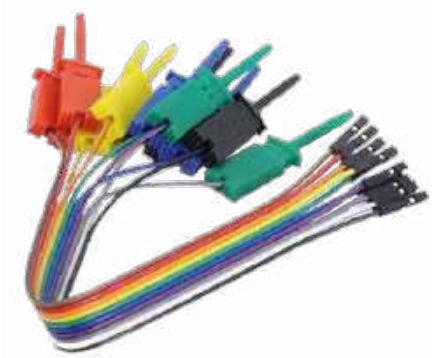
Zatrzaskujemy teraz obudowę. Między przełącznikami i potencjometrami a płytką drukowaną jest bardzo mały prześwit. Połączenie górnej i dolnej części obudowy będzie łatwiejsze po ułożeniu przewodów przełączników między gniazdami BNC, a przewodów potencjometrów po drugiej stronie. Następnie na potencjometry nakładamy pokrętła.

Środki ostrożności podczas użytkowania

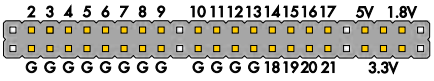
W przypadku podłączenia analizatora bezpośrednio do portu USB komputera masa analizatora może zostać za pośrednictwem komputera połączona z uziemieniem. Jeśli masa testowanego urządzenia jest na potencjale znacznie różniącym się od potencjału ziemi, jego dołączenie może spowodować uszkodzenie portu USB, komputera lub analizatora. Dlatego zdecydowanie zalecamy stosowanie izolatora USB. Izolator taki stanowi proste i skuteczne zabezpieczenie, a na AliExpressie kosztuje poniżej 10 dolarów. Wystarczy model na najniższą prędkość, ponieważ port USB modułu Pico pracuje z pełną prędkością do 12 Mbit/s.

Działanie

Wysokość wyświetlania dowolnego kanału sygnałowego można zmienić, klikając jego ikonę i zmieniając wartość „Div height” (**ekran 8**). Jest to szczególnie przydatne w przypadku kanałów analogowych.



Przewody pomiarowe typu DuPont z końcówkami żeńskimi i miniaturowymi zaciskami haczykowymi. Wygodne do dołączania wyprowadzeń układów scalonych i punktów testowych do analizatora. Wtykamy je bezpośrednio do złącza kątowego



Rozkład pinów złączy CON2...CON4 widziany od przodu (patrząc od zewnątrz analizatora). Zwróćmy uwagę, że zarówno tutaj, jak i na rysunku 7 widać, że plastikowa osłona złącza wystaje o jeden rząd poza piny skrajne

Aby ograniczyć liczbę aktywnych kanałów wyłącznie do faktycznie oglądanych, klikamy na pasku narzędzi ikonę z czerwoną sondą. Jak pokazano w tabeli 1, częstotliwość próbkowania zależy od liczby i rodzaju aktywnych kanałów oraz liczby próbek do zarejestrowania.

Wyzwalanie jest obsługiwane przez oprogramowanie komputera. Do wyzwalania można używać wyłącznie wejść cyfrowych (**ekran 9**). Jako kryteria wyzwalania mogą być użyte poziomy, zbocza narastające i opadające oraz zmiana stanu sygnału na jednym lub wielu wejściach.

Gdy włączona jest funkcja wyzwalania, częstotliwość próbkowania może ulec zmniejszeniu, ponieważ analizator musi mieć możliwość ciągłego przesyłania danych. Gdy rejestrowane są wyłącznie sygnały cyfrowe, efektywna prędkość przesyłania danych może się znacznie zwiększyć dzięki kompresji, co umożliwi stosowanie wyższych częstotliwości próbkowania.

Cyfrowe kanały wejściowe należy wybierać kolejno, bez przerw. Jeśli nie zostaną wybrane wszystkie kanały między D2 a ostatnim, w programie PulseView może wystąpić błąd przechwytywania typu „unspecified”

Wykaz elementów

1 szara obudowa z tworzywa ABS, Ritec, 86 × 155 × 30 mm [Altronics H0377]
1 dwustronna płytka drukowana z metalizowanymi otworami, 77 × 148 mm, kod 04109241
1 moduł Raspberry Pi Pico (MOD1)
3 miniaturowe przełączniki dwupozycyjne SPST (lub SPDT) na przewód (S1...S3) [Altronics S1310, Jaycar ST0546]
3 potencjometry obrotowe 1 MΩ, „logarytmiczne” (typ A), średnica 16 lub 24 mm (VR1...VR3)
3 pokrętła do VR1...VR3 [Altronics HX6020 lub H6030, Jaycar HK7705]
1 miniaturowy potencjometr regulacyjny 2 kΩ, regulacja od góry (VR4) [Altronics R2477B, Jaycar RT4354]
1 dwurzędowe złącze kątowe 23 × 2 (CON2...CON4)
3 złącza BNC na płytkę drukowaną lub na panel albo złącza RCA (CON6, CON8, CON10) [Altronics P0529]
1 zworka (do CON3)
2 listwy goldpin 20 × 1 (do modułu Pico)
2 złącza żeńskie 20 × 1 na listwę goldpin, pasujące do złączy modułu Pico (opcjonalnie)
1 kabel USB typu micro-B
1 izolator USB (opcjonalny, ale zdecydowanie zalecany) [www.aliexpress.com/item/1005001369085297]
1 zestaw przewodów pomiarowych DuPont z wtykami żeńskimi i miniaturowymi zaciskami haczykowymi (opcjonalnie)
1 folia do laminowania formatu A5 (na etykietę)

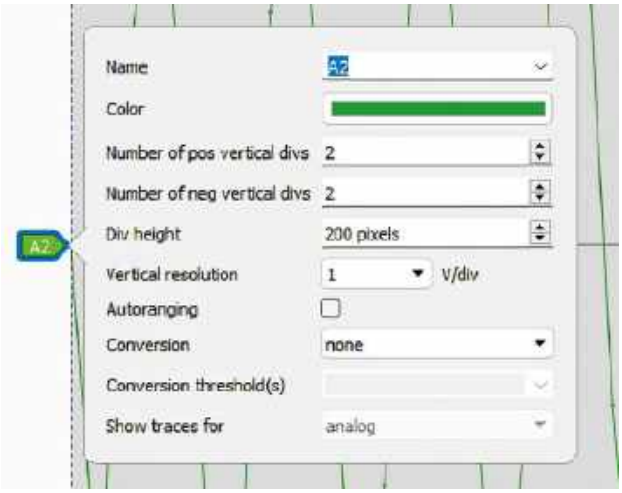
Elementy montażowe, przewody i tym podobne
4 wkręty samogwintujące z łbem płaskim 4G × 9 mm
4 podkładki dystansowe o wysokości 2 mm i średnicy wewnętrznej 3 mm albo 8 nylonowych podkładek M3 o grubości 1 mm
10 cm 20-żyłowego kabla taśmowego
3 cm rurki termokurczliwej o średnicy 1,5 mm (do diody LED)
1 mały sztyft kleju na gorąco lub tubka kleju epoksydowego (do mocowania złączy)

Półprzewodniki
2 ośmiokrotne dwukierunkowe translatory poziomów SN74LVCC3245ADW, obudowa szeroka SOIC-24 (IC1, IC2) [DigiKey, Mouser, element14]
1 precyzyjny czterokanałowy niskoszumny wzmacniacz operacyjny JFET TL074H, obudowa SOIC-14 (IC3) [DigiKey, Mouser]
1 stabilizator AMS1117-3.3, obudowa SOT-223 (REG1) [DigiKey, Mouser, element14]
1 stabilizator AMS1117-1.8, obudowa SOT-223 (REG2) [DigiKey, Mouser, element14]
1 inwerter napięcia z przełączanymi pojemnościami LM2664M6, obudowa SOT-23-6 (REG3) [DigiKey, Mouser]
1 dioda LED 3 mm w oprawce lub dioda LED plus oddzielna oprawka (LED1) [Altronics Z0238, Jaycar SL2615]
9 podwójnych diod Schottky’ego ze wspólną katodą BAS40-05, obudowa SOT-23 (D1...D8, D17)
10 podwójnych połączonych szeregowo diod Schottky’ego BAS40-04, obudowa SOT-23 (D9...D16, D18, D19)

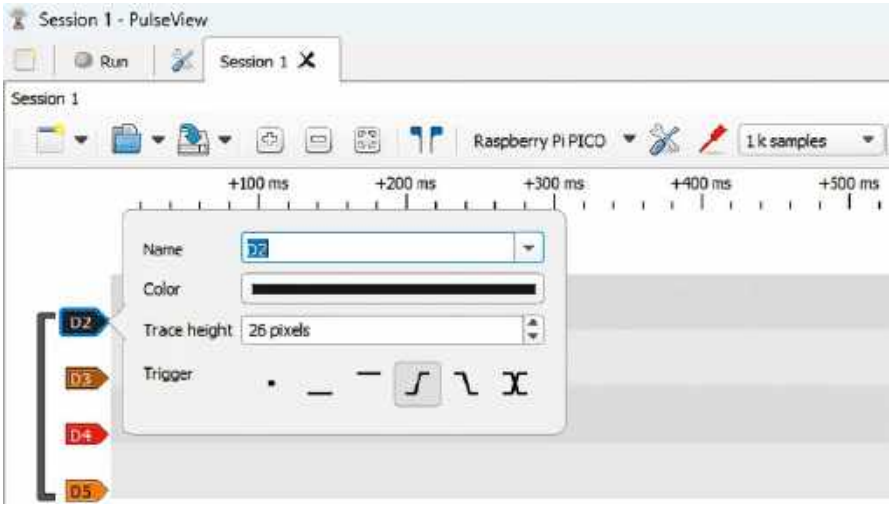
Kondensatory (wszystkie ceramiczne SMD, rozmiar M2012/0805, 16 V, X7R, o ile nie zaznaczono inaczej)
3 szt. 10 µF, rozmiar M3225/1210 lub M3216/1206
2 szt. 3,3 µF, rozmiar M3216/1206
8 szt. 1 µF
3 szt. 100 nF, 250 V, rozmiar M3216/1206 lub M3225/1210
9 szt. 100 nF
3 szt. 50 pF

Rezystory (wszystkie SMD, rozmiar M2012/0805, ⅛ W, 1%, o ile nie zaznaczono inaczej)
1 szt. 150 kΩ ◆
1 szt. 22 kΩ ◆
7 szt. 10 kΩ
1 szt. 4,7 kΩ
1 szt. 2,2 kΩ
3 szt. 1,2 kΩ
3 szt. 1 kΩ
3 szt. 100 Ω
1 szt. 47 Ω
3 szt. 10 Ω ¼ W osiowe
5 szt. poczwórnych drabinek 100 Ω M3216/1206 1/16 W Panasonic EXB-S8V101J
◆ można zastąpić pojedynczym rezystorem 19,1 kΩ

eprasa.pl fb05997b40



Ekran 8. Parametry wyświetlania każdego kanału można ustawiać, klikając ikonę kanału po lewej stronie ekranu. W przypadku kanałów analogowych rozdzielczość pionową w V/div można nastawić ręcznie, jeśli rozdzielczość domyślna według automatycznego wyboru zakresu nie jest dla nas dogodna



Ekran 9. PulseView oferuje elastyczne opcje wyzwalania sygnałami cyfrowymi. Wyzwalanie jest realizowane programowo w komputerze, co może zmniejszać częstotliwość próbkowania

(„nieokreślony"). W związku z tym nie można wybrać na przykład tylko wejść D2 i D4 czy D2...D9 i D11.

Jeśli włączone są jakieś kanały analogowe, to częstotliwość próbkowania nie będzie większa niż 2,4 MHz podzielone przez liczbę aktywnych kanałów analogowych, tak aby próbki cyfrowe i analogowe były zawsze ze sobą zsynchronizowane na wyświetlaczu. W przypadku sygnałów mieszanych na każdą próbkę cyfrową przypada jedna próbka analogowa.

Gdyby częstotliwość próbkowania była wyższa niż maksymalna częstotliwość próbkowania przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC), sygnały analogowe byłyby wyświetlane z nieprawidłową częstotliwością, ponieważ byłyby rejestrowane z częstotliwością inną niż kanały cyfrowe. Aby tego uniknąć, nie należy przekraczać częstotliwości próbkowania równej 2,4 MHz podzielonej przez liczbę aktywnych kanałów analogowych (patrz tabela 1).

Informacje na temat korzystania z bogatego zestawu funkcji programu PulseView można znaleźć w jego instrukcji obsługi dostępnej w internecie: (www.siliconchip.au/link/abwa).

Wnioski końcowe

Całe urządzenie byłoby znacznie bardziej skomplikowane, gdyby nie duża szybkość i elastyczność procesora wejścia/wyjścia w Raspberry Pi Pico, doskonałe oprogramowanie układowe autorstwa „pico-codera" oraz praca wolontariuszy, którzy udoskonalili program PulseView. Wszystko to sprawiło, że stworzenie opisywanego analizatora sygnałów mieszanych o dużej wydajności było zadaniem stosunkowo prostym. ■

Richard Palmer

Materiały dodatkowe dostępne są na stronie Silicon Chip:
https://www.siliconchip.com.au/Shop/8/7324

Elementy do budowy analizatora są oferowane w formie zestawu SC7323 (55 USD), obejmującego płytkę drukowaną, niezaprogramowany moduł Raspberry Pi Pico oraz wszystkie elementy półprzewodnikowe, kondensatory i rezystory

https://www.siliconchip.com.au/Shop/20/7323

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





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



Symulator szumu fal morskich

Odprężaj się przy dźwiękach morskiej plaży w zaciszu własnego domu. Zapomnij o upale, deszczu i o piasku wciskającym się w strój kąpielowy! Prezentowany projekt, przeznaczony zarówno dla elektroników początkujących, jak i dla doświadczonych konstruktorów, zapewni doskonały relaks.

Od redakcji: urządzenie zawiera bardzo pomysłowe, a przy tym proste rozwiązania układowe i jest świetnym przykładem zastosowania klasycznej techniki analogowej.

Przedstawiamy symulator dźwięku fal morskich, zbudowany ze standardowych elementów przewlekanych na niebieskiej płytce drukowanej o kształcie deski surfingowej.

Urządzenie wytwarza dźwięk imitujący brzmienie fal rozbijających się o brzeg, uwzględniając pojawiające się od czasu do czasu większe fale. Posłuży do uzupełnienia naturalnego szumu morza, jeśli mieszkacie w pobliżu plaży, lub pozwoli poczuć nadmorski klimat, jeśli mieszkacie w głębi lądu. Dźwięk morza idealnie nadaje się do maskowania hałasów tła, ułatwiając relaks i spokojny sen.

Projekt wykorzystuje wyłącznie standardowe podzespoły, a jego płytka ma atrakcyjną formę deski surfingowej z grafiką przedstawiającą fale. Układ ma wbudowany głośnik, ale można także podłączyć się do gniazda RCA i przesłać dźwięk do zestawu stereo lub głośników aktywnych, uzyskując jeszcze bardziej realistyczny efekt. Duże kolumny dobrze odtwarzające bas wiernie odtworzą głębokie dźwięki fal rozbijających się o skały.

Układ jest zasilany z zasilacza wtyczkowego napięcia stałego 12 V, nie trzeba więc martwić się o rozładowane baterie. Nie wymaga żadnej regulacji ani strojenia. Wystarczy go włączyć, nastawić głośność i... natychmiast przenieść się w myślach na słoneczną plażę.

Jak wytworzyć dźwięk fal morskich?

Brzmienie morskich fal jest bardzo zbliżone do szumu białego – sygnału losowego pokrywającego całe słyszalne pasmo akustyczne od 20 Hz do 20 kHz. Biały szum zawiera wszystkie możliwe częstotliwości, każdą z tym samym poziomem. Przypomina dźwięk z radioodbiornika FM nastrojonego pomiędzy stacjami albo szum rzęsistego deszczu.

Aby czysty szum biały zaczął przypominać dźwięk morza, wymaga pewnych modyfikacji. Natężenie dźwięku musi zmieniać się w czasie, konieczne jest także odpowiednie ukształtowanie charakterystyki częstotliwościowej, aby brzmienie było realistyczne. W rytmie fal musi występować pewna losowość, ponieważ odgłos morza ulega ciągłym zmianom, gdy fale napływają, rozbijają się o brzeg i cofają.

Poziom głośności dźwięku fal morskich tworzy w czasie przebieg zbliżony do trójkątnego z pewnymi dodatkowymi szczegółami. W miarę napływania fali dźwięk stopniowo narasta, osiąga wartość szczytową, a następnie zanika. Do symulacji tego zjawiska wykorzystamy źródło szumu białego o głośności modulowanej przebiegami obwiedniowymi w kształcie trójkąta. Użycie dwóch takich obwiedni pozwala uzyskać pewien stopień losowości natężenia dźwięku. Przy jednym generatorze otrzymalibyśmy jedynie jednostajnie powtarzające się uderzenia fal, natomiast przy dwóch uzyskujemy niejako dwa ciągi fal napływających w bardziej nieregularnych odstępach czasu. Jeszcze większy realizm brzmienia zostaje osiągnięty przez dalsze kształtowanie obwiedni trójkątnej.

Konstrukcja opisywanego symulatora jest wzorowana na układzie opracowanym w październiku 1990 roku przez Darrena Yatesa (www.siliconchip.au/Article/6622). Nasz układ został oparty na dwóch tanich poczwórnych wzmacniaczach operacyjnych LM324. Liczbę elementów można by zredukować, stosując mikrokontroler. Byłoby to jednak rozwiązanie mniej interesujące od strony poznawczej, a jednocześnie trudniejsze do modyfikacji.

Prezentowana wersja zawiera ulepszenia układowe, jest bardziej zwarta i prezentuje się o wiele atrakcyjniej na płytce w kształcie deski surfingowej niż w zwykłej plastikowej obudowie.

Schemat blokowy

Na **rysunku 1** przedstawiono schemat blokowy symulatora. Główny sygnał akustyczny wytwarza przedwzmacniacz IC2c. Na wejście nieodwracające (+) wzmacniacza podawany jest biały szum. Głośność (czyli wzmocnienie wzmacniacza) zmienia się w czasie za sprawą dwóch generatorów fali trójkątnej oraz trzech modulatorów oznaczonych jako MOD1,

eprasa.pl fb05997b40

MOD2 i MOD3. Modulatory te zmieniają kształt trójkątnych przebiegów obwiedniowych.

Sygnał wyjściowy z generatora fali trójkątnej MOD1 trafia także do wzmacniacza wartości szczytowej IC2d. Układ ten wzmacnia jedynie wierzchołki przebiegu trójkątnego, zwiększając jego poziom. Przez podanie tego napięcia na modulator MOD3 symulowany jest odgłos uderzenia dużej fali o brzeg.

Wszystkie trzy modulatory zmieniają swą impedancję. Są one dołączone między wejście odwracające IC2c a masę, określając wzmocnienie tego stopnia, a tym samym poziom głośności szumu białego.

Sygnał z wyjścia przedwzmacniacza IC2c jest kierowany do filtru dolnoprzepustowego złożonego z IC2b i elementów biernych. Kształtuje on charakterystykę częstotliwościową szumu białego, tłumiąc wyższe częstotliwości, co nadaje mu brzmienie zbliżone do szumu morza. Przypis redaktora: zasadniczy filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej 130 Hz (1 MΩ/1,2 nF) jest realizowany już przez wzmacniacz IC2c. IC2b ma na wyjściu jedynie dodatkowy filtr o częstotliwości granicznej około 1,9 kHz (4,7 kΩ/18 nF). Z IC2b sygnał trafia do wyjścia liniowego CON2, umożliwiającego dołączenie symulatora do zewnętrznego wzmacniacza z kolumnami. Ten sam sygnał jest podawany na potencjometr regulacji głośności (VR1) i dochodzi do wzmacniacza mocy zrealizowanego na układzie IC2a, sterującego wbudowanym głośnikiem.

Szczegóły układowe

Szczegółowy schemat ideowy przedstawiono na **rysunku 2**. Układ jest zbliżony do wersji z października 1990 roku, z kilkoma modyfikacjami.

Część zmian wynika z faktu, że współczesne zasilacze sieciowe prądu stałego to konstrukcje impulsowe zapewniające stabilne napięcie pod obciążeniem, dzięki czemu zbędny stał się oddzielny stabilizator napięcia. W latach 90. zasilacze wtyczkowe składały się zazwyczaj z transformatora sieciowego, mostka prostowniczego i kondensatorów filtrujących. Bez obciążenia dawały wyższe napięcie, które spadało wraz ze wzrostem poboru prądu. Przy rosnącym obciążeniu rosły także tętnienia. W przypadku układów wrażliwych na wahania napięcia konieczna była stabilizacja.

Kolejną zmianą było odsprzężenie zasilania wrażliwych obwodów generatora od zasilania wzmacniacza głośnikowego. Pozwoliło to na uzyskanie wyższego poziomu głośności. Wersja z 1990 roku grała nieco zbyt cicho. Bez rozdzielenia obwodów zasilania układ wpadałby w oscylacje przy wyższych poziomach głośności, wytwarzając pisk oraz „efekt motorówki" (ang. *motorboating*). W terminologii elektronicznej zjawisko to oznacza niepożądane oscylacje o bardzo małej częstotliwości, objawiające się na wyjściu jako sygnał przypominający pyrkot jednocylindrowego silnika motorówki. No, w zasadzie w symulatorze odgłosów morza taki efekt może i byłby na miejscu...

Następna modyfikacja miała na celu wyeliminowanie trzasków i stuków powstających w momentach gwałtownych skoków napięcia w układzie z poziomu bliskiego 0 V do niemal 12 V lub odwrotnie. Zmiany te omówiono szczegółowo w dalszej części opisu.

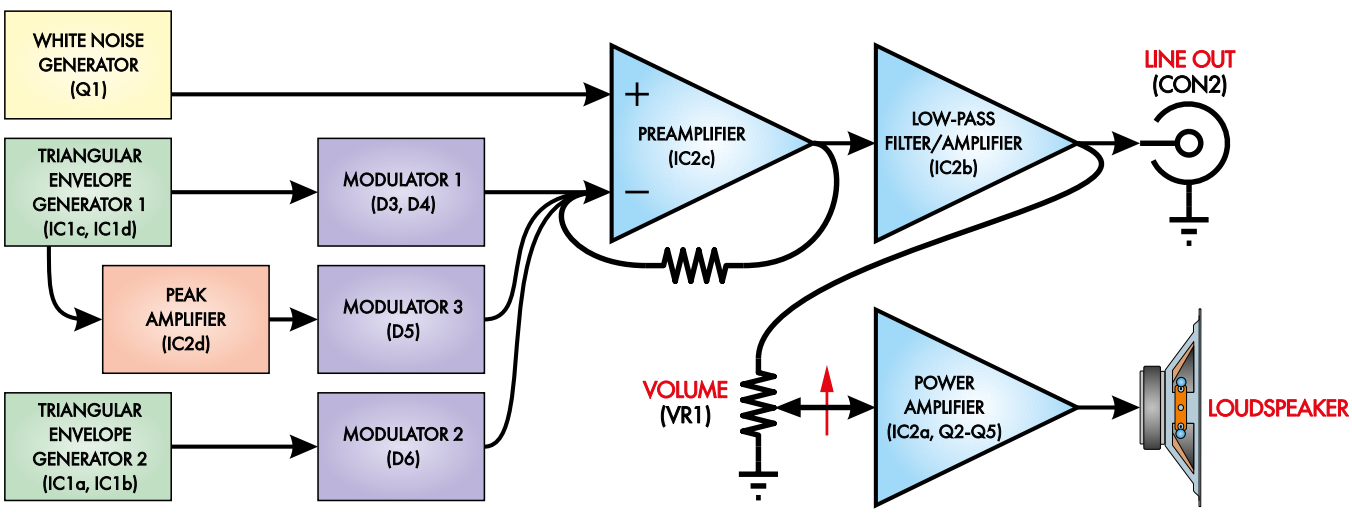
Głównym elementem układu jest źródło szumu oparte na tranzystorze NPN (Q1). Jego złącze baza–emiter pracuje jako dioda spolaryzowana zaporowo. Gdy napięcie na złączu osiągnie około 5 V, złącze ulega przebiciu wstecznemu, umożliwiając przepływ prądu. Zjawisko przebicia ma charakter losowy, a napięcie na złączu zawiera szum biały o znacznej amplitudzie. Aby zapobiec uszkodzeniu tranzystora, prąd złącza ograniczono do około 200 µA rezystorem 33 kΩ dołączonym do linii zasilania +12 V.

Szum jest sprzężony pojemnościowo z wejściem nieodwracającym (nóżka 10) wzmacniacza operacyjnego IC2c. Wejście jest polaryzowane napięciem 6 V z dzielnika utworzonego przez dwa rezystory 100 kΩ włączone między zasilaniem 12 V a masą. Zapewnia to symetrię sygnału wyjściowego w pełnym zakresie zasilania.

Generatory przebiegu trójkątnego

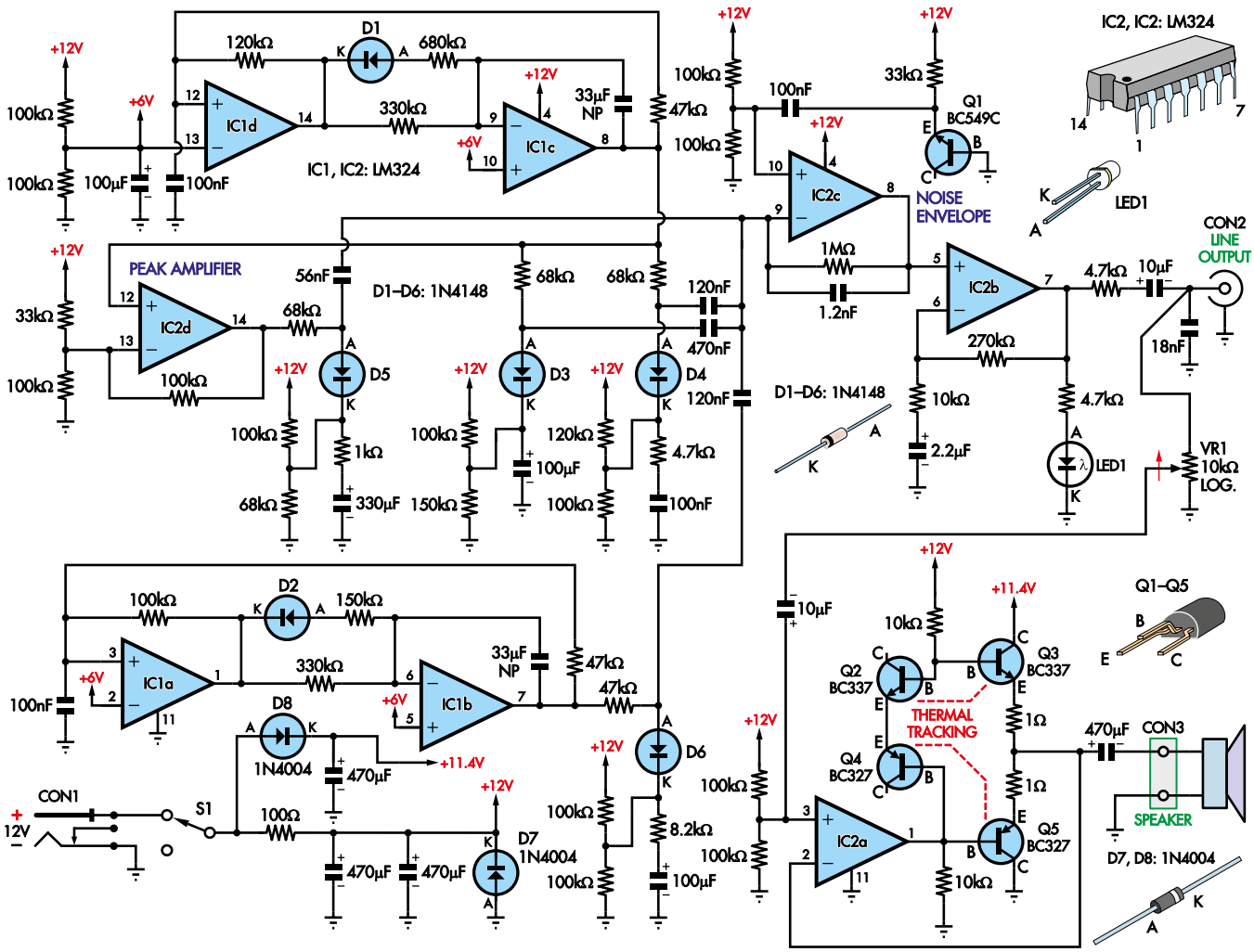
Pierwszy generator przebiegu trójkątnego tworzą razem układy IC1d i IC1c, a drugi generator – IC1a i IC1b. Pierwszy generator odpowiada za przebieg, który brzmi jak fala bliższa (głośniejsza), natomiast drugi symuluje falę rozbijającą się w oddali (cichszą). Ponieważ oba podukłady są niemal identyczne, opiszemy działanie tylko jednego, wskazując jedynie na drobne różnice między nimi.

IC1d pracuje jako przerzutnik Schmitta, a IC1c jest układem całkującym (integratorem). Na wyjściu IC1d występuje albo stan wysoki (około 10,5 V), albo niski (bliski 0 V). W zależności od stanu tego wyjścia kondensator 33 µF integratora jest albo ładowany, albo rozładowywany – z różnymi prędkościami. Gdy na wyjściu IC1d jest stan niski, kondensator ładuje się przez rezystor 680 kΩ z połączoną z nim szeregowo diodą D1 oraz dołączony do nich równolegle rezystor



Rysunek 1. Wzmocnieniem przedwzmacniacza szumu białego sterują dwa generatory obwiedni trójkątnych o różnych okresach. Dźwięk modyfikują trzy modulatory i jeden wzmacniacz wartości szczytowej, upodabniając go do odgłosu fal morskich rozbijających się o brzeg. Tak ukształtowany sygnał akustyczny jest filtrowany i podawany na wyjście liniowe (CON2) oraz, przez potencjometr głośności (VR1), do wzmacniacza mocy i wbudowanego głośnika

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 2. Schemat ideowy. Zrozumienie zasady działania układu ułatwi schemat blokowy z rysunku 1. Połączone szeregowo tranzystory Q2 i Q4 pełnią funkcję diod. Wytwarzają one napięcie polaryzacji dla tranzystorów stopnia wyjściowego Q3 i Q5. Są z nimi sprzężone termicznie, co zapobiega niekontrolowanemu nagrzewaniu się tranzystorów wyjściowych

330 kΩ. Gdy na wyjściu mamy stan wysoki, kondensator rozładowuje się wyłącznie przez rezystor 330 kΩ.

Kiedy na wyjściu IC1d panuje stan niski, napięcie na kondensatorze 33 µF (a zarazem napięcie wyjściowe IC1c; przypis redaktora) rośnie liniowo w kierunku dodatniego bieguna zasilania. Gdy wyjście IC1d przechodzi w stan wysoki, napięcie na kondensatorze liniowo opada.

Bardziej szczegółowy (ale i złożony) opis działania tego układu zamieszczono w ramce „Jak jest wytwarzany przebieg trójkątny”.

W drugim generatorze przebiegu trójkątnego (IC1a i IC1b) jedyna różnica polega na zastosowaniu rezystorów o mniejszych wartościach (100 kΩ i 150 kΩ, a nie 120 kΩ i 680 kΩ). Oba generatory pracują z różnymi częstotliwościami, co pozwoliło uzyskać większą nieregularność symulowanych fal. Zapewnia to także większą „prędkość docierania” drugiej fali do brzegu.

Jeden z problemów z generatorami przebiegu trójkątnego polega na tym, że wyjścia przerzutników Schmitta (nóżki 1 i 14 układu IC1) wytwarzają słyszalne stuki za każdym razem, gdy napięcie na ich wyjściu zmienia się gwałtownie między 0 V a 10,5 V. W projekcie z 1990 roku do tłumienia tych stuków użyto kondensatorów 100 nF umieszczonych między każdym wyjściem a masą. Po zmontowaniu tego układu w 2024 roku okazało się jednak, że metoda ta nie jest optymalna. Bez kondensatorów czasy narastania zboczy na wyjściach wynosiły 25 µs, a z kondensatorami skróciły się do 18 µs, co tylko pogorszyło sprawę. Znaczące wydłużenie czasu narastania – do 75 µs – zostało osiągnięte poprzez dołączenie kondensatorów 100 nF do wejść nieodwracających wzmacniaczy operacyjnych (do nóżki 12 układu IC1d oraz nóżki 3 układu IC1a). Wszelkie trzaski i stuki całkowicie zniknęły. Dwa ciche kliknięcia pojawiają się jedynie w momencie załączenia zasilania symulatora. Potem układ pracuje bez żadnych zakłóceń.

Modulatory diodowe

Jak widać na schemacie blokowym (**rysunek 1**), wyjścia obu generatorów przebiegów trójkątnych sterują układami modulatorów diodowych. Ich działanie opiera się na fakcie, że przewodność diody zależy od przyłożonego do niej napięcia stałego. Dioda przy napięciu 0,6 V przewodzi znacznie większy prąd niż przy zaledwie 0,2 V. Przypis redaktora: chodzi tu o rezystancję różniczkową (dynamiczną) diody, czyli rezystancję dla małych zmian napięcia, która jest tym mniejsza, im większa jest składowa stała prądu płynącego przez diodę.

W układzie pracują trzy modulatory oparte na diodach D3...D6. Diody D3 i D4 są dołączone do tego samego wyjścia (IC1c), więc można je traktować jako jeden modulator. Pierwszy generator przebiegu

eprasa.pl fb05997b40

trójkątnego steruje diodami D3 i D4, drugi – diodą D6. Trzeci modulator (z diodą D5) jest sterowany ze wzmacniacza wartości szczytowej IC2d.

Katody tych diod są dołączone do dzielników napięcia. Na przykład w przypadku diody D6 jest to para rezystorów 100 kΩ. Dzielniki określają napięcie polaryzacji wstępnej modulatora (dla diody D6 jest to 6 V). W dzielnikach pozostałych modulatorów zastosowano inne wartości rezystorów i wyznaczają one odmienne progi napięciowe. W ten sposób zapewniono właściwą sekwencję załączania modulatorów.

W przypadku diody D6 sygnał trójkątny z generatora musi przekroczyć 6 V, aby dioda została spolaryzowana w kierunku przewodzenia i zaczęła przewodzić. Napięcie trójkątne jest doprowadzone do anody D6 przez rezystor 47 kΩ i dalej do wejścia odwracającego przedwzmacniacza IC2c przez kondensator 120 nF. Dopóki napięcie z wyjścia IC1b jest niższe niż 6 V, dioda jest spolaryzowana zaporowo, a kondensator 120 nF „widzi" wielką impedancję względem masy. Gdy jednak napięcie trójkątne wzrośnie powyżej 6 V, dioda zacznie przewodzić, a jej impedancja dynamiczna (dla składowej zmiennej) zacznie maleć. W miarę wzrostu napięcia na diodzie kondensator 120 nF będzie „widział" stopniowo malejącą impedancję względem masy. Wzmacniacz operacyjny IC2c pracuje w konfiguracji nieodwracającej, zatem impedancja ta bezpośrednio wyznacza jego wzmocnienie. Zmniejszenie impedancji spowoduje wzrost wzmocnienia i odwrotnie. W ten sposób modulatory diodowe sterują wzmocnieniem przedwzmacniacza i modulują poziom głośności.

Gdy napięcie na D6 osiągnie 0,6 V, dioda zachowa się niemal jak zwarcie dla sygnału zmiennego, a impedancja względem masy będzie wówczas wyznaczona przez rezystor 8,2 kΩ dołączony do katody diody. Kondensator 100 µF utworzy wraz z rezystorem 8,2 kΩ filtr górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej poniżej 0,2 Hz.

Diody D3 i D4 działają analogicznie, tyle że ich napięcia polaryzacji wynoszą odpowiednio 7,2 V oraz 5,45 V. Zauważmy, że D4 steruje innym filtrem górnoprzepustowym – złożonym z rezystora 4,7 kΩ i kondensatora 100 nF, o częstotliwości granicznej (–3 dB) przy 340 Hz. Ze względu na różne napięcia polaryzacji dioda D4 zaczyna przewodzić wcześniej niż D3 (sterująca niższymi częstotliwościami), co tworzy realistyczny efekt narastającego szumu („szuuu") załamującej się fali morskiej.

Jak jest wytwarzany przebieg trójkątny

W pierwszym generatorze sygnału trójkątnego IC1d jest przerzutnikiem Schmitta, a IC1c to układ całkujący (integrator). Na wyjściu IC1d pojawia się na przemian stan wysoki (około 10,5 V) i niski (około 0 V), a kondensator 33 µF jest ładowany lub rozładowywany z różnymi stałymi czasowymi. Gdy na wyjściu IC1d jest stan niski, kondensator ładuje się przez rezystor 680 kΩ i diodę oraz połączony równolegle rezystor 330 kΩ, a gdy wyjście IC1d przechodzi w stan wysoki, rozładowuje się wyłącznie przez rezystor 330 kΩ.

Przerzutnik Schmitta IC1d otrzymuje na wejściu nieodwracającym (nóżka 12) napięcie z wyjścia IC1c (nóżka 8) przez rezystor 47 kΩ. Histerezę zapewnia rezystor 120 kΩ między nóżką 12 a wyjściem układu IC1d. Gdy na wyjściu tym panuje stan niski, napięcie na wejściu 12 jest obniżane przez rezystor 120 kΩ w układzie dzielnika z rezystorem 47 kΩ dołączonym do wyjścia IC1c. Wejście odwracające (nóżka 13) układu IC1d znajduje się na stałym potencjale 6 V.

Wyjście IC1d zmieni stan na niski, gdy napięcie na nóżce 12 wzrośnie powyżej potencjału nóżki 13. Przyjmując, że nóżka 14 układu IC1d jest w stanie niskim (0 V), a napięcie na wyjściu IC1c (nóżka 8) narasta, możemy wyznaczyć napięcie wyjściowe IC1c, przy którym na nóżce 12 układu IC1d pojawi się dokładnie 6 V. Gdy na rezystorze 120 kΩ odkłada się 6 V, płynie przez niego prąd 50 µA. Napięcie na nóżce 8 układu IC1c musi być na tyle wysokie, aby wywołać przepływ prądu 50 µA przez rezystor 47 kΩ, którego drugi koniec (nóżka 12 IC1d) jest na poziomie 6 V. Spadek napięcia na rezystorze 47 kΩ wyniesie 2,35 V (47 kΩ · 50 µA). Zatem potencjał na nóżce 8 musi osiągnąć 8,35 V (6 V + 2,35 V). Oznacza to, że kondensator 33 µF ładuje się do momentu, aż na nóżce 8 IC1c pojawi się 8,35 V. Napięcie na nóżce 9 pozostaje stałe (6 V), gdyż IC1c tak steruje swoim wyjściem, aby ten potencjał utrzymać.

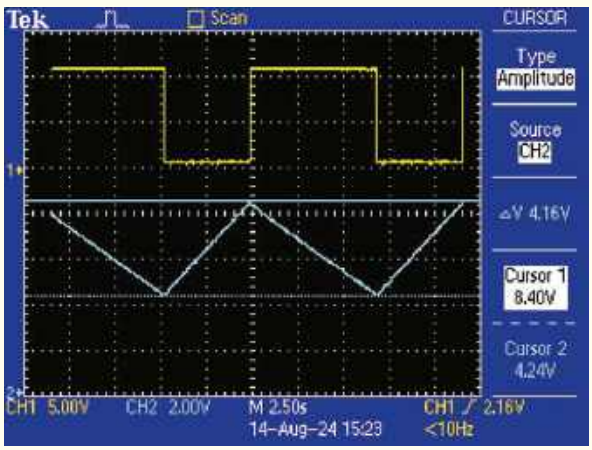
Gdy napięcie na nóżce 12 układu IC1d nieznacznie przekroczy 6 V, jego wyjście przełącza się w stan wysoki (około 10,5 V). Wówczas kondensator zaczyna się rozładowywać przez rezystor 330 kΩ, a napięcie na nóżce 8 układu IC1c spada w kierunku 0 V. Dioda D1 jest w tym stanie spolaryzowana zaporowo. Tu również możemy obliczyć, jakie będzie napięcie na nóżce 8 w momencie, gdy napięcie na nóżce 12 ponownie opadnie do 6 V. Ponieważ wyjście IC1d ma potencjał 10,5 V, a na nóżce 12 panuje 6 V, spadek napięcia na rezystorze 120 kΩ wynosi 4,5 V (10,5 V – 6 V). Prąd płynący przez ten rezystor jest równy 37,5 µA. Taki sam prąd popłynie przez rezystor 47 kΩ i odłoży się na nim napięcie 1,76 V. Napięcie to odjęte od 6 V daje 4,23 V. Gdy takie właśnie napięcie zostanie osiągnięte na nóżce 8, wyjście IC1d ponownie przełączy się w stan niski, co rozpocznie kolejny cykl ładowania kondensatora. Prądy wejściowe wzmacniaczy operacyjnych pomijamy, gdyż nie przekraczają one 100 nA.

Progi przełączania wynoszą 4,23 V oraz 8,35 V, co oznacza histerezę około 4,1 V wyznaczoną przez rezystor 120 kΩ. Bez niego nie byłoby możliwe uzyskanie stabilnych oscylacji.

Przebieg na nóżce 8 układu IC1c ma kształt niesymetrycznego trójkąta, szybciej narastającego niż opadającego. Wynika to częściowo z faktu, że wyjście LM324 potrafi „na dole" osiągnąć niemal 0 V, lecz „na górze" przy zasilaniu 12 V – tylko około 10,5 V. Drugim powodem jest istnienie dodatkowej ścieżki prądowej przez diodę D1 podczas stanu niskiego na wyjściu IC1d.

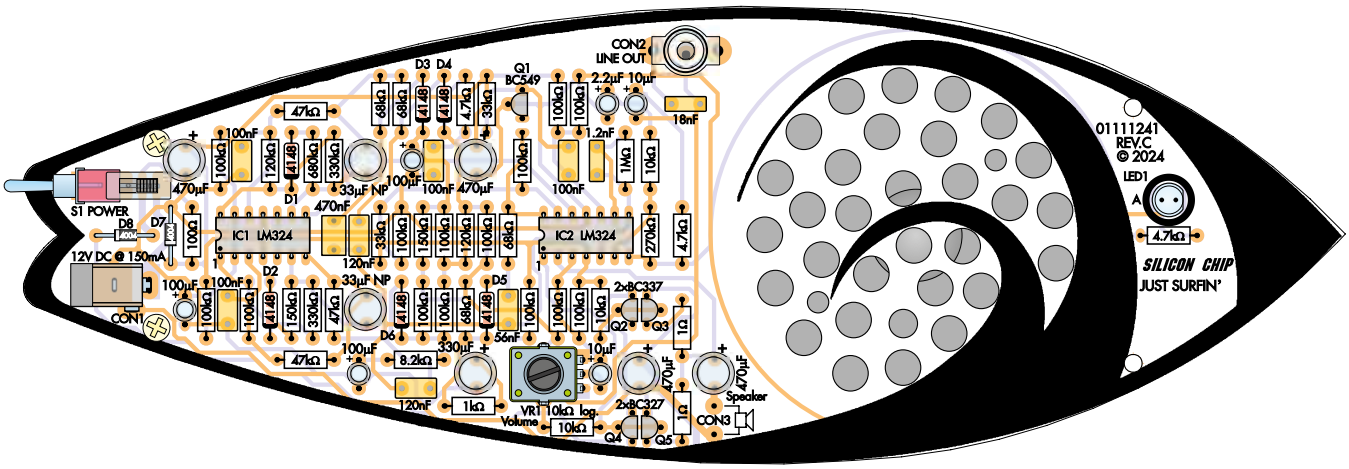
Przebiegi zmierzone oscyloskopem przedstawia **oscylogram 1**. Kanał górny (żółty) to sygnał wyjściowy IC1d (nóżka 14). Kanał niebieski to przebieg trójkątny z wyjścia IC1c (nóżka 8). Fala trójkątna zmienia się w zakresie od 4,2 V do 8,4 V, co doskonale pokrywa się z obliczeniami teoretycznymi.

Szybsze narastanie i wolniejsze opadanie przebiegu trójkątnego wiernie odzwierciedla dynamikę fal morskich, które napływają ku brzegowi gwałtownie, a w stronę morza cofają się powoli.



Oscylogram 1. Wykres niebieski to przebieg trójkątny wytwarzany na nóżce 8 układu IC1c. Pomiar kursorami wykazuje, że różnica napięć między wartością maksymalną a minimalną wynosi 4,16 V. Napięcie na nóżce 14 układu IC1d, decydujące o ładowaniu (stan niski) lub rozładowywaniu (stan wysoki) kondensatora, widzimy na wykresie żółtym

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 3. Zmontowanie płytki drukowanej to całkiem prosta sprawa. Wystarczy rozmieścić elementy zgodnie z rysunkiem. Musimy zadbać o prawidłowe ustawienie układów scalonych, diod i polaryzowanych kondensatorów elektrolitycznych. W przypadku kondensatorów elektrolitycznych biegunowych dłuższe wyprowadzenie trafia w pole oznaczone symbolem +. Głośnik montowany jest na dolnej stronie płytki. Łączymy go z CON3. Dźwięk wydostaje się przez otwory w laminacie

Wzmacniacz wartości szczytowej

Na wzmocnienie stopnia IC2c ma również wpływ modulator na diodzie D5, sterowany ze wzmacniacza wartości szczytowej IC2d. Sygnał wejściowy tego stopnia pochodzi z wyjścia IC1c. Polaryzacja wejścia odwracającego IC2d (nóżka 13) jest ustalona na poziomie około 7 V przez rezystor 33 kΩ i dwa rezystory 100 kΩ. W rezultacie wyjście IC2d pozostaje w stanie niskim, dopóki napięcie na wyjściu układu IC1c (nóżka 8) nie osiągnie tego progu. W tym momencie IC2d zaczyna gwałtownie wzmacniać sygnał, tworząc przebieg bardziej stromy i szybszy. Daje to efekt uderzenia potężnej, spiętrzonej fali rozbijającej się z impetem o brzeg.

Filtrowanie dolnoprzepustowe

W stopniu z IC2c, wzmacniającym biały szum z tranzystora Q1, kondensator 1,2 nF w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego ogranicza pasmo od góry powyżej 130 Hz. Z kolei kondensator 2,2 µF w obwodzie sprzężenia zwrotnego IC2b obcina pasmo od dołu poniżej 7 Hz.

Stopień z IC2b to wzmacniacz nieodwracający o wzmocnieniu równym 28. W oryginalnym układzie z 1990 roku wzmocnienie tego stopnia wynosiło 11, lecz dzięki optymalizacji obwodu zasilania (opisanej dalej) możliwe stało się uzyskanie większego wzmocnienia. Przekłada się to na wyraźny wzrost maksymalnej głośności – o ponad 8 dB.

Dioda LED1 jest sterowana bezpośrednio z wyjścia wzmacniacza IC2b przez rezystor 4,7 kΩ. Świeci ona ze zmieniającą się jasnością, z grubsza obrazując aktualny poziom natężenia dźwięku.

Za układem IC2b umieszczono kolejny filtr dolnoprzepustowy, na który składają się rezystor 4,7 kΩ, kondensator sprzęgający 10 µF i kondensator filtrujący 18 nF. Kondensator 18 nF tłumi częstotliwości powyżej 1,88 kHz, co dodatkowo zmiękcza wysokie tony i nadaje szumowi naturalny charakter.

Sygnał za filtrem trafia do gniazda RCA (CON2) oraz do potencjometru regulacji głośności 10 kΩ (VR1), z którego sygnał podawany jest na stopień mocy oparty na wzmacniaczu operacyjnym IC2a i tranzystorach Q2...Q5. Tranzystory Q3 i Q5 pełnią funkcję wtórnika napięciowego (wzmacniacza prądowego) wyjścia wzmacniacza operacyjnego, zapewniając odpowiednią wydajność prądową. Są objęte pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego IC2a, co redukuje zniekształcenia skrośne (przejściowe).

Tranzystory Q2 i Q4 ustalają napięcie polaryzacji baz tranzystorów wyjściowych (Q3 i Q5). W tranzystorach tych użyto wyłącznie wyprowadzeń bazy i emitera, wykorzystując je jako diody wyznaczające napięcia po około 0,6 V. Napięcia te odpowiadają napięciom baza–emiter tranzystorów stopnia wyjściowego (Q3 i Q5). Napięcie polaryzacji sprawia, że przez tranzystory końcowe płynie pewien minimalny prąd spoczynkowy, co minimalizuje zniekształcenia skrośne w chwili przechodzenia sygnału przez poziom środkowy (6 V), kiedy to następuje przełączanie między Q3 a Q5. Tego typu wzmacniacz określa się mianem klasy AB. W klasie B jeden tranzystor wyjściowy przewodzi przy dodatnich półokresach sygnału, a drugi przy ujemnych. Nasz układ przy niskich poziomach sygnału wykazuje cechy klasy A, kiedy to dzięki niewielkiemu prądowi spoczynkowemu oba tranzystory (Q3 i Q5) przewodzą jednocześnie.

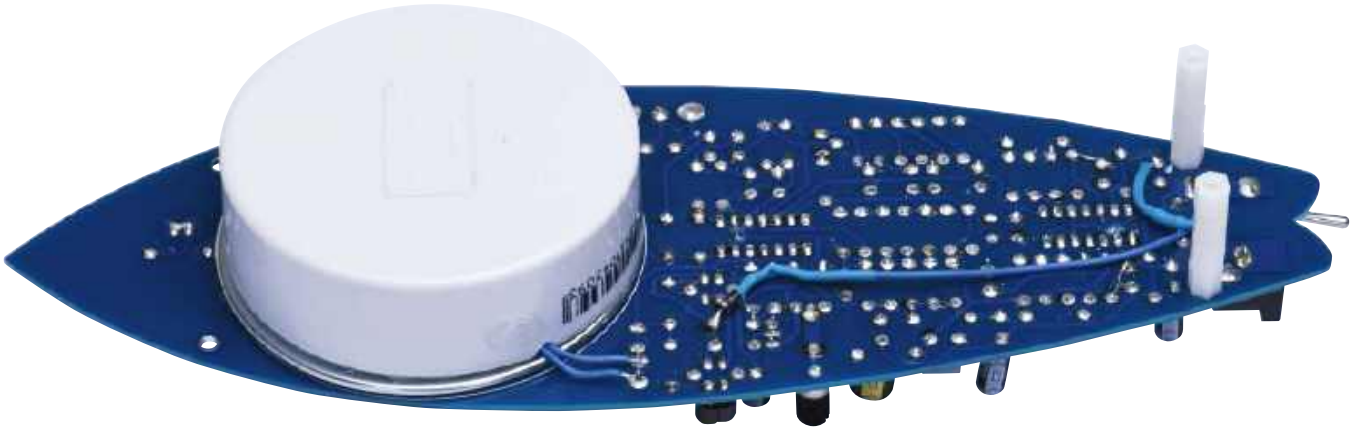
Prąd polaryzacji jest stabilizowany przez rezystory emiterowe 1 Ω. Wzrost prądu spoczynkowego spowodowałby zwiększenie spadku napięcia na tych rezystorach, co zmniejszyłoby napięcie polaryzacji baza–emiter tranzystorów Q3 i Q5, a tym samym płynący przez nie prąd. Napięcia polaryzacji z Q2 i Q4 pozostają względnie stałe, o ile nie zmienia się temperatura.

Stabilność prądu spoczynkowego w funkcji temperatury osiągnięto poprzez fizyczne dociśnięcie obudów tranzystorów Q2 do Q3 oraz Q4 do Q5, dzięki czemu powiązane pary tranzystorów utrzymują zbliżoną temperaturę. Zapobiega to zjawisku ucieczki termicznej, gdy tranzystory wyjściowe nagrzewają się podczas pracy z większą mocą. Bez sprzężenia termicznego i przy stałym napięciu polaryzacji nagrzewanie się Q3 i Q5 powodowałoby zmianę charakterystyki zależności prądu kolektora od napięcia baza–emiter, wywołując zwiększanie się prądu, dalsze nagrzewanie i w efekcie lawinowy wzrost prądu oraz termiczne zniszczenie struktury. W naszym układzie tranzystory Q2 i Q4 również się nagrzewają, odpowiednio obniżając napięcie polaryzacji i ograniczając zagrożenie uszkodzenia termicznego.

Tranzystory Q3 i Q5 sterują głośnikiem poprzez rezystory 1 Ω i kondensator wyjściowy 470 µF. Kondensator ten odcina składową stałą 6 V obecną na wyjściu wzmacniacza, dzięki czemu do głośnika dociera wyłącznie sygnał zmienny.

Cały układ jest zasilany z zewnętrznego zasilacza wtyczkowego napięcia stałego 12 V podłączonego do gniazda CON1 i wyłącznika S1. Zasilanie jest

eprasa.pl fb05997b40



Warto zauważyć, że poza dwoma przewodami głośnika pozostałe elementy widoczne na tej stronie płytki nie są niezbędne – były one użyte jedynie w wersji prototypowej. Z tyłu głośnika dodano plastikową osłonę, tworzącą komorę akustyczną wzmacniającą bas

prowadzone dwiema niezależnymi ścieżkami. Pierwsza wiedzie przez rezystor separujący 100 Ω do obwodu zasilania wzmacniaczy operacyjnych. Linia ta jest odsprzęgana dwoma kondensatorami 470 µF. Druga ścieżka dochodzi przez diodę D8 bezpośrednio do stopnia mocy wzmacniacza głośnikowego. Jest odsprzęgana jednym kondensatorem 470 µF. Rezystor separujący 100 Ω zapobiega powstawaniu oscylacji i „efektu motorówki". Wraz z dwoma kondensatorami 470 µF zapewnia stabilne, filtrowane napięcie zasilania dla wrażliwych wzmacniaczy operacyjnych, odizolowane od linii zasilającej końcowy stopień mocy. Bez tej separacji każdy spadek napięcia wywołany poborem prądu przez pracujący głośnik przenosiłby się na zasilanie wzmacniaczy operacyjnych, modulując generowane przebiegi i prowadząc do wzbudzania się układu.

Zabezpieczenie przed odwrotną polaryzacją zasilania zrealizowano za pomocą diod D7 i D8. Dioda D7 ogranicza napięcie o odwrotnej polaryzacji do wartości –0,6 V, a prąd zwarciowy jest ograniczany przez rezystor 100 Ω do bezpiecznych 114 mA. Z kolei dioda D8 zabezpiecza kondensator 470 µF w sekcji wzmacniacza mocy, całkowicie blokując przepływ prądu w przypadku błędnej polaryzacji zasilacza.

Montaż

Wszystkie elementy symulatora szumu fal montujemy na dwustronnej niebieskiej płytce drukowanej z metalizowanymi otworami, o wymiarach 236 × 80 mm (kod Silicon Chip 01111241).

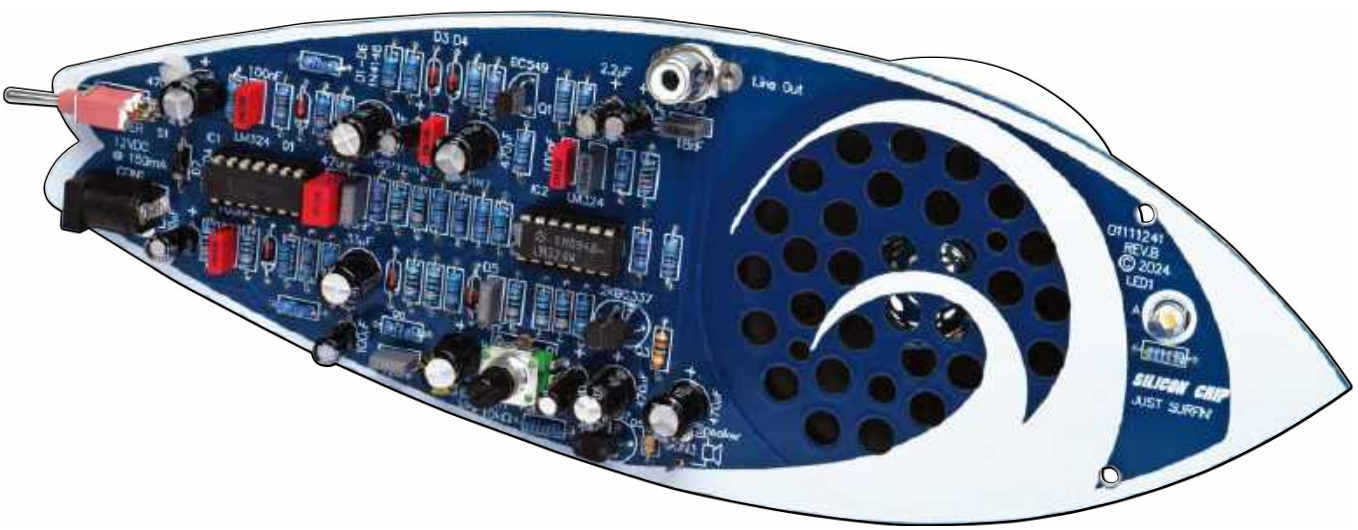
Jak widać na rysunku montażowym (**rysunek 3**), większość podzespołów znajduje się na górnej stronie płytki. Jedynie głośnik mocowany jest na dolnej stronie. Z tyłu głośnika przytwierdzona jest osłona (zaślepka), która pełni rolę komory akustycznej poprawiającej odtwarzanie tonów niskich.

Montaż rozpoczynamy od wlutowania rezystorów. Ich kody paskowe podano w liście elementów, warto jednak sprawdzić ich wartości multimetrem. Niektóre paski mogą być trudne do odczytania na niebieskim tle korpusu rezystora.

W następnej kolejności lutujemy diody. D1... D6 to miniaturowe diody 1N4148, a D7 i D8 to diody prostownicze 1N4004. Zwracajmy uwagę na ich polaryzację (położenie paska na obudowie). Dalej montujemy podstawki pod układy scalone, pamiętając o ich prawidłowym ustawieniu – z wycięciem tam, gdzie na płytce są wyprowadzenia 1 i 14.

Teraz można wlutować poliestrowe kondensatory MKT. Elementy te nie są polaryzowane, więc kierunek ich montażu jest dowolny. Zamiast pełnego oznaczenia pojemności mają one oznaczenia kodowe. Podano je w liście elementów.

Kolejnym krokiem jest montaż tranzystorów. W układzie zastosowano trzy typy: BC549C (Q1), BC337 (Q2 i Q3) oraz BC327 (Q4 i Q5). Należy zwrócić szczególną uwagę na ich rozmieszczenie. Pary Q2/Q3 oraz Q4/Q5 powinny być zwrócone płaskimi ściankami obudów do siebie. Najlepiej, aby się



Gotowy symulator szumu fal można postawić na półce, biurku lub innej płaskiej powierzchni

eprasa.pl fb05997b40

Wykaz elementów

1 dwustronna płytka drukowana z metalizowanymi otworami, 236 × 80 mm, niebieska maska lutownicza, kod Silicon Chip 01111241
1 głośnik 76 mm, 8 Ω, 1 W (SPK1)
1 zasilacz wtyczkowy prądu stałego 12 V, minimum 150 mA
1 gniazdo zasilania do montażu na płytce drukowanej, odpowiadające wtyczce zasilacza (CON1)
1 gniazdo RCA („Cinch"), pionowe, do montażu na płytce drukowanej (CON2)
1 potencjometr logarytmiczny (audio) 10 kΩ, pionowy, 9 mm, do montażu na płytce drukowanej (VR1)
1 przełącznik kątowy SPDT, hebelkowy lub suwakowy, do montażu na płytce drukowanej (S1)
2 podstawki pod układy scalone, DIL, 14-pinowe
2 kołki montażowe, średnica 1 mm (do CON3)
1 zaślepka z PCW, średnica 65 mm (na przykład kanalizacyjna DWV lub odpowiednik)
2 tuleje dystansowe, nylonowe, gwintowane M3, długość 25...30 mm
2 śruby maszynowe M3 × 25 mm z łbem walcowym

Półprzewodniki

2 poczwórne wzmacniacze operacyjne LM324 (IC1, IC2)
1 tranzystor NPN BC549 (najlepiej z grupy C), 30 V/100 mA (Q1)
2 tranzystory NPN BC337, 45 V/800 mA (Q2, Q3)
2 tranzystory PNP BC327, 45 V/800 mA (Q4, Q5)
6 diod impulsowych 1N4148, 75 V/200 mA (D1...D6)
2 diody prostownicze 1N4004, 400 V/1 A (D7, D8)
1 biała dioda LED, 5 mm (LED1)

Kondensatory (wszystkie poliestrowe MKT, 63 lub 100 V, jeśli nie zaznaczono inaczej)

4 sztuki 470 µF/16 V, elektrolityczny, przewlekany
1 sztuka 330 µF/16 V, elektrolityczny, przewlekany
3 sztuki 100 µF/16 V, elektrolityczny, przewlekany
2 sztuki 33 µF/50 V, elektrolityczny bipolarny (NP), przewlekany
2 sztuki 10 µF/16 V, elektrolityczny, przewlekany
1 sztuka 2,2 µF/63 V, elektrolityczny, przewlekany
1 sztuka 470 nF (oznaczenie 474)
2 sztuki 120 nF (oznaczenie 124)
4 sztuki 100 nF (oznaczenie 104)
1 sztuka 56 nF (oznaczenie 563)
1 sztuka 18 nF (oznaczenie 183)
1 sztuka 1,2 nF (oznaczenie 122)

Rezystory (wszystkie przewlekane, 0,25 W, 1%)

1 sztuka 1 MΩ	2 sztuki 150 kΩ	3 sztuki 47 kΩ	3 sztuki 4,7 kΩ
1 sztuka 680 kΩ	2 sztuki 120 kΩ	2 sztuki 33 kΩ	1 sztuka 1 kΩ
2 sztuki 330 kΩ	14 sztuk 100 kΩ	3 sztuki 10 kΩ	1 sztuka 100 Ω
1 sztuka 270 kΩ	4 sztuki 68 kΩ	1 sztuka 8,2 kΩ	2 sztuki 1 Ω 5%

bezpośrednio stykały (można nanieść odrobinę pasty termoprzewodzącej), co zapewni optymalne sprzężenie termiczne.

Następnie montujemy gniazdo zasilania (CON1) oraz wyłącznik S1. Jako S1 można zastosować przełącznik hebelkowy lub suwakowy, kątowy, do montażu na płytce drukowanej. Montujemy również diodę LED1, zwracając uwagę, aby dłuższe wyprowadzenie (anoda) trafiło w otwór oznaczony literą „A". Dioda powinna przylegać do płytki.

Dalej wlutowujemy kondensatory elektrolityczne. Większość z nich to elementy biegunowe i muszą zostać zamontowane zgodnie z polaryzacją. Znak plus (+) na płytce wskazuje biegun dodatni (wyprowadzenie dłuższe), a pasek na obudowie elementu oznacza biegun ujemny. Dwa kondensatory 33 µF to wersje bipolarne (NP; „non-polarised") i można je wlutować w dowolnym kierunku.

Teraz montujemy gniazdo RCA do montażu na płytce drukowanej (CON2) oraz potencjometr VR1. W punktach podłączenia głośnika (CON3) wlutowujemy dwa kołki montażowe (na przykład odcinki drutu). Głośnik montowany jest na dolnej stronie płytki drukowanej i łączony z kołkami CON3 dwoma krótkimi odcinkami przewodu montażowego. Na czas uruchamiania i testów głośnik można pozostawić nieprzyklejony i dołączyć go przewodami tymczasowo.

Uruchamianie i testowanie

Umieszczamy oba układy scalone LM324 w podstawkach, upewniając się, że wcięcie na obudowie i nóżka 1 znajdują się we właściwych położeniach. Podczas wciskania układów w podstawki uważamy, aby żadna z nóżek nie podwinęła się pod obudowę.

Materiały dodatkowe dostępne są na stronie Silicon Chip:
https://www.siliconchip.com.au/Shop/8/7384

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

Po podłączeniu zasilacza 12 V i załączeniu wyłącznika S1 powinna zaświecić się dioda LED1, a z głośnika powinien popłynąć szum fal morskich. Jeśli dźwięk nie jest słyszalny, regulujemy potencjometr głośności VR1. Jeżeli dźwięku nadal brak, mierzymy napięcie zasilania układów IC1 i IC2. Między nóżkami 11 a 4 powinno występować napięcie około 11,75 V. Sprawdzamy również poprawność montażu, ustawienie elementów oraz czy na płytce nie ma zwarć.

Po upewnieniu się, że układ działa prawidłowo, głośnik można na stałe przykleić do dolnej strony płytki silikonem neutralnym (na przykład dekarskim), klejem na gorąco lub innym klejem montażowym. Na dolnej stronie płytki nadrukowano okrąg o średnicy 76 mm, wskazujący optymalne miejsce montażu głośnika. Z tyłu głośnika warto zamontować zaślepkę do rur kanalizacyjnych z PCW (zaślepka 65 mm typu DWV), która utworzy zamkniętą komorę akustyczną i znacząco poprawi odtwarzanie basów. W dolnej krawędzi zaślepki należy okrągłym pilnikiem wykonać małe nacięcie na przewody głośnikowe. Zaślepkę przyklejamy następnie klejem do tylnego kołnierza głośnika.

W płytce w pobliżu CON1 i S1 są otwory montażowe, w których śrubami M3 można zamocować tuleje dystansowe, dzięki czemu symulator szumu fal będzie mógł stabilnie spoczywać poziomo albo stać pionowo, opierając się na osłonie głośnika i jednej z tulei dystansowych. ■

John Clarke

REKLAMA

Znajdziesz nas również na Facebooku:
facebook.com/ElportalPL

eprasa.pl fb05997b40



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

Komputer Pico – terminal z modułem Raspberry Pi

Przekształcamy moduł Raspberry Pi Pico/Pico W/Pico 2 w samodzielny komputer z klawiaturą USB i monitorem HDMI. Dzięki płytce drukowanej cały układ zmieści się w zwartej, poręcznej obudowie.



W numerze Silicon Chip z kwietnia 2024 roku („EdW" 08/2026 i 09/2026) zaprezentowaliśmy cyfrowy terminal wideo (www.siliconchip.au/Series/413), do którego można było podłączyć monitor HDMI, klawiaturę USB oraz moduł Raspberry Pi Pico lub inny moduł z portem szeregowym. System tworzył samodzielną konsolę terminalową, idealną do pracy z komputerami jednopłytkowymi. Jego schemat blokowy przedstawiono na **rysunku 1**.

Układ opisywany w niniejszym artykule można podłączyć do płytki cyfrowego terminala wideo, przekształcając go w wielofunkcyjny komputer.

Układ zawiera między innymi zegar czasu rzeczywistego z kalendarzem (RTCC), gniazdo kart microSD, odbiornik podczerwieni oraz stereofoniczne wyjście audio (gniazdo jack 3,5 mm). Przekształci on terminal w pełnoprawny, samodzielny komputer oparty na module Pico, zajmujący dokładnie tyle samo miejsca co sam terminal.

Na **rysunku 2** pokazano schemat blokowy cyfrowego terminala wideo z płytką komputera Pico. Nowy układ znajduje się w części środkowej. Płytka komputera zastępuje moduł MOD2 terminala, dodając liczne nowe funkcje.

Funkcje cyfrowego terminala wideo

Opisywany we wspomnianym wcześniej artykule cyfrowy terminal wideo jest konstrukcją niezwykle zwartą (zaledwie 105 × 80 × 25 mm) i zawiera trzy moduły Raspberry Pi Pico (MOD1...MOD3), realizujące odrębne zadania.

MOD1 stanowi szeregowy interfejs monitora wideo. Odbiera dane szeregowe z modułu MOD2, interpretuje je zgodnie ze standardem VT100 i wytwarza sygnał wideo przesyłany przez gniazdo HDMI do współczesnego monitora lub telewizora.

MOD3 pełni funkcję hosta USB obsługującego klawiaturę. Odbiera kody naciśniętych klawiszy i przesyła je w formacie VT100 do modułu MOD2.

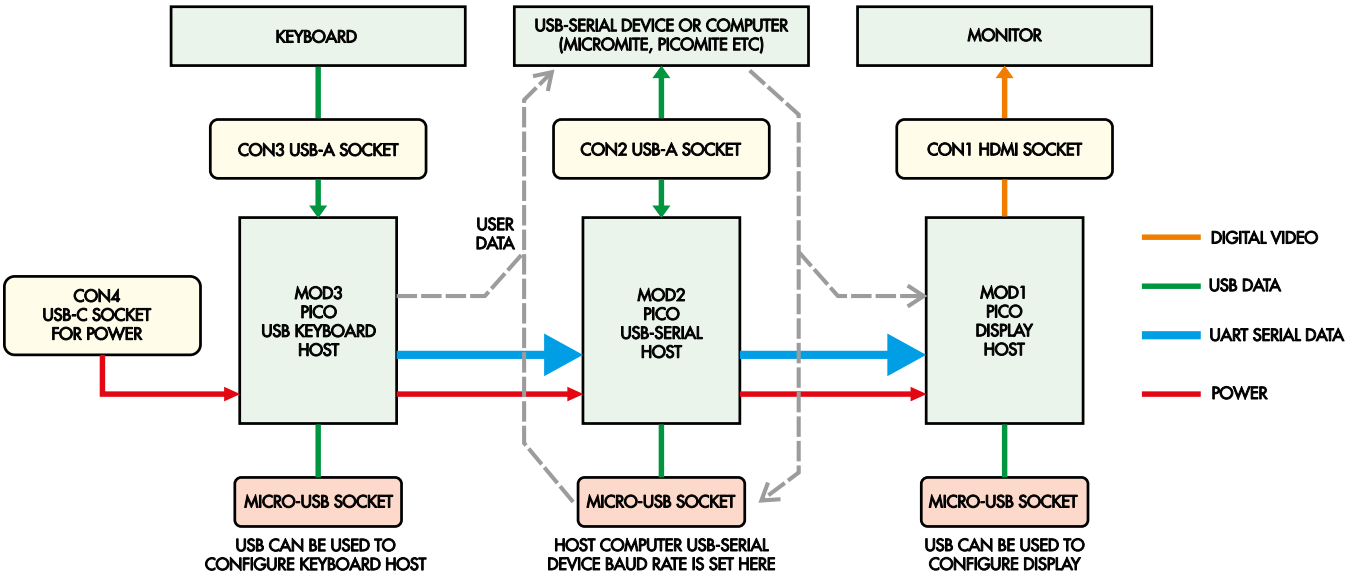
MOD2 pracuje jako host USB przeznaczony do podłączenia modułu USB/UART. Rozpoznaje podłączony moduł Raspberry Pi Pico oraz wiele innych urządzeń. MOD2 przekazuje dane pomiędzy podłączonym systemem a modułami MOD1 i MOD3.

Ideą projektu było stworzenie terminala wideo z klawiaturą, który mógłby współpracować z niemal dowolnym urządzeniem przez UART lub USB. Doszliśmy jednak do wniosku, że MOD2 można zastąpić modułem Pico (lub Pico W) z innym oprogramowaniem układowym. Taki moduł Pico, komunikujący się bezpośrednio z modułami

Cechy i parametry techniczne

- złącze klawiatury USB i cyfrowe wyjście do monitora
- interfejs I²C i wbudowany zegar czasu rzeczywistego z podtrzymaniem bateryjnym
- przetwornik cyfrowo-analogowy audio z wyjściem na gniazdo jack 3,5 mm i listwę goldpin
- możliwość dodania pamięci SPI: FLASH (4 MB) i PSRAM (8 MB)
- gniazdo karty microSD
- port USB Host do podłączenia na przykład pendrive'a
- opcjonalny moduł przetwornika PWM audio
- odbiornik zdalnego sterowania na podczerwień (IR)
- wszystkie linie wejścia/wyjścia Pico są wyprowadzone na listwę goldpin
- dwie diody LED do dyspozycji użytkownika
- cyfrowy terminal wideo jako interfejs klawiatury i wyświetlacza
- obsługa modułów Pico, Pico W oraz Pico 2
- pasuje do obudowy Altronics H0192

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 1. W oryginalnym cyfrowym terminalu wideo moduł Raspberry Pi Pico – lub podobny – mógł korzystać z klawiatury i monitora, lecz musiał być w tym celu podłączony z zewnątrz przez złącze USB (w środku u góry)

klawiatury i monitora, tworzyłby w pełni autonomiczny komputer.

Przykładowo: Pico z wgranym oprogramowaniem PicoMite przekształca terminal w samodzielny komputer z interpretatorem języka BASIC, wyjściem HDMI i klawiaturą USB. W artykule o cyfrowym terminalu wideo przedstawiliśmy już kilka pomysłów idących w tym kierunku. Wielu czytelników na pewno zainteresuje eksperymentowanie z takim systemem komputerowym. Uznaliśmy więc, że warto tę koncepcję rozwinąć i opracować pełny projekt tego typu maszyny. Tak narodziło się opisywane urządzenie – komputer Pico.

Komputer Pico

W komputerze Pico, podobnie jak w wielu innych naszych projektach, mikrokontroler jest łączony z zestawem użytecznych układów peryferyjnych. O ile w takich systemach stosuje się typowo wyświetlacze LCD, o tyle w tym przypadku podłączamy urządzenie do nowoczesnego monitora HDMI.

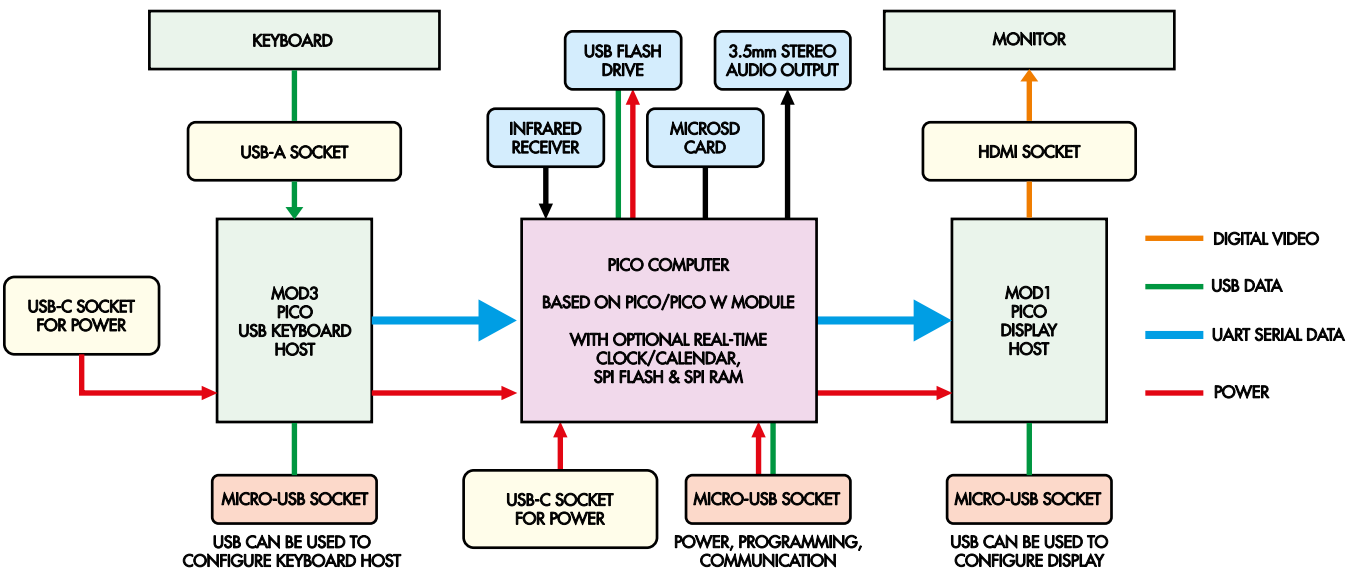
Płytka drukowana zawierająca moduł Raspberry Pi Pico ma kształt dopasowany do cyfrowego terminala wideo. Można ją zamontować piętrowo nad płytką terminala w standardowej obudowie (Altronics H0192).

Układ zaprojektowano do współpracy z cyfrowym terminalem wideo, ale może on znaleźć również inne zastosowania. Planujemy projekt, w którym komputer Pico będzie działał w pełni samodzielnie.

Konstrukcja urządzenia łączy w sobie gotowe moduły, elementy przewlekane (THT) oraz montowane powierzchniowo (SMD). Podzespoły SMD są w obudowach SOIC lub 1206 (metrycznie 3216) albo większych, więc o ile dysponuje się odpowiednimi narzędziami i podstawowymi umiejętnościami lutowania, zmontowanie układu będzie proste.

Szczegóły układowe

Schemat ideowy komputera Pico przedstawiono na **rysunku 3**. Układ zajmuje miejsce modułu MOD2 w cyfrowym terminalu



Rysunek 2. Zastępując w cyfrowym terminalu wideo moduł MOD2 płytką komputera Pico, uzyskujemy zintegrowany system komputerowy o szerokich możliwościach

eprasa.pl fb05997b40

wideo, należało zatem zapewnić odpowiednie połączenie obu płytek. Komputer Pico jest podłączany do płytki cyfrowego terminala wideo za pomocą pary 20-pinowych listew kołkowych (CON11), umieszczonych na spodzie płytki komputera. Jak widać, w CON11 wykorzystano jedynie niewielką część wyprowadzeń. Znajduje się tam między innymi kilka pinów masy oraz linia zasilania VBUS (5 V), dzięki czemu całość może być zasilana z pojedynczego portu USB.

Do modułu Raspberry Pi Pico/Pico W/Pico 2 (MOD11) są dołączone układy peryferyjne widoczne na **rysunku 2**. Linie GP0 i GP1 tego modułu, użyte jako szeregowy port konsoli, są połączone przez CON11 z terminalem i realizują komunikację z klawiaturą i monitorem HDMI.

Na złącze CON11 wyprowadzono również linię 3V3EN (pin 37), co pozwala resetować moduł Pico przyciskiem S2 w cyfrowym terminalu wideo. Do linii tej jest także dołączony przycisk resetujący S11 na module komputera.

Na płytce komputera Pico są punkty lutownicze dla wszystkich 40 pinów złącza CON11. Wystarczy jednak przylutować tylko po trzy skrajne górne piny po obu stronach złącza, łącząc linie szeregowe, zasilanie oraz masę.

Wspólną linię VBUS (5 V) można zasilać również przez złącze USB-C (CON18), wyposażone w dwa rezystory 5,1 kΩ podłączone między liniami CC a masą, zgodnie ze standardem USB.

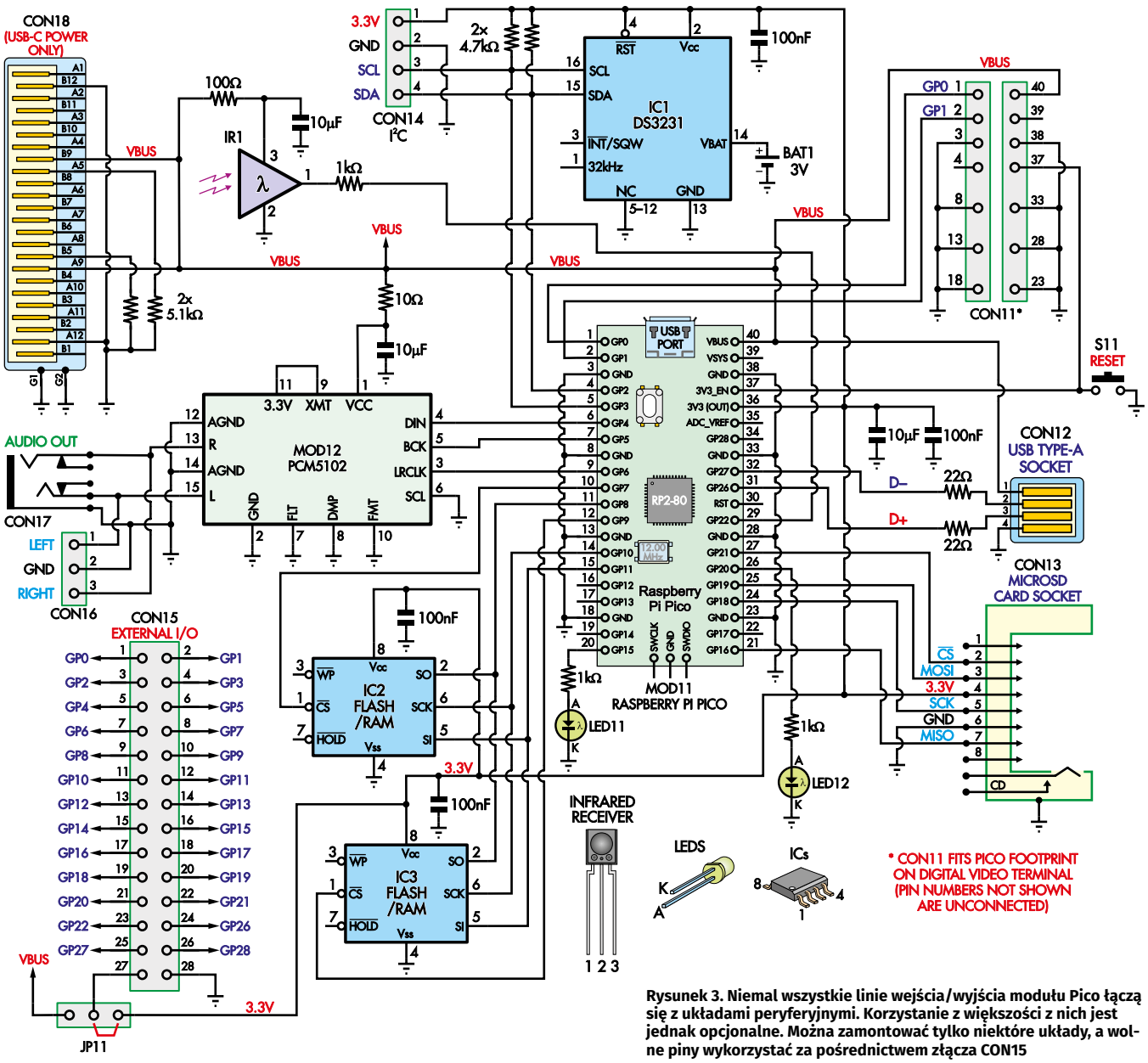
Na module Raspberry Pi Pico znajduje się przetwornica obniżająca napięcie do 3,3 V o wydajności 800 mA, z której są zasilane układy 3,3 V na płytce komputera.

I²C oraz I²S

Wyprowadzenia GP2 (SDA) i GP3 (SCL) modułu MOD11 skonfigurowano do obsługi magistrali I²C, wraz z niezbędnymi rezystorami podciągającymi 4,7 kΩ.

Układ IC1 to zegar czasu rzeczywistego i kalendarz (RTCC) typu DS3231 lub DS3231M. Jest połączony z gniazdem baterii pastylkowej BAT1, która podtrzymuje odmierzanie czasu po wyłączeniu zasilania komputera. Kondensator 100 nF odsprzęga linię zasilania 3,3 V idącą z MOD11.

4-pinowa listwa goldpin CON14 udostępnia zasilanie 3,3 V, masę oraz linie magistrali I²C dla urządzeń zewnętrznych. Układ



Rysunek 3. Niemal wszystkie linie wejścia/wyjścia modułu Pico łączą się z układami peryferyjnymi. Korzystanie z większości z nich jest jednak opcjonalne. Można zamontować tylko niektóre układy, a wolne piny wykorzystać za pośrednictwem złącza CON15

eprasa.pl fb05997b40

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

wyprowadzeń pasuje do wielu gotowych modułów I²C. Jeden taki moduł można zamontować bezpośrednio na płytce komputera wewnątrz obudowy.

Na płytce przewidziano także złącza dla modułu MOD12 – stereofonicznego przetwornika cyfrowo-analogowego (DAC) audio opartego na układzie PCM5102A. Pobiera on zasilanie 5 V z linii VBUS poprzez rezystor 10 Ω z kondensatorem filtrującym 10 µF. Obwód ten skutecznie tłumi zakłócenia, które mogłyby przedostawać się do modułu przetwornika.

Cyfrowe dane audio w formacie I²S pochodzą z wyjść cyfrowych GP4, GP5 i GP6 modułu MOD11, skonfigurowanych odpowiednio jako DIN (dane), BCK (zegar bitowy) oraz LRCK (zegar wyboru kanału lewego/prawego). Piny konfiguracyjne modułu MOD12 są na stałe dołączone do +3,3 V lub masy, a wyjściowy sygnał audio trafia do 3-pinowej listwy goldpin CON16 oraz do gniazda stereo jack 3,5 mm (CON17).

Pamięć masowa

Płytka komputera oferuje cztery możliwości przechowywania danych. Jako IC2 i IC3 można zamontować dwa układy pamięci z interfejsem SPI. Każdy z nich wyposażono w kondensator 100 nF odsprzęgający zasilanie i dołączono do interfejsu SPI1 modułu Pico. Linia GP11 to wyjście modułu (MOSI), GP8 to wejście modułu (MISO), a GP10 to zegar (SCK). Linia wyboru układu (CS) pamięci IC2 jest sterowana z pinu GP7, natomiast pamięci IC3 – z pinu GP9.

Dostępne są różne układy pamięci. My jako IC2 wybraliśmy pamięć PSRAM o pojemności 64 Mbit (8 MB). PSRAM to „pseudostatyczna pamięć RAM". W rzeczywistości jest to pamięć dynamiczna (DRAM), ale ma wbudowany sterownik odświeżania. Dzięki temu z zewnątrz zachowuje się ona jak pamięć statyczna (SRAM). Pamięć PSRAM pełni funkcję szybkiej pamięci operacyjnej. Jest ulotna, czyli jej zawartość znika po wyłączeniu zasilania.

Jako IC3 zastosowaliśmy pamięć nieulotną FLASH W25Q32 o pojemności 32 Mbit (4 MB). Jako zamiennika można użyć zgodnej z nią pamięci AT25SF321B-SSHB-T (również FLASH 32 Mbit).

Interfejsy elektryczne pamięci FLASH i RAM są identyczne, dzięki czemu IC2 i IC3 można obsadzić pamięciami ulotnymi czy nieulotnymi stosownie do wymagań konkretnej aplikacji.

Pozostałe opcje dotyczą pamięci wymiennych. Do drugiego interfejsu (SPI0) dołączono gniazdo kart microSD (CON13). Wykorzystano linię GP19 jako MOSI, GP16 jako MISO i GP18 jako SCK. GP21 pełni rolę linii wyboru układu (CS). Linia zasilania 3,3 V tego gniazda jest filtrowana za pomocą kondensatorów 100 nF i 10 µF.

Linie zasilania 5 V (VBUS) i masy oraz cyfrowe linie wejścia/wyjścia GP26 i GP27 z szeregowymi rezystorami 22 Ω doprowadzono do gniazda USB-A (CON12). Linie cyfrowe są programowo konfigurowane jako interfejs hosta USB, co umożliwia podłączenie pamięci FLASH USB (pendrive'a). Oprogramowanie można też zmodyfikować, aby obsługiwało inne urządzenia USB.

Poniżej modułu MOD11 umieszczono diody LED11 i LED12. Są one sterowane z wyjść cyfrowych GP15 i GP20 przez rezystory szeregowe 1 kΩ. Ich standardowym przeznaczeniem jest sygnalizacja stanu karty microSD i pendrive'a USB. Można je jednak wykorzystać w dowolnym innym celu.

Pozostałe elementy

Układy peryferyjne wymienione wyżej używają większości wyprowadzeń modułu

Tabela 1. Wyprowadzenia bloków peryferyjnych w komputerze Pico

Funkcja	Piny wejścia/wyjścia (bloki peryferyjne)	Opis	Uwagi
Konsola szeregowa	GP0/GP1 (UART0)	Możliwość połączenia z modułami MOD1 i MOD3 cyfrowego terminala wideo	Sprawdzić ustawienie zworek w terminalu
Magistrala I²C	GP2/GP3 (I²C1)	Układ RTC na płytce. Magistrala jest również wyprowadzona na 4-pinową listwę kołkową.	Układ scalony DS3231 lub DS3231M
Magistrala I²S	GP4/GP5/GP6 (PIO)	Połączenie z modułem PCM5102A wbudowanym w Komputer Pico. Sygnał audio trafia do gniazda jack 3,5 mm na panelu przednim oraz do wewnętrznej 3-pinowej listwy kołkowej	Nieobsługiwane przez PicoMite
Audio PWM	GP4/GP5 (PWM2)	Specjalny moduł przekształca przebiegi PWM w sygnały audio, które trafiają do gniazda jack 3,5 mm na panelu przednim oraz do wewnętrznej 3-pinowej listwy kołkowej	Do wyboru: PWM albo I²S (nie można korzystać z obu jednocześnie)
Pamięć SPI	GP7...GP11 (SPI1 i dwa piny CS)	Połączenie z układami pamięci: IC2 (na przykład PSRAM) i IC3 (na przykład Flash)	
Karta microSD	GP16/GP18/GP19/GP21 (SPI0 i jeden pin CS)	Gniazdo kart microSD na panelu przednim	
Host USB	GP26/GP27 (PIO)	Gniazdo USB-A na panelu przednim	Nieobsługiwane przez PicoMite
Odbiornik podczerwieni	GP22	Na panelu przednim	
Diody LED użytkownika	GP15/GP20	Umieszczone obok gniazd microSD oraz USB	Rezystory szeregowe 1 kΩ (ograniczają prąd do około 3 mA)
Wyprowadzenia wejścia/wyjścia	GP0–GP22, GP26–GP28, zasilanie, masa	28-pinowe złącze kątowe, dostępne od strony panelu tylnego. Zworka umożliwia wybór napięcia zasilania 3,3 V lub 5 V	
Wejście zasilania	VBUS	Układ może być zasilany przez gniazdo USB-C, gniazdo micro-USB modułu Pico lub z cyfrowego terminala wideo	

eprasa.pl fb05997b40

Pico. Udało się jednak wygospodarować zasoby na odbiornik podczerwieni (IR1). Jest on zasilany z linii 5 V (VBUS) przez rezystor 100 Ω i kondensator odsprzęgający 10 µF. Wyjście zdemodulowanego sygnału z odbiornika jest połączone przez rezystor 1 kΩ z pinem GP22 modułu. Rezystor ogranicza prąd wpływający do pinu mikrokontrolera, kiedy wyjście odbiornika podczerwieni osiąga napięcie 5 V.

28-pinowa listwa goldpin (CON15) zawiera wszystkie dostępne linie wejścia/wyjścia modułu Pico oraz linie masy i zasilania. Napięcie zasilania na tym złączu wybiera się zworką JP11 – może to być albo 5 V z linii VBUS, albo stabilizowane 3,3 V.

Listę połączeń z peryferiami zawiera **tabela 1**. Nazwy wyprowadzeń znajdują się także na warstwie opisowej płytki drukowanej.

Warianty konfiguracji

Płytka komputera może współpracować z różnymi platformami programistycznymi, które szczegółowo omówimy w dalszej części artykułu. W tym miejscu warto jednak zwrócić uwagę na kilka kwestii istotnych na etapie montażu.

Nie każde środowisko programistyczne obsługuje wszystkie funkcje sprzętowe. W szczególności może brakować obsługi dźwięku I²S (nie zapewnia jej na przykład MMBasic). Z tego względu opracowaliśmy niewielką, wymienną płytkę modułu pozwalającego komputerowi wytwarzać dźwięk za pomocą sygnałów PWM. Konstrukcję i zastosowanie tego modułu opisano w ramce „Moduł audio PWM”. Układ jest bardzo zbliżony do modułu audio PWM zastosowanego w projekcie Pico BackPack w Silicon Chip z marca 2022 roku (www.siliconchip.au/Article/15236). Można zdecydować się na użycie tego modułu zamiast interfejsu I²S nawet wtedy, gdy używane oprogramowanie obsługuje I²S. Naszym zdaniem moduł ten okaże się również przydatny we własnych projektach czytelników.

Interpreter PicoMite BASIC nie ma wbudowanej obsługi programowego sterownika hosta USB opartego na PIO, więc w MMBasic nie będzie działał interfejs USB (CON12). Można w takim przypadku wlutować samo gniazdo CON12 bez obu rezystorów 22 Ω (co zwolni dwa piny wejścia/wyjścia) i wykorzystać je wyłącznie do zasilania lub ładowania podłączonych urządzeń USB.

Żaden z wewnętrznych bloków funkcjonalnych nie jest niezbędny do działania. Płytkę komputera można traktować jedynie jako płytkę rozszerzeń wyprowadzającą piny wejścia/wyjścia modułu Pico na złącze CON15. W celu doprowadzenia zasilania do CON15 należy założyć zworkę JP11. W przypadku rezygnacji z niektórych układów można nie montować związanych z nimi elementów biernych, znajdujących się w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Jeśli na przykład nie montujemy IC2 lub IC3, to możemy pominąć odpowiadające im kondensatory 100 nF.

Dwa rezystory i kondensator 10 µF przy odbiorniku podczerwieni IR1 są wymagane tylko wtedy, gdy odbiornik ten jest montowany. Podobnie jest z kondensatorami 100 nF i 10 µF przy gnieździe microSD (CON13).

Kondensator 100 nF przy układzie IC1 jest potrzebny wyłącznie wtedy, gdy układ ten montujemy. Trzeba natomiast koniecznie wlutować oba rezystory 4,7 kΩ, jeśli przewidujemy podłączanie do magistrali I²C przez złącze CON14 innych układów.

Elementy bierne przy module przetwornika audio MOD12 (10 Ω i 10 µF) są potrzebne tylko wtedy, gdy moduł ten jest montowany.

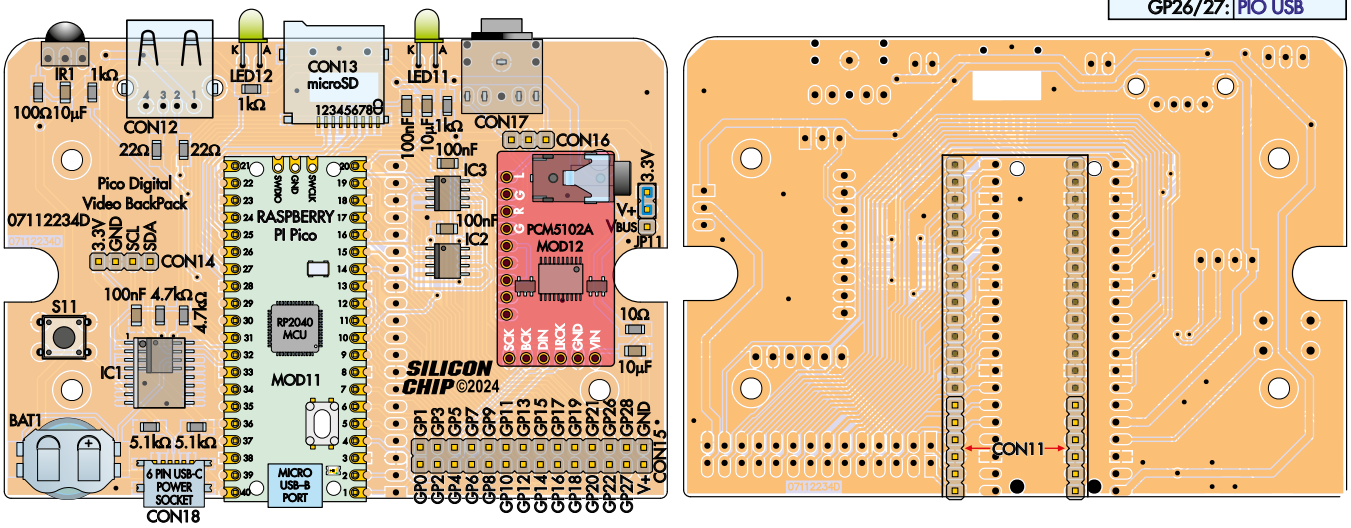
Montaż

Opis montażu rozpoczynamy od instrukcji zmontowania płytki komputera Pico jako samodzielnego urządzenia. Jako pojedyncza płytka zmieści się ona w większej z obudów stosowanych w cyfrowym terminalu wideo (Altronics H0191). Następnie opiszemy modyfikacje w terminalu, umożliwiające połączenie go z płytką komputera. Sprowadzają się one do pominięcia jednego z modułów Raspberry Pi Pico (MOD2) i powiązanych z nim elementów oraz wlutowania odpowiednich listew goldpin. Na koniec wszystkie elementy połączymy ze sobą. Połączenie komputera z cyfrowym terminalem wideo wymaga użycia najwyższej obudowy z tej serii – Altronics H0192.

Montaż rozpoczynamy od obsadzenia płytki drukowanej komputera (wymiary 68 × 98 mm, kod Silicon Chip 07112234) elementami SMD, posługując się **rysunkiem 4**. Omówimy wszystkie elementy. Te, które nie są wam potrzebne, możecie po prostu pominąć.

Zalecamy przygotowanie topnika w postaci pasty, plecionki lutowniczej, pęsety oraz lutownicy z precyzyjnym grotem (stożkowym lub ściętym, według waszych preferencji). Bardzo przydadzą się

GP0/1:	TX/RX
GP2/3:	SDA/SCL
GP4/5/6:	DIN/BCK/LR
GP7/9:	CS IC2/IC3
GP8/10/11:	SPI1
GP16/18/19:	SPI0
GP15/20:	LED11/12
GP21:	SD CS
GP22:	IR RX
GP26/27:	PIO USB



Rysunki 4 i 5. Na płytce jest wystarczająco dużo miejsca, więc w projekcie można było zastosować większe elementy SMD – w obudowach o rozmiarze 1206 (metrycznym 3216). Sprawdzajcie na rysunkach montażowych i fotografiach rozmieszczenie elementów, zwracając szczególną uwagę na złącze CON11, które musi dokładnie pokrywać się ze złączem na dolnej płytce

eprasa.pl fb05997b40

lupa i dobre oświetlenie. Niezbędna będzie sprawna wentylacja, aby nie wdychać oparów topnika.

Elementami najtrudniejszymi do wlutowania są: gniazdo kart microSD (CON13) oraz gniazdo USB-C (CON18), dlatego warto zacząć właśnie od nich. Nanosimy topnik na pola lutownicze PCB i układamy na nich element. Gniazdo karty SD ma na spodzie kołki pozycjonujące. W gnieździe USB-C ich brakuje, więc jego montaż wymaga większej precyzji.

Oczyszczamy grot lutownicy, nakładamy odrobinę świeżej cyny i przylutowujemy jedno ze skrajnych wyprowadzeń. Upewniamy się, że złącze leży płasko i jego wyprowadzenia dokładnie pokrywają się z polami lutowniczymi. W razie potrzeby korygujemy jego położenie. Następnie przylutowujemy pozostałe wyprowadzenia. Nadmiar cyny i ewentualne zwarcia między wyprowadzeniami usuwamy plecionką lutowniczą, dodając trochę topnika. Metalowe obudowy obu gniazd warto solidnie przylutować do pól masy, zapewniając gniazdom odpowiednią wytrzymałość mechaniczną.

Przechodzimy następnie do montażu trzech układów scalonych. IC1 może mieć wąską obudowę 8-nóżkową (DS3231M) lub szerszą 16-nóżkową (DS3231). W obu przypadkach znacznik wyprowadzenia 1 musi znajdować się w lewym górnym rogu. Układ w węższej obudowie przylutowujemy do ośmiu górnych pól lutowniczych. Uważajcie, aby nie pomylić go z innymi układami scalonymi w 8-nóżkowych obudowach SOIC.

Jeśli na obudowie nie ma kropki oznaczającej wyprowadzenie 1, to na krawędzi układu będzie charakterystyczne ścięcie (faza) przy wyprowadzeniu 1, najlepiej widoczne od strony czoła obudowy. Nakładamy topnik, układamy układ, przylutowujemy jedno wyprowadzenie, sprawdzamy, czy układ leży równo, a następnie lutujemy pozostałe wyprowadzenia.

Jako IC2 zalecamy zamontowanie pamięci PSRAM, jak w naszym prototypie. Jest ona zauważalnie węższa od pamięci FLASH Winbond, ale obie pasują do pól lutowniczych IC2 i IC3. Przylutowujemy je w taki sam sposób jak IC1, zwracając uwagę na właściwą orientację.

W dalszej kolejności wlutowujemy siedem kondensatorów SMD. Nie mają one oznaczeń, ale kondensatory 10 µF są wyraźnie grubsze od 100 nF. Nakładamy topnik, lutujemy jedną stronę, kontrolujemy położenie elementu, a następnie lutujemy drugą stronę. Możemy na koniec ponownie dotknąć grotem pierwszego wyprowadzenia, poprawiając spoinę lutowniczą.

Zestaw do montażu

Aby zbudować układ w wersji przedstawionej na fotografiach, należy zaopatrzyć się w zestawy Silicon Chip SC6917 i SC7374, obudowę (na przykład Altronics) oraz akcesoria: klawiaturę USB, monitor HDMI i odpowiednie przewody USB. Zamawiając zestawy, warto dokupić opcjonalny układ pamięci PSRAM (SC7377) oraz, jeśli nie planujemy używać przetwornika cyfrowo-analogowego I²S, zestaw modułu audio PWM (SC7376).

Płytka komputera Pico może być używana samodzielnie. W takim przypadku należy dokupić obudowę i wykonać panele we własnym zakresie. Dostępny jest zestaw SC7378 (50 $ + koszty wysyłki), zawierający zestaw SC7374 oraz niezaprogramowany moduł Pico.

Zestaw komputera Pico (SC7374; 40 $)

Zawiera płytkę drukowaną (kod 07112234) oraz niemal wszystkie elementy niezbędne do jej pełnego obsadzenia (z wyjątkiem pamięci PSRAM, układu RTC i baterii pastylkowej, które trzeba zakupić osobno). W skład zestawu wchodzi także płytka panelu przedniego oraz elementy mechaniczne umożliwiające połączenie płytki z cyfrowym terminalem wideo (dostępnym jako osobny zestaw; patrz niżej).

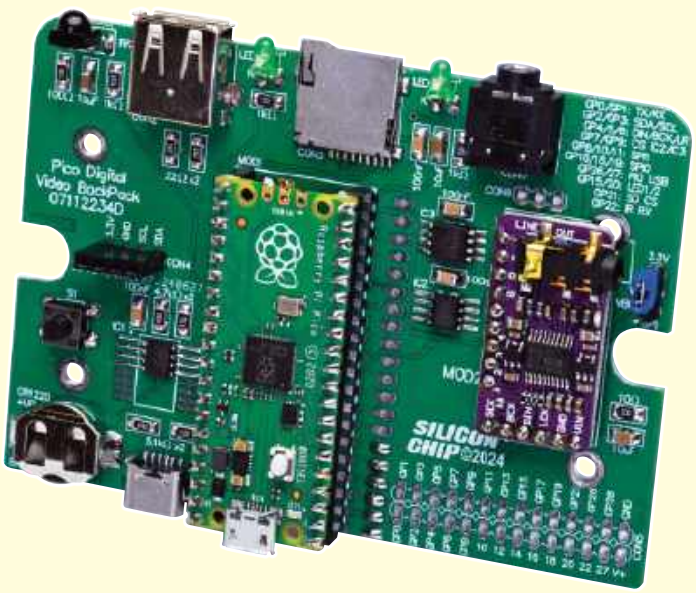
Zestaw SC7374 nie zawiera modułu Raspberry Pi Pico, ponieważ w zestawie SC6917 znajdują się trzy takie moduły.

Zestaw cyfrowego terminala wideo (SC6917; 65 $)

Zawiera komplet elementów do budowy cyfrowego terminala wideo (bez obudowy). Moduły Raspberry Pi Pico są dostarczane w stanie niezaprogramowanym. Szczegółowy opis montażu znajduje się w wydaniach Silicon Chip z marca i kwietnia 2024 roku: www.siliconchip.au/Series/413 („EdW” 08/2026 i 09/2026).

Zestaw modułu audio PWM (SC7376; 10 $)

Moduł audio PWM jest dostępny jako kompletny zestaw zawierający wszystkie elementy wymienione w ramce, łącznie z płytką drukowaną.



Płytka komputera Pico ze wszystkimi elementami z wyjątkiem kątowego złącza wejścia/wyjścia w prawym dolnym rogu. W prawym górnym rogu, na warstwie opisowej, widoczna jest lista wyprowadzeń GPIO. Jedynymi elementami montowanymi na dolnej stronie płytki komputera są listwy kołkowe łączące ją z cyfrowym terminalem wideo. W przypadku korzystania z komputera Pico w trybie autonomicznym nie trzeba ich montować.

Na płytce znajduje się jeszcze 11 rezystorów SMD o różnych wartościach. Przylutowujemy je zgodnie z rysunkiem 4. Ostatnim elementem SMD jest uchwyt baterii pastylkowej BAT1. Układamy go na płytce, upewniając się, że wycięcie do wsuwania baterii jest skierowane w stronę krawędzi płytki. Lutujemy jedno wyprowadzenie, korygując przy tym położenie elementu, a następnie drugie. Aby zapewnić wytrzymałość mechaniczną uchwytu, na boczne skrzydełka montażowe nakładamy sporą ilość cyny.

Po tym etapie montażu należy odpowiednim rozpuszczalnikiem dokładnie zmyć z płytki wszelkie pozostałości topnika. Zalecany rodzaj zmywacza jest podany w dokumentacji topnika, ale w większości przypadków doskonale sprawdzi się alkohol izopropylowy (IPA) lub preparat Chemtools Kleanium G2.

eprasa.pl fb05997b40

Płytkę suszymy i oglądamy ją dokładnie pod lupą w poszukiwaniu zwarć, zimnych lutów i niedolutowanych wyprowadzeń. Znacznie łatwiej będzie usunąć te usterki teraz, zanim zostaną zamontowane pozostałe elementy.

Elementy przewlekane

Teraz możemy przejść do montażu elementów przewlekanych. Niektóre z nich przechodzą przez otwory w panelu przednim, dlatego płytkę panelu czołowego warto wykorzystać jako szablon ułatwiający dokładne ustawienie elementów, chociaż ich dopasowanie do otworów nie powinno sprawiać problemów.

Montujemy gniazdo USB-A (CON12), upewniając się przed przylutowaniem wyprowadzeń, że przylega ono płasko do laminatu. Nakładamy solidną ilość cyny na punkty mocowania obudowy gniazda. Przy tej samej krawędzi znajduje się gniazdo jack 3,5 mm (CON17). Lutujemy je jako następne.

Odbiornik podczerwieni oraz diody LED również wystają przez płytę czołową. Warto użyć zamontowanych już złączy oraz panelu przedniego jako przymiaru montażowego. Zginamy wyprowadzenia diod LED pod kątem 90° tuż przy samej obudowie, uważając, aby zgiąć je we właściwą stronę, tak aby katoda trafiła w pole oznaczone literą K na laminacie. Zauważcie, że litera K przypomina graficzny symbol katody diody. Przypis redaktora: z tego względu użyto litery K, a nie C, chociaż po angielsku katoda to „cathode".

Wsuwamy elementy w panel przedni i lutujemy po jednym wyprowadzeniu każdego z nich. Delikatnie doginamy wyprowadzenia, aby uzyskać dokładne dopasowanie. Odbiornik podczerwieni może wymagać lekkiego dogięcia do przodu, by dokładnie zrównał się z otworem w panelu. Gdy dopasowanie elementów jest zadowalające, lutujemy pozostałe wyprowadzenia i odcinamy od spodu płytki ich końce. Wsuwamy w płytkę mikroprzełącznik S11 i przylutowujemy go.

Do połączenia płytki komputera z cyfrowym terminalem wideo wystarczyłyby dwie 4-pinowe listwy kołkowe. Zdecydowaliśmy się jednak na listwy 6-pinowe, ponieważ powszechnie dostępne gniazda przelotowe występują właśnie w 6-pinowej wersji. Jeśli planujecie używać płytki komputera jako samodzielnego modułu, złącza te nie są potrzebne. W przeciwnym razie przylutujcie je od spodu płytki drukowanej, najbliżej gniazda USB modułu Pico. Sprawdźcie na zdjęciu umiejscowienie tych złączy i upewnijcie się, że są wlutowane dokładnie prostopadle do płytki.

Moduł audio PWM

Oprogramowanie PicoMite nie obsługuje magistrali I²S i wysokiej jakości zewnętrznych przetworników cyfrowo-analogowych. Można natomiast odtwarzać dźwięk za pomocą modulacji PWM. Ten sposób wytwarzania dźwięku polega na generowaniu przebiegu o zmiennym współczynniku wypełnienia. Zewnętrzny filtr dolnoprzepustowy i stopień buforujący wygładzają ten sygnał, przekształcając go w napięcie analogowe, które można doprowadzić do słuchawek, wzmacniacza lub innego urządzenia. Większość 8-bitowych mikrokontrolerów bez trudu radzi sobie z odtwarzaniem dźwięku za pomocą PWM, dlatego opisywany moduł stanowi proste i tanie źródło dźwięku. Ma to jednak swoją cenę: jakość dźwięku ustępuje tej uzyskiwanej za pomocą specjalizowanych przetworników I²S. W większości zastosowań okazuje się jednak w zupełności wystarczająca.

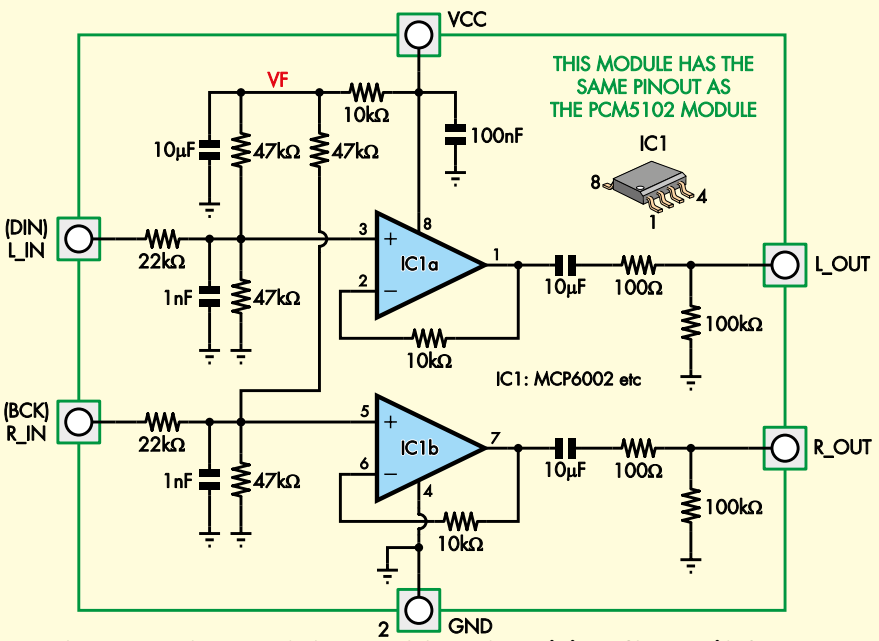
Moduł PWM zaprojektowano tak, aby pasował w miejsce popularnej płytki z przetwornikiem PCM5102A. Moduł odbiera nie dane cyfrowe I²S, lecz sygnały PWM z dwóch pinów – po jednym dla każdego kanału stereo.

Układ (**rysunek a**) opiera się na rozwiązaniu zastosowanym w module Pico BackPack (Silicon Chip z marca 2022 roku; www.siliconchip.au/Article/15236). Wprowadzono zmiany umożliwiające zasilanie układu pojedynczym napięciem 5 V. Złącza zewnętrzne odpowiadają wyprowadzeniom modułu PCM5102A, co zapewnia pełną zgodność mechaniczną.

Napięcie 5 V, doprowadzone do pinów VCC i GND i odsprzęgane kondensatorem 100 nF, bezpośrednio zasila podwójny, niskonapięciowy wzmacniacz operacyjny typu rail-to-rail (IC1). Napięcie VF (około 4 V), służące do polaryzacji wejść wzmacniaczy, powstaje w filtrze dolnoprzepustowym złożonym z rezystora 10 kΩ i kondensatora 10 µF. Dzielniki napięcia z rezystorami 47 kΩ wyznaczają składowe stałe napięć na wejściach wzmacniaczy (około 2 V).

Do pinów 4 i 5 złącza 6-pinowego (L_IN i R_IN) doprowadzane są dwa przebiegi PWM. Ponieważ oba kanały są identyczne, omówimy tylko jeden z nich.

Średni poziom sygnału PWM wynosi 1,65 V (co odpowiada wypełnieniu 50% przy zasilaniu mikrokontrolera napięciem 3,3 V). Obwód polaryzacji wejścia i filtr, złożony z rezystorów 47 kΩ i 22 kΩ oraz kondensatora 1 nF, przesuwa poziom składowej stałej na wejściu



Rysunek a. Dwa sygnały PWM pochodzące z modułu Raspberry Pi Pico są filtrowane i buforowane w prostym układzie, tworząc stereofoniczne wyjście audio. Moduł można podłączyć także do modułu Arduino lub innego układu z mikrokontrolerem. Wyjście powinno umożliwiać wysterowanie słuchawek, a nawet małego głośnika

Alternatywnym rozwiązaniem może być połączenie niezbędnych linii izolowanymi przewodami. Są to linie masy, VBUS, GP0 i GP1. Odpowiadają one wyprowadzeniom 1, 2, 3 i 40 złącza modułu Pico.

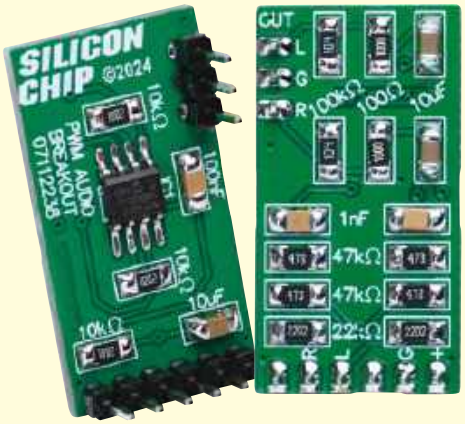
Do montażu modułu Raspberry Pi Pico (MOD11) zalecamy użycie listew kołkowych i gniazd o niskim profilu („low-profile"). Przy zastosowaniu standardowych gniazd o wysokości 8,5 mm moduł byłby zbyt wysoki dla przewidzianej obudowy. Można także wlutować moduł Pico bezpośrednio w płytkę drukowaną (z użyciem pinów zapewniających odstęp od CON11), lecz uniemożliwi to późniejszy dostęp do złączy CON11 od spodu PCB. Jeśli zatem planujecie wlutować moduł MOD11 na stałe, to złącza CON11 musicie wlutować jako

eprasa.pl fb05997b40

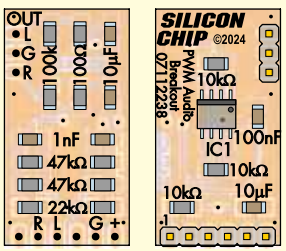
wzmacniacza operacyjnego do optymalnego zakresu oraz tłumi tętnienia o częstotliwości nośnej PWM.

Wzmacniacz operacyjny pracuje jako wtórnik napięciowy o wzmocnieniu równym jedności, buforując przefiltrowany sygnał. Kondensator 10 µF oraz rezystory 100 Ω i 100 kΩ tworzą obwód sprzęgający, który blokuje składową stałą. Do wyjścia można bezpośrednio podłączyć słuchawki lub wzmacniacz audio.

Układ pracuje poprawnie przy napięciu zasilania dostosowanym do wzmacniacza operacyjnego (dla podanego typu MCP6002 jest to 1,8...6 V; przypis redaktora). Napięcie to nie może być jednak niższe niż amplituda wejściowego sygnału PWM (na przykład sygnał PWM o amplitudzie 5 V będzie wymagać zasilania napięciem 5 V). Bardziej doświadczeni konstruktorzy mogą zmienić wartości elementów układu, dopasowując go do własnych wymagań.



Na górnej stronie płytki znajduje się zaledwie kilka rezystorów i kondensatorów. Zwróćcie uwagę na prawidłową orientację układu IC1. Zastosowano standardowe listwy kołkowe, które można wlutować bezpośrednio w inną płytkę lub umieścić w gniazdach



Rysunek b. Montaż modułu jest prosty. Należy przede wszystkim uważać, aby nie pomylić nieoznakowanych kondensatorów SMD o różnych pojemnościach

Montaż modułu

Zastosowano elementy w obudowach SOIC oraz 1206 (metrycznie 3216), co wymaga użycia standardowych narzędzi do montażu SMD (patrz opisy w treści artykułu). Na górnej stronie płytki drukowanej elementy są rozmieszczone symetrycznie dla obu kanałów, więc każde oznaczenie na warstwie opisowej odnosi się do dwóch sąsiadujących ze sobą elementów biernych. Rysunek montażowy przedstawiono na **rysunku b**. Montaż zaczynamy od górnej strony płytki, uważając, aby nie pomylić nieoznakowanych kondensatorów ceramicznych o różnych pojemnościach.

Po zmontowaniu górnej strony odwracamy płytkę i przylutowujemy układ scalony. Jego wyprowadzenia muszą się dokładnie pokrywać z polami lutowniczymi na płytce. Upewniamy się również, że ścięcie na obudowie układu pokrywa się z kreską na warstwie opisowej. Następnie wlutowujemy pozostałe elementy SMD. Przemywamy płytkę alkoholem izopropylowym i suszymy. Na koniec wlutowujemy listwy kołkowe.

Gotowy moduł audio PWM podłączamy do płytki komputera Pico w celu przetestowania. Przykłady obsługi modułu można znaleźć w oprogramowaniu demonstracyjnym PicoMite BASIC.

Wykaz elementów

Moduł audio PWM

1 dwustronna płytka drukowana, 32 × 17 mm, kod Silicon Chip 07112238
1 listwa kołkowa, 3-pinowa, raster 2,54 mm (wyjście audio)
1 listwa kołkowa, 6-pinowa, raster 2,54 mm (zasilanie i wejścia sygnałowe)
1 podwójny wzmacniacz operacyjny typu rail-to-rail (MCP6002 lub równoważny), obudowa SOIC-8 (IC1)
3 kondensatory ceramiczne SMD 10 µF/10 V, X7R, obudowa 1206/M3216
1 kondensator ceramiczny SMD 100 nF/50 V, X7R, obudowa 1206/M3216
2 kondensatory ceramiczne SMD 1 nF/50 V, X7R, C0G lub NP0, obudowa 1206/M3216
2 rezystory SMD 100 kΩ/0,25 W, 1%, obudowa 1206/M3216
4 rezystory SMD 47 kΩ/0,25 W, 1%, obudowa 1206/M3216
2 rezystory SMD 22 kΩ/0,25 W, 1%, obudowa 1206/M3216
3 rezystory SMD 10 kΩ/0,25 W, 1%, obudowa 1206/M3216
2 rezystory SMD 100 Ω/0,25 W, 1%, obudowa 1206/M3216

pierwsze, następnie wsunąć piny modułu w otwory, przylutować kilka wyprowadzeń, sprawdzić, czy moduł leży równo, a potem przylutować wszystkie jego pozostałe wyprowadzenia.

W przypadku montażu modułu Pico w gniazdach niskoprofilowych (jak zalecamy) wlutowujemy w moduł Pico listwy kołkowe. Możemy je potem wykorzystać do zapewnienia dokładnego ustawienia gniazd podczas ich wlutowywania w płytkę bazową.

Moduł MOD12 należy wlutować bezpośrednio w płytkę lub osadzić w gniazdach – koniecznie niskoprofilowych. My zdecydowaliśmy się na bezpośrednie wlutowanie modułu w płytkę, mimo że zasłoniło to dostęp do jednego z otworów montażowych.

Pozostałe złącza są opcjonalne. Można tu zastosować listwy kołkowe lub gniazda. Oprogramowanie demonstracyjne nie wymaga żadnych połączeń zewnętrznych poza podłączeniem karty microSD, pendrive'a USB czy słuchawek.

Płytkę komputera można przetestować bez cyfrowego terminala wideo. Do wyświetlania komunikatów i wprowadzania poleceń może posłużyć program terminala szeregowego na komputerze PC.

Montaż cyfrowego terminala wideo

W przypadku łączenia płytki komputera z cyfrowym terminalem wideo wymagane jest wprowadzenie w terminalu kilku drobnych modyfikacji. Warto sięgnąć do oryginalnych artykułów opisujących cyfrowy terminal wideo (z marca i kwietnia 2024 roku: www.siliconchip.au/Series/413; „EdW" 08/2026 i 09/2026), choć doświadczeni konstruktorzy bez problemu poradzą sobie bez nich, kierując się oznaczeniami na warstwie opisowej płytki terminala.

Moduły MOD1 i MOD3 należy zamontować w gniazdach niskoprofilowych lub wlutować bezpośrednio w płytkę drukowaną terminala (kod 07112231), ponieważ gniazda o standardowej wysokości są zbyt wysokie i kolidowałyby z płytką komputera.

Oprogramowanie układowe można wgrać do modułów MOD1 i MOD3 przed ich wlutowaniem. Do modułu MOD1 należy wgrać plik 0711223A.UF2, a do MOD3 – plik 0711223C.UF2. W celu wgrania oprogramowania podłączamy moduł Pico przez USB do komputera, przytrzymując wciśnięty przycisk BOOTSEL, a następnie kopiujemy odpowiedni plik oprogramowania układowego z rozszerzeniem UF2 na pojawiający się w systemie dysk wirtualny RPI...RP2.

Montaż płytki terminala przebiega standardowo, z tym że pomijamy elementy S2, MOD2, CON2, LED2 oraz sąsiadujące z nimi rezystory 1 kΩ i dwa 22 Ω. Posługujemy się zdjęciem zmontowanego terminala zamieszczonym w artykule. Na zdjęciu pominęliśmy też inne nieużywane elementy.

Zastosowaliśmy przelotowe złącza kołkowe, zapewniające odstęp 15 mm pomiędzy płytkami drukowanymi. Przed wlutowaniem złączy należy zamontować listwy na spodzie płytki komputera (kod 07112234), co pozwoli precyzyjnie ustalić położenie złączy.

Nasuwamy gniazda przelotowe na złącza od spodu płytki komputera, a następnie tymczasowo skręcamy ze sobą obie płytki drukowane tulejami dystansowymi 15 mm i śrubami. Zapewni to dokładny

eprasa.pl fb05997b40

rozstaw i równoległość płytek. Końcówki wyprowadzeń złączy przelotowych powinny przejść przez odpowiednie otwory dla MOD2 na płytce terminala. Warto również sprawdzić, czy płytka panelu przedniego pasuje do wszystkich gniazd obu płytek.

Przylutowujemy wyprowadzenia złączy przelotowych do płytki terminala, a następnie przycinamy ich nadmiar. Wykręcamy śruby i rozdzielamy obie płytki. Aby przetestować terminal, podłączamy zasilanie do gniazda USB-C (lub, jeśli nie mamy pod ręką kabla USB-C, do jednego z gniazd micro-USB). Po włączeniu zasilania powinny zaświecić się diody LED na modułach MOD1 i MOD3, sygnalizując uruchomienie programów. Podłączenie klawiatury USB do CON3 powinno spowodować zaświecenie diody LED3, a pisanie na klawiaturze – jej miganie.

Do gniazda CON1 podłączamy monitor lub wyświetlacz HDMI i sprawdzamy, czy dioda LED1 świeci oraz czy w lewym górnym rogu ekranu pojawia się migający kursor. Na złącze LK1 zakładamy pojedynczą zworkę, łącząc piny 2 i 3 (zgodnie z oznaczeniem INT na płytce).

Jeśli wszystko działa prawidłowo, odłączamy zasilanie cyfrowego terminala wideo, podłączamy płytkę komputera do płytki terminala i ponownie podłączamy klawiaturę oraz monitor.

Oprogramowanie demonstracyjne

Dzięki bootloaderowi wbudowanemu w układ Pico uruchamianie programów demonstracyjnych jest bardzo proste. Poprzez gniazdo micro-USB w module Pico podłączamy płytkę komputera do komputera PC. Jeśli nie pojawi się automatycznie dysk wirtualny RPI...RP2, przytrzymujemy przycisk BOOTSEL na Pico, po czym naciskamy i puszczamy przycisk S11. Następnie na dysk wirtualny przeciągamy i upuszczamy plik UF2.

Działanie programu można sprawdzić na komputerze PC za pomocą programu terminala szeregowego (połączonego z wirtualnym portem USB/UART modułu Pico) lub bezpośrednio za pomocą monitora i klawiatury podłączonych do terminala.

Nazwa lub numer portu szeregowego USB mogą się różnić w zależności od systemu operacyjnego. Kod źródłowy (wraz z bibliotekami i plikami konfiguracyjnymi BASIC OPTIONs) znajduje się w archiwum pod adresem www.siliconchip.au/Shop/6/528.

W celu przetestowania urządzeń zewnętrznych należy podłączyć pamięć USB (pendrive) lub kartę microSD. Nośniki te powinny być

```
TERMINAL BACKPACK PICOMITE DEMO
I2C2 DEVICE SCAN
    x0 x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9 xA xB xC xD xE xF
0x                        .. .. .. .. .. .. .. ..
1x .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. ..
2x .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. ..
3x .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. ..
4x .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. ..
5x .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. .. ..
6x .. .. .. .. .. .. .. .. 68 .. .. .. .. .. .. ..
7x .. .. .. .. .. .. .. .. ..
 1  DEVICES FOUND

IC2 ID:&H00000C0D. IC2 IS ESP PSRAM
IC3 ID:&HEF401600. IC3 IS WINBOND 25Q32
READY
A:/>ir
WAITING FOR IR SIGNAL
PRESS ANY KEY TO EXIT
Received device = 255 key = 162
```

Ekran 1. Przykładowy program napisany w języku PicoMite BASIC, komunikujący się z terminalem Tera-Term. Wykrywa podłączone układy i wyświetla ich listę. Za pomocą poleceń można zarządzać plikami w wewnętrznej pamięci PicoMite lub na karcie microSD

```
Starting Pico Digital Video Terminal BackPack
SD OK
A: SD card root has 32 files totalling 171393622 bytes.
USB MSC OK
B: USB MSC card root has 50 files totalling 175713 bytes.
RTC found
RTC started OK
Time is 14:19:46 on 2/9/2024
IC2 ID is 0xD.
IC3 ID is 0xEF401600.
Audio started OK
I2C scan:
  0x68
I2C scan done.
A:/> ir
Waiting for IR signals
Press any key to exit
Protocol=NEC Address=0x0 Command=0x16 Raw-Data=0xE916FF00 32 bits LSB first
Unknown IR Signal
Protocol=NEC Address=0x0 Command=0x5E Raw-Data=0xA15EFF00 32 bits LSB first
Protocol=NEC Address=0x0 Command=0x5E Repeat gap=40000us
A:/> tone
Playing tone. Done.
A:/>
```

Ekran 2. Komunikaty wysyłane do cyfrowego terminala wideo przez program demonstracyjny napisany w środowisku Arduino. Program sporządza raport o stanie urządzeń i umożliwia testowanie poszczególnych bloków sprzętowych

```
MPY: soft reboot
MicroPython v1.23.0 on 2024-06-02; Raspberry Pi Pico with RP2040
Type “help()” for more information.
>>> #Serial console
>>> import uos
>>> from machine import UART, Pin
>>> repl_uart = UART(0, baudrate=115200, tx=Pin(0), rx=Pin(1))
>>> uos.dupterm(repl_uart, 0)
>>>
>>> #I2C
>>> from machine import Pin, I2C
>>> i2c = I2C(1, scl=Pin(3), sda=Pin(2), freq=100000)
>>> i2c.scan()
[104]
>>>
```

Ekran 3. Polecenia języka MicroPython konfigurujące działanie komputera Pico zintegrowanego z cyfrowym terminalem wideo. Przekierowują one konsolę na sprzętowy port szeregowy oraz wirtualny port szeregowy USB. Widoczny jest również wynik skanowania magistrali I²C: pod adresem 104 (0x68) wykryto układ RTC

eprasa.pl fb05997b40

sformatowane w systemie plików FAT16 lub powszechnie stosowanym FAT32 i umieszczone w gniazdach jeszcze przed włączeniem zasilania.

Aby sprawdzić tor audio, do gniazda CON17 podłączamy słuchawki. Zalecamy wstrzymanie się z podłączaniem zewnętrznego wzmacniacza do momentu upewnienia się za pomocą słuchawek, że wyjście audio działa prawidłowo. Obsługiwane funkcje i działanie programów opisano szczegółowo w dalszej części artykułu.

W folderze UF2 spakowanego oprogramowania znajduje się kilka plików z oprogramowaniem układowym, w tym trzy pliki dla cyfrowego terminala wideo oraz plik flash_nuke.UF2, służący do całkowitego wyczyszczenia pamięci FLASH modułu Pico.

PicoMite BASIC

Wersja demonstracyjna PicoMite BASIC (MMBasic) prezentuje obsługę większości dostępnych układów peryferyjnych. Z poziomu znaku zachęty języka BASIC można skonfigurować szereg opcji (OPTIONs), a dołączony program demonstracyjny zawiera własne interaktywne menu poleceń.

Plik Terminal BackPack BASIC.UF2 zawiera skonfigurowany interpreter PicoMite BASIC z ustawionymi opcjami i wgranym programem demonstracyjnym. Wystarczy załadować go przez bootloader RPI...RP2, aby od razu rozpocząć pracę przy użyciu klawiatury i monitora podłączonych do komputera Pico. Po poprawnym wgraniu oprogramowania PicoMite dioda LED na module Pico powinna zacząć migać.

Można również oddzielnie wgrać plik podstawowy PicoMite BASIC.UF2, a następnie wgrać i edytować pliki OPTIONS.BAS oraz BASIC_DEMO.BAS. Zwracamy uwagę, że domyślnie aktywna jest opcja AUDIO (dźwięk PWM). Jeśli zamontowano moduł I²S DAC, opcję tę należy wyłączyć.

Program po uruchomieniu skanuje magistralę I²C i jeśli pod adresem 0x68 zostanie wykryty układ RTC, program zgłosi jego obecność. Sprawdzane są również identyfikatory układów pamięci. Na **ekranie 1** pokazano sekwencję startową oraz działanie polecenia IR, które wyświetla kody odbierane przez odbiornik IR1.

Listę dostępnych poleceń można wyświetlić, wpisując HELP. Polecenie TONE generuje sygnał dźwiękowy (o ile jest zainstalowany moduł audio PWM). Przejście na dysk B: pozwoli przeglądać zawartość karty microSD. Dysk A: to dysk wewnętrzny w pamięci FLASH modułu Pico.

Plik PicoMiteV5.08.00.UF2 zawiera wersję podstawową, z której korzystaliśmy przed skonfigurowaniem parametrów i wgraniem programu demonstracyjnego. W chwili powstawania tego artykułu była to wersja oficjalna, dostępna na stronie https://geoffg.net/picomite.html.

Wersja demonstracyjna Arduino

Wersję demonstracyjną dla środowiska Arduino wgrywa się w taki sam sposób, korzystając z pliku Terminal BackPack Arduino.UF2. Kod źródłowy oraz użyte biblioteki znajdują się w folderze Arduino. Pozostałe biblioteki wchodzą w skład oficjalnego pakietu obsługi modułu Pico w środowisku Arduino.

Więcej informacji o konfigurowaniu płytki oraz zintegrowanych bibliotekach (w tym dla I²C, SPI i I²S) można znaleźć pod adresem https://github.com/earlephilhower/arduino-pico.

Istnieje biblioteka PWMAudio, współpracująca z modułem audio PWM.

Wykaz elementów

1 zmodyfikowany cyfrowy terminal wideo (patrz niżej)
1 płytka komputera Pico (patrz niżej)
1 płytka drukowana panelu przedniego, czarna, 37 × 99 mm, kod Silicon Chip 07112235
2 gniazda przelotowe 4-, 6-, 8- lub 10-pinowe (CON11)
2 listwy kołkowe 4-, 6-, 8- lub 10-pinowe (CON11)
1 obudowa ABS 105 × 80 × 40 mm (Hammond RM2005LTBK, Multicomp MP004809 lub Altronics H0192)
1 przewód micro-USB do zasilania, komunikacji i programowania
4 tuleje dystansowe, niegwintowane, M3, długość 15 mm
4 śruby maszynowe M3 × 20 mm z łbem walcowym

Elementy płytki komputera Pico
1 dwustronna płytka drukowana, 68 × 98 mm, kod Silicon Chip 07112234
1 moduł Raspberry Pi Pico (MOD11)
2 gniazda niskoprofilowe, 20-pinowe (dla MOD11) [Adafruit 5585]
2 listwy kołkowe niskoprofilowe, 20-pinowe (dla MOD11)
1 moduł przetwornika cyfrowo-analogowego PCM5102A (MOD12)
lub
1 moduł audio PWM (patrz ramka w artykule)
1 uchwyt SMD na baterię pastylkową 1220 (BAT1) [BAT-HLD-012-SMT]
1 bateria litowa pastylkowa CR1220 (BAT1)
1 gniazdo USB typu A, kątowe, do montażu na płytce drukowanej, przewlekane (CON12)
1 gniazdo SMD do kart microSD (CON13)
1 listwa kołkowa lub gniazdo, 4-pinowe, raster 2,54 mm (CON14; opcjonalne – dla I²C)
1 kątowa listwa kołkowa, 2×14-pinowa, raster 2,54 mm (CON15; opcjonalna – wyprowadzenia I/O)
1 listwa kołkowa, 3-pinowa, raster 2,54 mm (CON16; opcjonalna – wyjście audio)
1 gniazdo jack stereo 3,5 mm, do montażu na płytce drukowanej (CON17)
1 gniazdo USB-C do zasilania, SMD (CON18) [GCT USB4135 lub odpowiednik]
1 listwa kołkowa, 3-pinowa, raster 2,54 mm, ze zworką (JP11; opcjonalna – wybór zasilania wejścia/wyjścia)
1 przycisk miniaturowy 6 mm, przewlekany (S11)
4 małe samoprzylepne nóżki gumowe

Półprzewodniki (wszystkie opcjonalne):
1 układ zegara czasu rzeczywistego z kalendarzem DS3231 (obudowa szeroka SOIC-16) lub DS3231M (obudowa SOIC-8) (IC1)
1 pamięć PSRAM SPI, 64 Mbit (8 MB), obudowa SOIC-8 (IC2) [SC7377, Adafruit 4677, ESP-PSRAM64H lub odpowiednik]
1 pamięć Flash SPI, 32 Mbit (4 MB), obudowa SOIC-8 (IC3) [Winbond W25Q32JVS, AT25SF321B-SSHB-T lub odpowiednik]
1 scalony odbiornik podczerwieni, 3-wyprowadzeniowy (IR1)
2 zielone diody LED, 3 mm, przewlekane (LED11, LED12)

Kondensatory (wszystkie SMD, X7R, obudowa 1206/M3216):
3 sztuki 10 µF/10 V
4 sztuki 100 nF/50 V

Rezystory (wszystkie SMD, 0,25 W, 1%, obudowa 1206/M3216):
2 sztuki 5,1 kΩ
2 sztuki 4,7 kΩ
3 sztuki 1 kΩ
1 sztuka 100 Ω
2 sztuki 22 Ω
1 sztuka 10 Ω

Elementy zmodyfikowanego cyfrowego terminala wideo
1 dwustronna płytka drukowana, 98 × 68 mm, kod Silicon Chip 07112231
1 moduł Raspberry Pi Pico z wgranym plikiem 0711223A.UF2 (MOD1)
1 moduł Raspberry Pi Pico z wgranym plikiem 0711223C.UF2 (MOD3)
1 gniazdo HDMI do montażu na płytce drukowanej (CON1)
1 gniazdo USB typu A, kątowe, do montażu na płytce drukowanej, przewlekane (CON2)
1 gniazdo USB-C do zasilania, SMD (CON4) [GCT USB4135 lub odpowiednik]
3 przyciski miniaturowe 6 mm, przewlekane (S1...S3)
4 listwy kołkowe, 2-pinowe, raster 2,54 mm (JP1...JP4)
1 listwa kołkowa, 4-pinowa, raster 2,54 mm (LK1)
5 zworek (do JP1...JP4 i LK1)
4 listwy kołkowe, 20-pinowe, raster 2,54 mm (dla MOD1 i MOD3)
4 gniazda niskoprofilowe, 20-pinowe (opcjonalne; dla MOD1 i MOD3)

Półprzewodniki:
2 tranzystory MOSFET z kanałem N, SMD (2N7002), obudowa SOT-23 (Q1, Q2)
2 zielone diody LED, 3 mm, przewlekane (LED1, LED3)

Rezystory (wszystkie SMD, 0,25 W, 1%, obudowa 0805/M2012):
6 sztuk 10 kΩ 2 sztuki 5,1 kΩ 2 sztuki 1 kΩ 8 sztuk 270 Ω 2 sztuki 22 Ω

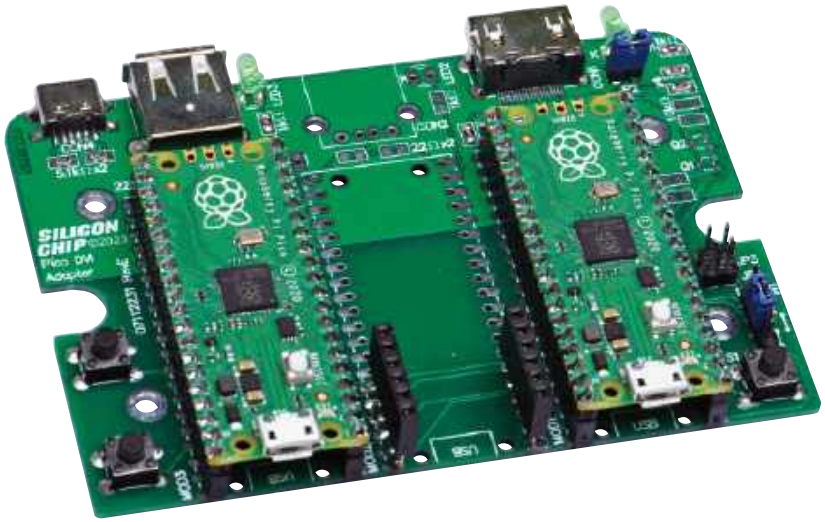
eprasa.pl fb05997b40

Wersja dla Arduino jest funkcjonalnie zbliżona do PicoMite BASIC, lecz oferuje nieco inny zestaw funkcji. Dysk A: oznacza tutaj kartę microSD, a dysk B: odpowiada pamięci USB FLASH (pendrive).

Interfejs naśladuje wiersz poleceń. Zestaw komend ma charakter poglądowy i służy do demonstrowania możliwości sprzętowych. Po wpisaniu HELP zostanie wyświetlona lista dostępnych poleceń.

Na **ekranie 2** pokazano widok konsoli tego programu. Pierwsze 14 wierszy jest tworzonych automatycznie po uruchomieniu, natomiast dalej widać działanie poleceń IR oraz TONE. To drugie polecenie wymaga obecności przetwornika I²S DAC i nie obsługuje modułu PWM.

Podczas pracy komputera diody LED powinny świecić światłem ciągłym, zarówno na module Pico, jak i na module I²S DAC.



W przypadku współpracy z płytką komputera Pico cyfrowy terminal wideo wymaga zamontowania jedynie niektórych elementów, jak pokazano na zdjęciu. Zworkę LK1 należy ustawić w pozycji INT. W celu zwiększenia czytelności fotografie zostały powiększone

MicroPython oraz C SDK

Nie analizowaliśmy dogłębnie współpracy środowiska MicroPython z komputerem Pico, ponieważ rzadko korzystamy z tego środowiska. Udało nam się jednak uruchomić podstawowe funkcje, na przykład przekierowanie terminala USB/UART do sprzętowego terminala wideo oraz skanowanie magistrali I²C.

W spakowanym oprogramowaniu, w katalogu MicroPython, zamieszczono zwięzłe wskazówki oraz przykładowy program ułatwiający rozpoczęcie pracy. Znajdują się tam odnośniki do zalecanych bibliotek oraz plik UF2 przetestowany przez nas w środowisku MicroPython.

Na **ekranie 3** pokazano procedurę konfigurowania cyfrowego terminala wideo oraz wynik skanowania magistrali I²C z wykrytym układem RTC pod adresem 104 (szesnastkowo 0x68).

Należy pamiętać, że pierwsze polecenie konfigurujące terminal należy przesłać przez port szeregowy USB, co uaktywnia sprzętowy port szeregowy. Od tego momentu do pracy z MicroPythonem można używać klawiatury USB i monitora HDMI podłączonych bezpośrednio do terminala.

Nie przygotowywaliśmy osobnych programów demonstracyjnych w środowisku C SDK. Brakuje wielu gotowych bibliotek wysokiego poziomu dla C SDK do obsługi układów peryferyjnych komputera Pico. Dlatego skupiliśmy się na oprogramowaniu Arduino (które i tak bezpośrednio opiera się na C SDK).

Użycie płytek Pico W oraz Pico 2

Przedstawione przykłady powinny bez problemu działać z modułem Pico W zamiast standardowego Pico, choć nie przeprowadzaliśmy w tym zakresie wyczerpujących testów. Warto jednak pamiętać, że dioda LED na płytce Pico W jest sterowana w inny sposób i może się nie zaświecać. Poza tym żaden z układów peryferyjnych komputera Pico nie wymaga łączności przez Wi-Fi ani Bluetooth oferowanej przez moduł Pico W.

W momencie powstawania tego artykułu na rynku zadebiutował moduł Pico 2, wyposażony w znacznie szybszy procesor i dwukrotnie większą pamięć RAM. Przeprowadziliśmy proste testy, przekompilowując kod Arduino na Pico 2 i wgrywając go do komputera Pico. Wszystko działało bez zarzutu. A zatem jeśli przydałaby się wam większa moc obliczeniowa, to moduł Pico 2 będzie jak znalazł!

Montaż końcowy

Odłączamy od urządzenia wszystkie kable. Jeśli został zmontowany układ RTC, to do gniazda BAT1 wkładamy baterię litową CR1220.



Możecie znacznie rozszerzyć możliwości cyfrowego terminala wideo, dodając zegar czasu rzeczywistego, rozbudowaną pamięć masową oraz stereofoniczne wyjście audio. Komputer Pico to doskonała podstawa do zbudowania własnego mikrokomputera

eprasa.pl fb05997b40

Wsuwamy płytkę panelu czołowego na miejsce i przykręcamy obie płytki drukowane do dolnej części obudowy śrubami maszynowymi przechodzącymi przez płytkę górną, tuleję dystansową i płytkę dolną, a następnie wkręcanymi w słupki montażowe dolnej połówki obudowy. Jeśli moduł DAC I²S został trwale wlutowany i zasłania otwór montażowy, dolną płytkę można przykręcić do obudowy oddzielną krótką śrubą.

Nie projektowaliśmy specjalnego panelu tylnego, ponieważ układ wyprowadzonych złączy zależy od indywidualnych potrzeb użytkownika. Jeśli nie potrzebujecie dostępu do złączy USB modułów Pico ani do tylnego portu USB-C, to można zrezygnować z wycinania otworów w panelu tylnym, a komputer Pico będzie zasilany z przedniego gniazda USB-C.

W przypadku planowanego korzystania ze złącza CON15 można całkowicie zrezygnować z montażu panelu tylnego. W takiej sytuacji należy wkleić do obudowy małą plastikową osłonę zabezpieczającą przed dostępem do baterii pastylkowej. Osłona musi zapobiegać przypadkowemu dostępowi do baterii, zwłaszcza przez dzieci. Zresztą komputer Pico to nie zabawka i zawsze powinien znajdować się poza zasięgiem małych dzieci.

Dostarczane z obudową panele są półprzezroczyste, co ułatwia wyznaczanie i wycinanie otworów. Prostokątne wycięcia można wykonać, nawiercając skrajne punkty wiertłem 3 mm, a następnie usuwając pozostały materiał ostrym nożykiem modelarskim lub pilnikiem.

Na zakończenie montażu nakładamy górną część obudowy, skręcamy całość dołączonymi śrubami i podłączamy przewody oraz akcesoria.

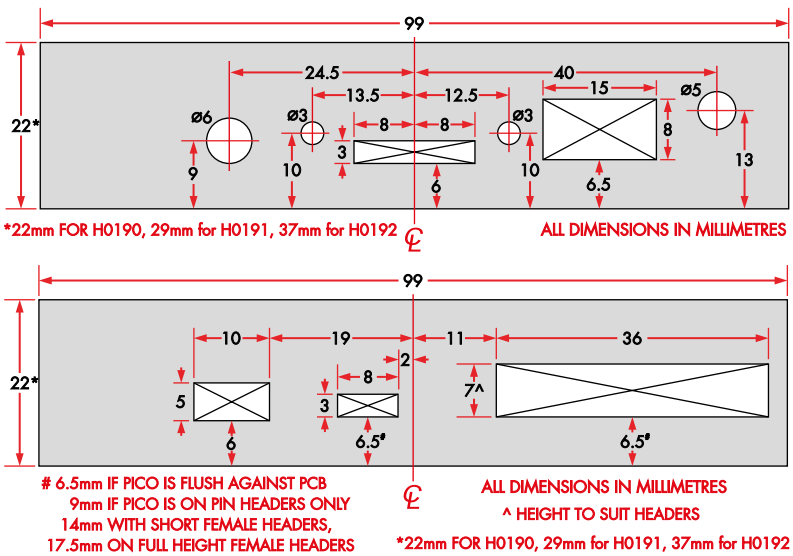


Widzimy tu sposób piętrowego łączenia obu płytek drukowanych. Zalecamy montaż modułów albo w gniazdach niskoprofilowych, albo bezpośrednio na płytkach. Obie płytki są rozdzielone tulejami dystansowymi o długości 15 mm. Można zastosować inny odstęp, ale 15 mm zapewni dokładne dopasowanie konstrukcji do panelu przedniego

Praca w trybie samodzielnym

W przypadku korzystania z samej płytki komputera Pico bez cyfrowego terminala wideo płytkę można przykręcić bezpośrednio do dolnej części dowolnej obudowy z wymienionej serii (Altronics H0190, H0191 lub H0192). Wybór modelu zależy od wysokości zmontowanej płytki drukowanej.

Dla tego wariantu **rysunki 6** i **7** przedstawiają szablony otworów w panelach. Zakładamy, że czytelnicy budujący wersję autonomiczną będą realizować własne, zindywidualizowane projekty, w których będą wymagane różne układy wycięć. Dlatego nie projektowaliśmy płytki panelu czołowego dla wariantu samodzielnego.



Rysunki 6 i 7. Szablony otworów w panelach obudowy w przypadku użycia samej płytki komputera Pico bez płytki cyfrowego terminala wideo. W przypadku montażu obu tych płytek należy przesunąć wszystkie wycięcia w górę o 16,6 mm (długość tulei dystansowej 15 mm plus grubość laminatu 1,6 mm) lub użyć gotowej płytki drukowanej panelu przedniego

Wysokość montażu diod LED oraz odbiornika IR może się różnić w zależności od sposobu ich wlutowania. Wymiary na rysunkach odpowiadają montażowi bezpośrednio na płytce.

Podsumowanie

Komputer Pico stanowi znakomite rozszerzenie możliwości cyfrowego terminala wideo. Udostępnia również uniwersalny zestaw układów peryferyjnych współpracujących z modułem Pico, co otwiera drogę do tworzenia wielu niezależnych projektów. W połączeniu z cyfrowym terminalem wideo urządzenie tworzy niezwykle interesujący, autonomiczny mikrokomputer. Czytelnicy dobrze znający programowanie mogą pokusić się o zaimplementowanie emulacji jakiegoś komputera retro czy nawet napisanie własnego, prostego systemu operacyjnego.

Planujemy kolejne projekty oparte na przedstawionym tu układzie. Z niecierpliwością czekamy również na opisy konstrukcji opracowanych przez czytelników. ■

Tim Blythman

Materiały dodatkowe dostępne są na stronie Silicon Chip:
https://www.siliconchip.com.au/Shop/8/7373
https://www.siliconchip.com.au/Shop/8/7375

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 fb05997b40

Nauka elektroniki z modułem ESP32, część 4

Wyświetlacze LED



W ubiegłej części cyklu omawialiśmy przetworniki ADC i DAC modułu ESP32. Pokazaliśmy, jak odczytywać napięcia i jak podłączać czujniki analogowe. Przedstawiliśmy również aplikację „plotera szeregowego" służącą do obrazowania zmian napięcia w czasie. Ponadto wyjaśniliśmy zasadę modulacji szerokości impulsu (PWM) oraz sposób jej wykorzystania do wytwarzania (pseudo)analogowych napięć i przebiegów. Warsztaty programowania dotyczyły systemów liczbowych: dziesiętnego, dwójkowego, ósemkowego i szesnastkowego. Projekt praktyczny obejmował zaprojektowanie, wykonanie i zaprogramowanie prostego testera baterii 1,5 V.

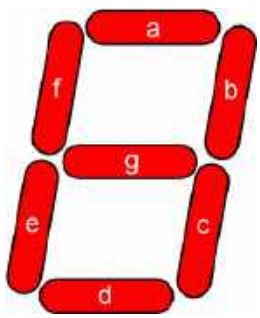
Tematem niniejszej, czwartej części jest:

- konfigurowanie i stosowanie wyświetlaczy LED – siedmiosegmentowych i matrycowych,
- dołączenie czujnika ruchu,
- wytwarzanie i użycie liczb losowych.

Wyświetlacze siedmiosegmentowe

Siedmiosegmentowe wyświetlacze LED stanowią prosty i tani sposób wyświetlania liczb oraz ograniczonego zestawu liter. Wyświetlacze te składają się z siedmiu (czasem ośmiu) pojedynczych diod LED rozmieszczonych jak na **rysunku 4.1**. Zauważmy, że segmenty są oznaczone literami zgodnie z ruchem wskazówek zegara, zaczynając od góry, a kończąc na segmencie środkowym. Każdy segment jest sterowany oddzielnie, co oznacza, że można zaświecić dowolną ich kombinację. Aby zaświecić segment, należy przepuścić przez niego niewielki prąd – zazwyczaj 5...15 mA. W niektórych wyświetlaczach występuje dodatkowo kropka dziesiętna (oznaczona „d.p." lub „DP").

Wyświetlacze siedmiosegmentowe są szeroko dostępne w różnych rozmiarach. Mogą być ze wspólną katodą lub wspólną anodą, w zależności od tego, które wyprowadzenia diod LED segmentów są ze sobą połączone. Na przykład wyświetlacz z **rysunku 4.3a** jest typem ze wspólną katodą (ang. common-cathode). Ma dziewięć wyprowadzeń, z których osiem to anody poszczególnych segmentów (w tym kropki dziesiętnej), a wyprowadzenie dziewiąte jest wspólnym połączeniem wszystkich katod. Element z **rysunku 4.3b** jest podobny, ale anody i katody diod LED są zamienione miejscami. Jest to typ ze wspólną anodą (ang. *common-anode*). Istotną różnicą w stosowaniu obu tych rodzajów wyświetlaczy jest miejsce, do którego dołączamy



Rysunek 4.1. Oznaczenia segmentów w typowym wyświetlaczu siedmiosegmentowym

1	1	b, c	9	9	a, b, c, d, e, g
2	2	a, b, d, e, g	0	0	a, b, c, d, e, f
3	3	a, b, c, d, g	A	A	a, b, c, e, f, g
4	4	b, c, f, g	B	b	c, d, e, f, g
5	5	a, c, d, f, g	C	C	a, d, e, f
6	6	a, c, d, e, f, g	D	d	b, c, d, e, g
7	7	b, c	E	E	a, d, e, f, g
8	8	b, c	F	F	a, e, f, g

Rysunek 4.2. Wyświetlanie cyfr szesnastkowych na wyświetlaczu siedmiosegmentowym

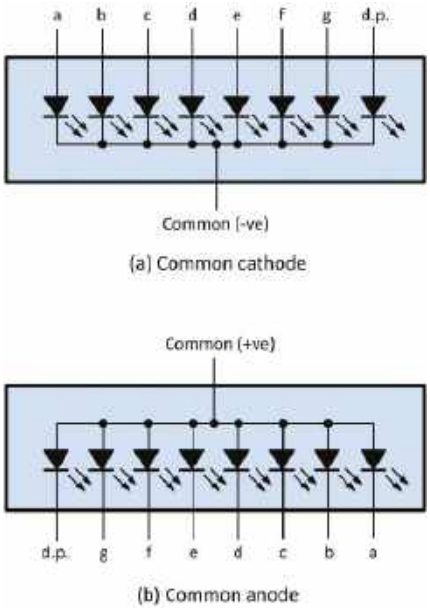
Nauka Elektroniki

Jest to nasz nowy cykl edukacyjny, poświęcony wykorzystaniu popularnego modułu ESP32 do nauki podstaw elektroniki i programowania. Nie zakładamy u czytelnika żadnych wcześniejszych umiejętności programistycznych ani doświadczenia w elektronice. Jeśli znacie się na jednym, ale nie na drugim, to dobrze trafiliście, a jeśli w obu tych dziedzinach jesteście kompletnymi nowicjuszami, to też nie ma powodu do obaw, ponieważ cykl polega na stopniowym i praktycznym zdobywaniu wiedzy. Będzie mnóstwo czasu na jej poszerzanie i wiele okazji do wypróbowania nowych rzeczy.

Nie zamieszczamy zbyt wielu podstawowych informacji teoretycznych, ponieważ można je znaleźć w innych miejscach, między innymi w numerach „Practical Electronics", w odcinkach serii „Teach-In":
https://bit.ly/pe-ti
https://bit.ly/pe-ti-bundle

W prezentowanym cyklu pojawią się projekty i zadania, które pomogą Wam lepiej zrozumieć poruszane tematy.

eprasa.pl fb05997b40

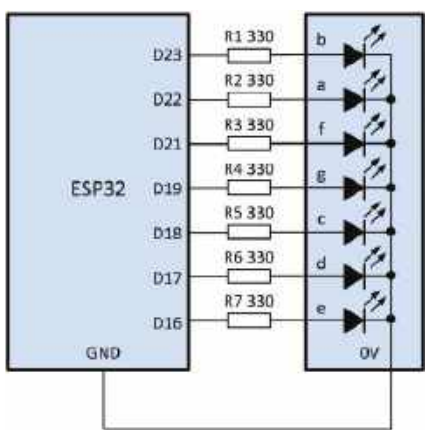


Rysunek 4.3. Wyświetlacze LED ze wspólną katodą (a) i wspólną anodą (b)

połączenie wspólne. „Wspólna katoda" jest dołączana do ujemnej linii zasilania (zwykle jest to masa), natomiast „wspólna anoda" jest zawsze podłączana do dodatniej linii zasilania.

Sprawdź sam!

Aby podłączyć pojedynczy wyświetlacz siedmiosegmentowy do układu ESP32, potrzebnych będzie osiem połączeń (w przypadku korzystania z kropki dziesiętnej dojdzie jeszcze jedno). **Rysunek 4.4** pokazuje, jak podłączyć wyświetlacz ze wspólną katodą. Siedem rezystorów szeregowych (R1...R7) o wartościach 330 Ω służy do ograniczenia prądu poszczególnych segmentów do kilku mA. Nie zapominajmy, że gdy wszystkie segmenty są zapalone, całkowite obciążenie prądowe układu ESP32 i źródła zasilania może przekroczyć wartość dopuszczalną.



Rysunek 4.4. Dołączenie pojedynczego siedmiosegmentowego wyświetlacza LED do modułu ESP32

No jasne!

Wyświetlacze siedmiosegmentowe występują w dwóch podstawowych typach: ze wspólną anodą i ze wspólną katodą. Z wyglądu są identyczne, musimy zatem zawsze sprawdzać, czy używamy właściwego typu.

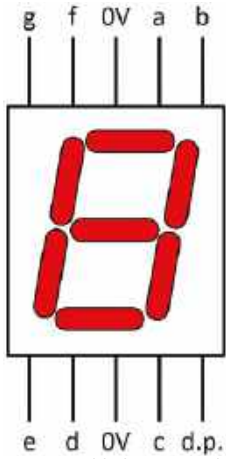
W przypadku urządzeń zasilanych bateryjnie może być konieczne ograniczenie prądów segmentów do wartości poniżej około 10 mA. W większości zastosowań o małym poborze mocy powinna się sprawdzać rezystancja szeregowa 330 Ω, zapewniając jednocześnie dostatecznie jasne wyświetlanie.

Na **rysunku 4.5** został pokazany typowy układ wyprowadzeń wyświetlacza siedmiosegmentowego o wspólnej katodzie. Zwraca uwagę obecność dwóch pinów 0 V. Są to wspólne wyprowadzenia katod, dołączane zazwyczaj do masy (GND). **Rysunek 4.6** przedstawia układ połączeń na płytce prototypowej.

Listing 4.1. Licznik z siedmiosegmentowym wyświetlaczem LED

```
/* Licznik z pojedynczym
siedmiosegmentowym wyświetlaczem LED
ze wspólną katodą */

// Przypisz segmenty wyświetlacza
// do pinów GPIO
int a = 22;
int b = 23;
int c = 18;
int d = 17;
int e = 16;
int f = 21;
int g = 19;

// Ustaw opóźnienie między liczbami
int delayTime = 1000; // 1 sekunda

void setup() {
// Zainicjuj piny GPIO jako wyjścia
pinMode(a, OUTPUT); // Segment a
pinMode(b, OUTPUT); // Segment b
pinMode(c, OUTPUT); // Segment c
pinMode(d, OUTPUT); // Segment d
pinMode(e, OUTPUT); // Segment e
pinMode(f, OUTPUT); // Segment f
pinMode(g, OUTPUT); // Segment g
}

void loop() {
// Powtarzaj w nieskończoność
// 1 => b, c
digitalWrite(a, LOW);
digitalWrite(b, HIGH);
digitalWrite(c, HIGH);
digitalWrite(d, LOW);
digitalWrite(e, LOW);
digitalWrite(f, LOW);
digitalWrite(g, LOW);
delay(delayTime);
// 2 => a, b, d, e, g
digitalWrite(a, HIGH);
digitalWrite(b, HIGH);
digitalWrite(c, LOW);
digitalWrite(d, HIGH);
digitalWrite(e, HIGH);
digitalWrite(f, LOW);
digitalWrite(g, HIGH);
delay(delayTime);
// 3 => a, b, c, d, g
digitalWrite(a, HIGH);
digitalWrite(b, HIGH);
digitalWrite(c, HIGH);
digitalWrite(d, HIGH);
digitalWrite(e, LOW);
digitalWrite(f, LOW);
digitalWrite(g, HIGH);
delay(delayTime);
// 4 => b, c, f, g
digitalWrite(a, LOW);
digitalWrite(b, HIGH);
digitalWrite(c, HIGH);
digitalWrite(d, LOW);
digitalWrite(e, LOW);
digitalWrite(f, HIGH);
digitalWrite(g, HIGH);
delay(delayTime);

// 5 => a, c, d, f, g
digitalWrite(a, HIGH);
digitalWrite(b, LOW);
digitalWrite(c, HIGH);
digitalWrite(d, HIGH);
digitalWrite(e, LOW);
digitalWrite(f, HIGH);
digitalWrite(g, HIGH);
delay(delayTime);
// 6 => a, c, d, e, f, g
digitalWrite(a, HIGH);
digitalWrite(b, LOW);
digitalWrite(c, HIGH);
digitalWrite(d, HIGH);
digitalWrite(e, HIGH);
digitalWrite(f, HIGH);
digitalWrite(g, HIGH);
delay(delayTime);
// 7 => a, b, c
digitalWrite(a, HIGH);
digitalWrite(b, HIGH);
digitalWrite(c, HIGH);
digitalWrite(d, LOW);
digitalWrite(e, LOW);
digitalWrite(f, LOW);
digitalWrite(g, LOW);
delay(delayTime);
// 8 => a, b, c, d, e, f, g
digitalWrite(a, HIGH);
digitalWrite(b, HIGH);
digitalWrite(c, HIGH);
digitalWrite(d, HIGH);
digitalWrite(e, HIGH);
digitalWrite(f, HIGH);
digitalWrite(g, HIGH);
delay(delayTime);
// 9 => a, b, c, d, f, g
digitalWrite(a, HIGH);
digitalWrite(b, HIGH);
digitalWrite(c, HIGH);
digitalWrite(d, HIGH);
digitalWrite(e, LOW);
digitalWrite(f, HIGH);
digitalWrite(g, HIGH);
delay(delayTime);
// 0 => a, b, c, d, e, f
digitalWrite(a, HIGH);
digitalWrite(b, HIGH);
digitalWrite(c, HIGH);
digitalWrite(d, HIGH);
digitalWrite(e, HIGH);
digitalWrite(f, HIGH);
digitalWrite(g, LOW);
delay(delayTime);
}
```


eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 4.5. Typowy układ wyprowadzeń siedmiosegmentowego wyświetlacza LED ze wspólną katodą

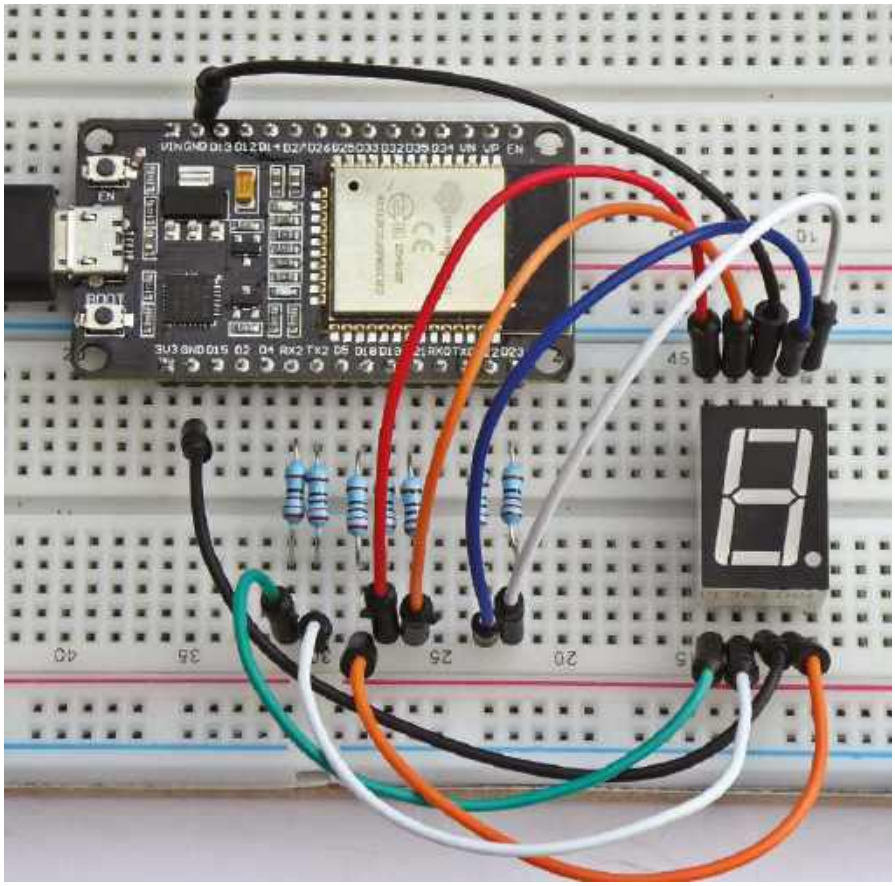
Przykładowy program sterowania wyświetlaczem siedmiosegmentowym pokazano w **listingu 4.1**. Program ten po prostu wyświetla kolejno cyfry 1, 2, ..., 9, 0 przez czas określony przez zmienną `delayTime`, której na początku programu przypisywana jest wartość jednej sekundy (1000 ms).

Program z listingu 4.1 opatrzyliśmy licznymi komentarzami ułatwiającymi jego zrozumienie. Zauważcie, że podobnie jak w przypadku wszystkich naszych przykładowych programów, nie staraliśmy się go nadmiernie upraszczać ani przedstawiać w formie zredukowanej do minimum. Zamiast tego staraliśmy się, aby był on jak najbardziej przejrzysty i jednoznaczny. W miarę jak nabierzecie większej wprawy w programowaniu, będziecie z pewnością poprawiać nasze rozwiązania i tworzyć bardziej zwięzły zapis.

Moduły wyświetlaczy siedmiosegmentowych

Jeśli już przerobiliście prosty licznik z jednym wyświetlaczem siedmiosegmentowym, być może macie ochotę wykorzystać kilka takich wyświetlaczy i zastanawiacie się, czy istnieje na to dobry sposób. Odpowiedź brzmi: oczywiście tak, istnieje!

Jeśli potrzeba kilku wyświetlaczy siedmiosegmentowych, a wszystkie segmenty mają być sterowane tak samo jak w poprzednim przykładzie, to realizacja całości szybko staje się niezwykle uciążliwa. Wystarczy wyobrazić sobie liczbę połączeń prowadzących do 10 lub 12 wyświetlaczy! Co więcej, jeśli wyświetlaczy będzie więcej niż dwa, zacznie nam brakować pinów GPIO. Na szczęście istnieją proste rozwiązania wykorzystujące jeden lub kilka dodatkowych układów sterujących. Są one często realizowane w formie modułu z dwoma, czterema lub ośmioma



Rysunek 4.6. Połączenia modułu ESP32 z wyświetlaczem siedmiosegmentowym o wspólnej katodzie na płytce prototypowej

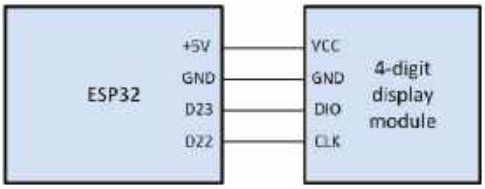
cyframi, a wymagają tylko czterech połączeń z modułem ESP32, co pokazano na **rysunku 4.7**. Po tym, jak zapoznaliśmy się z dość nieporęczną metodą podłączenia do ESP32 pojedynczego wyświetlacza, przejdziemy teraz do znacznie ulepszonego sposobu dołączenia wyświetlacza wielocyfrowego.

W układzie z rysunku 4.7 do sterowania łącznie 30 segmentami wyświetlacza potrzebne są tylko cztery linie. Są to: zasilanie

Listing 4.2. Licznik minut i sekund wykorzystujący wyświetlacz z interfejsem szeregowym TM1637 oraz zegar RTC modułu ESP32

```
/* Licznik minut i sekund z 4-cyfrowym wyświetlaczem LED, wykorzystujący
zegar RTC ESP32, sterownik TM1637 i wyświetlacz LED. Czas jest inicjowany
na 00:00:00. */

#include <ESP32Time.h>
#include <TM1637Display.h>
#define CLK 22                // GPIO22 do CLK na TM1637
#define DIO 23                // GPIO23 do DIO na TM1637

// Skonfiguruj RTC i wyświetlacz
ESP32Time rtc(3600);          // Korekta w sekundach dla GMT+1
TM1637Display display = TM1637Display(CLK, DIO);

void setup() {
display.clear();
display.setBrightness(7);  // Ustaw jasność wyświetlacza
rtc.setTime(1609459200);   // Ustaw RTC na 00:00:00, styczeń 2021 r.
}

void loop() {
int time;
struct tm timeinfo = rtc.getTimeStruct();
time = (rtc.getMinute() * 100) + (rtc.getSecond());
display.showNumberDecEx(time, 0b11100000, true, 4, 0);
delay(1000);                  // Odczekaj jedną sekundę
}
```


eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 4.7. Dołączenie czterocyfrowego modułu wyświetlacza siedmiosegmentowego LED do ESP32

VCC (+5 V z modułu ESP32), DIO z pinu D23 modułu ESP32, CLK z pinu D22 modułu ESP32 oraz GND (masa).

Realizacja wyświetlacza 4-cyfrowego

Połączenia na płytce prototypowej dla układu testowego z modułem wyświetlacza 4-cyfrowego pokazano na **rysunku 4.8**. Gdy porównamy go z rysunkiem 4.6, widać, o ile układ połączeń jest tu prostszy i bardziej przejrzysty. Moduł wyświetlacza zawiera interfejs szeregowy wchodzący w skład scalonego układu sterującego TM1637. Układ ten wykonuje całą pracę związaną z wyświetlaniem, pozwalając użytkownikowi skupić się na jak najlepszym wykorzystaniu jego możliwości.

Ponieważ mamy teraz do dyspozycji cztery cyfry, wykorzystamy je do utworzenia zegara wyświetlającego minuty (dwie cyfry po lewej) i sekundy (dwie cyfry po prawej). Aby pomiar czasu był dokładny, zdecydowaliśmy się nie korzystać z funkcji `delay()`, lecz używać zegara czasu rzeczywistego (RTC) ESP32. Aby móc wykorzystywać układ TMD1637 i blok RTC w ESP32, będziemy musieli dołączyć do naszego programu dwie biblioteki podprogramów. W **listingu 4.2** widzimy dwa wiersze programu, które to robią:

```
#include <ESP32Time.h>
// Aby używać zegara RTC ESP32

#include <TM1637Display.h>
// Aby używać TM1637
```

Jeśli nie macie jeszcze zainstalowanych tych bibliotek, możecie je szybko i łatwo pobrać bezpośrednio w środowisku Arduino IDE. Wystarczy wyszukać potrzebne biblioteki w menedżerze bibliotek (Library Manager).

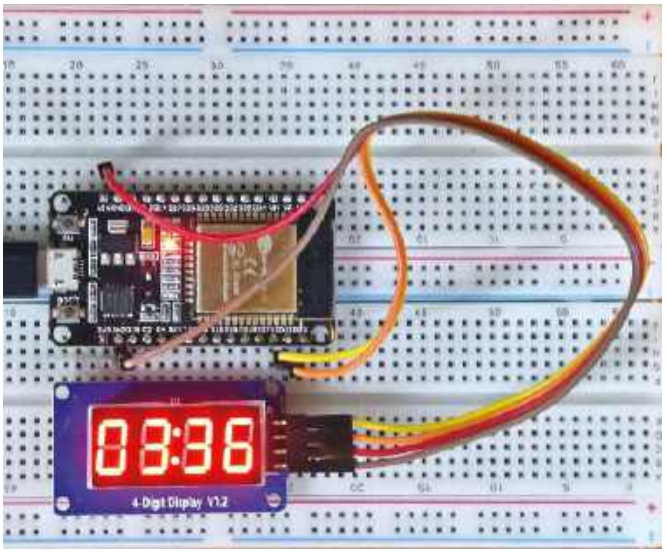
Warsztaty programowania

W różnych zastosowaniach, takich jak gry czy generatory haseł, występuje potrzeba użycia liczb losowych. W środowisku mikrokomputerowym stanowi to niestety pewien problem, jako że nigdzie nie zachodzą tam zjawiska prawdziwie losowe. Aby sprostać potrzebie użycia liczb losowych, język C++ na ESP32 zawiera funkcję `random()` wytwarzającą wartości, które – choć nie są prawdziwie losowe w ścisłym sensie matematycznym – można uznać za ich przydatne „pseudolosowe" przybliżenie. Załóżmy, że potrzeba nam losowej liczby całkowitej z zakresu od 1 (minimum) do 9 (maksimum). Sprawę załatwia poniższy fragment programu:

```
randomValue = random(1, 10);
```

Nie zapominajmy, że zmienną `randomValue` musimy wcześniej zadeklarować w wierszu o następującej postaci:

```
long randomValue;
```



Rysunek 4.8. Połączenia na płytce prototypowej między modułem ESP32 a czterocyfrowym wyświetlaczem siedmiosegmentowym

Aby poprawić losowość wartości zwracanych przez funkcję `random()`, można ustawiać wartość początkową używaną przez tę funkcję. W przeciwnym razie generator liczb losowych będzie zawsze używał tej samej wartości początkowej. Jest na to całkiem prosty sposób.

Na dowolnym wejściu analogowym modułu ESP32 występuje niewielki szum, mający z natury charakter losowy. Napięcie odczytane z niepodłączonego nigdzie pinu analogowego będzie zatem w niewielkim stopniu losowe. Wartością takiego napięcia, odczytaną na przykład z wejścia analogowego A0, można na początku programu zainicjować generator liczb losowych. Wystarczy dodać następujący wiersz:

```
randomSeed(analogRead(0));
```

Listing A przedstawia program, który pozwoli Wam sprawdzić to wszystko samodzielnie. Po pomyślnym skompilowaniu programu i wgraniu do ESP32 kodu wynikowego będzie trzeba uruchomić monitor szeregowy, by móc sprawdzać generowane wartości.

A teraz drugi przykład (**listing B**), który wykorzystuje funkcję `random()` do losowania wyników ORZEŁ i RESZKA. Tym razem interesują nas liczby losowe wyłącznie z przedziału 0...1. Wartość 0 oznacza RESZKĘ, a 1 – ORŁA. Tu także należy uruchomić monitor szeregowy w celu oglądania wyników.

Listing A

```
// Generujemy liczby losowe z przedziału od 1 do 9

long randomValue;

void setup() {
Serial.begin(9600);
// Aby użyć losowego ziarna,
// odkomentuj następny wiersz:
// randomSeed(analogRead(0));
}

void loop() {
randomValue = random(1, 10);
Serial.print(randomValue);
Serial.print(" ");
delay(1000);
}
```


eprasa.pl fb05997b40

```
Listing B

// Symulacja rzutu monetą z losowymi wynikami
// ORZEŁ lub RESZKA

long randomValue;

void setup() {
Serial.begin(9600);
// Aby użyć losowego ziarna,
// odkomentuj następny wiersz:
// randomSeed(analogRead(0));
}

void loop() {
randomValue = random(0, 2);
if (randomValue == 1) {
Serial.print("ORZEŁ ");
} else {
Serial.print("RESZKA");
}
delay(1000);
}
```

No jasne!

Jeśli widzicie, że monitor szeregowy wyświetla bezsensowny ciąg znaków, najpierw sprawdźcie, czy prędkość transmisji w ustawieniach monitora jest zgodna z prędkością ustaloną w programie. Przykłady z listingu A i listingu B działają przy prędkości 9600 bodów i wartość ta musi być zgodna z ustawieniem monitora szeregowego.

Wyświetlacze matrycowe

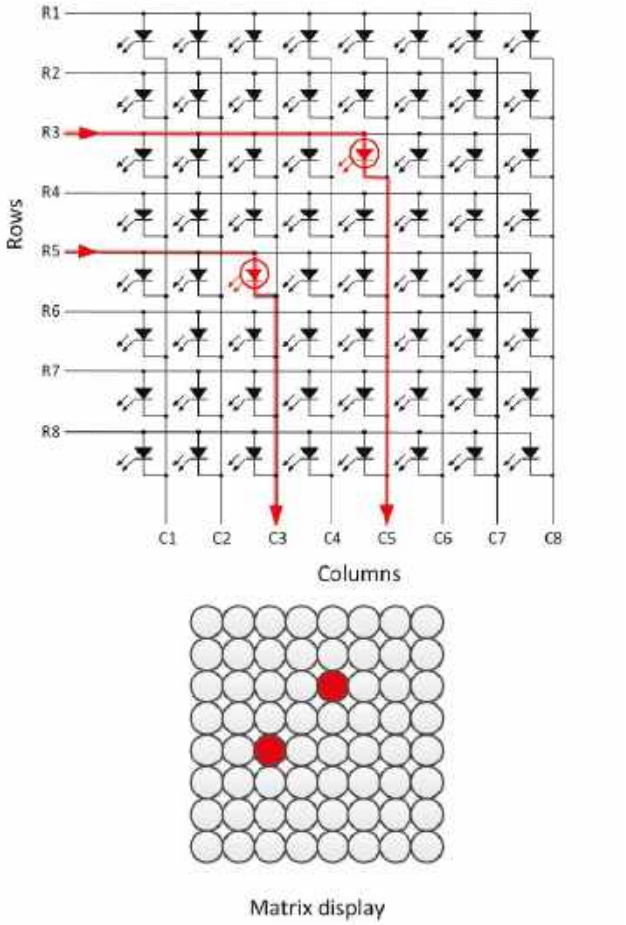
Po eksperymentach z wyświetlaczami siedmiosegmentowymi przejdźmy teraz do innego, bardziej uniwersalnego typu wyświetlacza, zawierającego matrycę pojedynczych diod LED. Najpopularniejsze typy takich wyświetlaczy tworzą matrycę 8×8, jak pokazano na **rysunku 4.9**.

Aby zmniejszyć liczbę połączeń między 64 diodami LED a światem zewnętrznym, diody rozmieszczono w matrycy składającej się z ośmiu wierszy (R1–R8) i ośmiu kolumn (C1–C8). Dzięki takiej konfiguracji każdą diodę można zaświecić poprzez aktywowanie jej wiersza i kolumny. Na rysunku 4.9 pokazujemy, jak można zaświecić dwie diody LED (oznaczone jako R3/C5 i R5/C3). Prąd diod wynosi zazwyczaj od 5 do 15 mA.

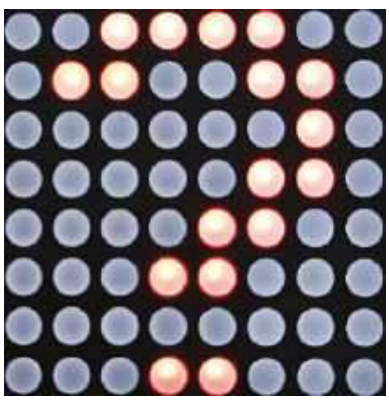
Rysunek 4.10 pokazuje, jak wygląda wyświetlacz matrycowy 8×8, gdy aktywne są następujące diody LED: R1/C3, R1/C4, R1/C5, R1/C6, R2/C2, R2/C3, R2/C6, R2/C7, R3/C7, R4/C6, R4/C7, R5/C5, R5/C6, R6/C4, R6/C5, R8/C4, R8/C5.

Jeśli ustalanie kombinacji diod LED wydaje się Wam zbyt skomplikowane, to informujemy, że problem z wybieraniem odpowiednich diod LED w celu wyświetlenia określonego znaku tekstowego został już rozwiązany. Wystarczy użyć odpowiedniej biblioteki!

Do sterowania matrycowym wyświetlaczem LED wykorzystuje się zazwyczaj standard znany jako „szeregowy interfejs peryferyjny” (Serial Peripheral Interface; SPI). Interfejs SPI obsługuje komunikację szeregową między układem „master” (nadrzędnym), którym jest moduł ESP32, a układem „slave” (podrzędnym), czyli wyświetlaczem matrycowym.



Rysunek 4.9. Podstawowy układ wyświetlacza matrycowego LED 8×8

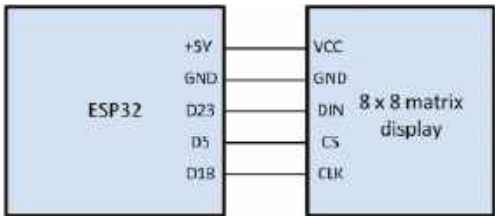


Rysunek 4.10. Wyświetlacz matrycowy LED 8×8 w działaniu

Tabela 4.1. Implementacja SPI w ESP32

Sygnał	Funkcja	Kierunek	Numer pinu VSPI	Numer pinu HSPI
SCLK	zegar szeregowy	wyjście z ESP32	18	14
MOSI	wyjście urządzenia nadrzędnego/wejście urządzenia podrzędnego	wyjście z ESP32	23	13
MISO	wejście urządzenia nadrzędnego/wyjście urządzenia podrzędnego	wejście do ESP32	19	12
CS	wybór układu	wyjście z ESP32	5	15
GND	masa	wspólny	GND	GND

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 4.11. Dołączenie wyświetlacza matrycowego 8×8 do modułu ESP32 przez interfejs SPI



Rysunek 4.13. Schemat symulatora rzucania kostką

No jasne!

Maksymalna wartość losowa generowana przez funkcję `random()` jest o jeden mniejsza niż drugi parametr tej funkcji. Na przykład, aby wytwarzać liczby losowe z przedziału od 1 do 6 (jak liczba oczek na kostce do gry), należy użyć wywołania `random(1, 7)`, a nie `random(1, 6)`. Programiści często o tym zapominają.

Szeregowy interfejs peryferyjny (SPI)

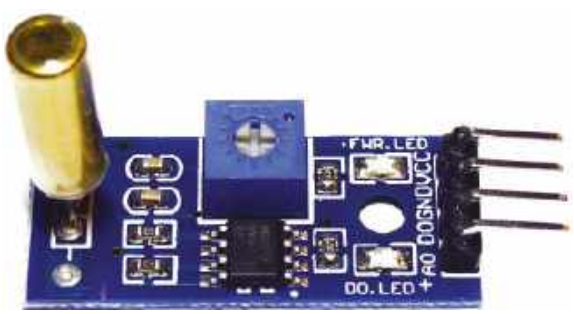
SPI to standard komunikacyjny służący do dołączania jednego lub kilku urządzeń peryferyjnych („slave" – dosłownie „niewolnik"; urządzenie podrzędne) do mikroprocesora lub mikrokontrolera („master", czyli „pan"; urządzenie nadrzędne). Na rynku dostępna jest szeroka gama urządzeń zgodnych ze standardem SPI. Są to między innymi wyświetlacze (zarówno LED, jak i LCD), przetworniki ADC i DAC, a także czujniki temperatury, akcelerometry i układy rozszerzające wejścia/wyjścia. Kilka takich urządzeń przedstawimy w naszym cyklu.

Magistrala SPI zapewnia komunikację z dużą prędkością, ale na krótkich odległościach. Wymaga zazwyczaj połączenia czteroprzewodowego, w skład którego wchodzi sygnał wyboru układu („chip select"; CS), oddzielny dla każdego urządzenia peryferyjnego.

Magistrala SPI to interfejs synchroniczny (taktowany zegarem), umożliwiający transmisję danych jednocześnie w obu kierunkach – od urządzenia nadrzędnego do podrzędnego oraz od podrzędnego do nadrzędnego. Jest to praca w tak zwanym trybie „pełnego dupleksu". Implementacja magistrali SPI w układzie ESP32 wykorzystuje cztery linie sygnałowe plus linię masy. Zostały one wymienione w **tabeli 4.1**, gdzie podano również typowe przypisania sygnałów SPI do pinów na płytkach rozwojowych ESP32.

No jasne!

Większość płytek rozwojowych ESP32 ma piny SPI przypisane zgodnie z tabelą 4.1. Jeśli do tworzenia aplikacji używacie platformy innego typu i będziecie używać SPI, musicie sami sprawdzić przypisanie pinów.



Rysunek 4.12. Prosty i tani czujnik ruchu

No jasne!

Jeśli przez SPI podłączacie kilka urządzeń peryferyjnych, upewnijcie się, że każde z nich ma własne wejście wyboru układu (CS), sterowane przez urządzenie nadrzędne oddzielną linią. Nieprzestrzeganie tego zalecenia może spowodować nieprzewidywalne skutki. Przypis redaktora: nie dotyczy to przypadku kaskadowego łączenia urządzeń, w którym wejścia DIN kolejnych urządzeń są sterowane z wyjść DOUT urządzeń poprzedzających.

ESP32 może obsługiwać przez magistralę SPI cztery kanały, z czego dwa są zarezerwowane dla wbudowanej pamięci FLASH. Pozostawia to do dyspozycji użytkownika dwa niezależne kanały – VSPI i HSPI – z których każdy może obsługiwać maksymalnie po trzy zewnętrzne urządzenia typu „slave".

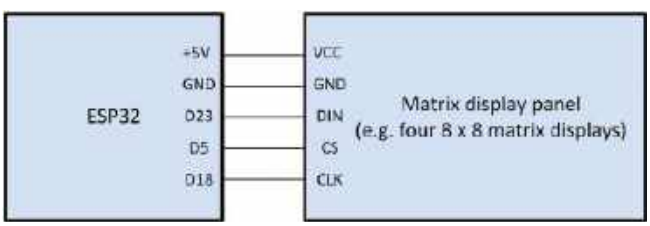
Sposób podłączenia wyświetlacza matrycowego LED 8×8 do układu ESP32 przez SPI przedstawiono na **rysunku 4.11**. Do sterowania łącznie 64 diodami LED potrzebnych jest tylko pięć połączeń:

VCC	→	zasilanie +5 V modułu ESP32
DIN	→	D23 w ESP32
CLK	→	D18 w ESP32
CS	→	D5 w ESP32
GND	→	GND modułu ESP32 (nie zapomnijcie!)

Projekt praktyczny

W tym odcinku projekt praktyczny to symulator rzucania kostką do gry. Składa się on z modułu ESP32, matrycy LED 8×8 oraz taniego czujnika ruchu (**rysunek 4.12**).

Gdy czujnik wykryje ruch (zwykle wystarczy lekkie dotknięcie), nastąpi zmiana poziomu logicznego na jego linii DO, co w programie



Rysunek 4.14. Kaskadowe łączenie kilku wyświetlaczy matrycowych

No jasne!

Duże wyświetlacze matrycowe zawierają bardzo wiele pojedynczych diod LED. Na przykład, jeśli kaskadowo połączone zostaną cztery wyświetlacze 8×8, diod LED będzie łącznie 256. Jeśli wszystkie te diody LED mają świecić jednocześnie (mało prawdopodobne, ale możliwe) i jeśli przez każdą z nich płynie prąd 10 mA, to całkowite obciążenie zasilacza wyniesie ponad 2,5 A. A to zdecydowanie przekracza możliwości standardowego portu USB.

eprasa.pl fb05997b40

Listing 4.3. Program rzucania kostką

```
/* Gra w kości z matrycą LED 8×8 i czujnikiem ruchu */
#include <MD_Parola.h>
#include <MD_MAX72xx.h>
#include <SPI.h>

// Odkomentuj w zależności od typu wyświetlacza:
// #define HARDWARE_TYPE MD_MAX72XX::FC16_HW
#define HARDWARE_TYPE MD_MAX72XX::GENERIC_HW

// Zdefiniuj wyświetlacz i piny wejścia/wyjścia
#define MAX_DEVICES 1
#define CS_PIN 5
const int pinCzujnika = 17;
MD_Parola Display = MD_Parola(HARDWARE_TYPE, CS_PIN, MAX_DEVICES);

void setup() {
Display.begin();
Display.setIntensity(0);
Display.displayClear();
randomSeed(analogRead(27));
// inicjalizacja generatora liczb losowych sygnałem z pinu 27
}

void loop() {
// Oczekiwanie na sygnał z czujnika ruchu
int stanCzujnika = digitalRead(pinCzujnika);
int poprzedniStanCzujnika;
while (stanCzujnika == poprzedniStanCzujnika) {
stanCzujnika = digitalRead(pinCzujnika);
Display.setInvert(false);
Display.setTextAlignment(PA_CENTER);
Display.print("?");
}
// Wykryto ruch, więc uruchamiamy "losowanie"
for (int i = 0; i < 10; i++) {
Display.setInvert(true);
Display.setTextAlignment(PA_CENTER);
Display.print("?");
delay (50);
Display.setInvert(false);
Display.setTextAlignment(PA_CENTER);
Display.print("?");
delay(50);
}
// Wyświetlamy wynik
Display.setTextAlignment(PA_CENTER);
Display.print(String(random(1, 7)));
delay(2000);
poprzedniStanCzujnika = stanCzujnika;
}
```

Listing 4.4. Wyświetlanie tekstów na poczwórnej matrycy LED 8×8

```
/* Wyświetlanie tekstu za pomocą ESP32 i poczwórnej matrycy LED 8×8 */

// Dołącz pliki nagłówkowe bibliotek
#include <MD_Parola.h>
#include <MD_MAX72xx.h>
#include <SPI.h>

// Odkomentuj w zależności od typu wyświetlacza:
#define HARDWARE_TYPE MD_MAX72XX::FC16_HW
// #define HARDWARE_TYPE MD_MAX72XX::GENERIC_HW

// Zdefiniuj wyświetlacz i piny wejścia/wyjścia
#define MAX_DEVICES 4
#define CS_PIN 5
MD_Parola Display = MD_Parola(HARDWARE_TYPE, CS_PIN, MAX_DEVICES);

void setup() {
// Zainicjuj wyświetlacz
Display.begin();
Display.setIntensity(0);
Display.displayClear();
}

void loop() {
Display.setTextAlignment(PA_CENTER);
Display.print("ON AIR");
delay(2000);
}
```

spowoduje wyjście z pętli `while()` (**listing 4.3**). Należy pamiętać, że na początku programu musimy dołączyć trzy biblioteki. Odbywa się to w następujących wierszach:

```
#include <MD_Parola.h>
// Aby zapisywać tekst na wyświetlaczu

#include <MD_MAX72xx.h>
// Aby używać sterownika MAX72xx

#include <SPI.h>
// Aby używać interfejsu SPI
```

Może być konieczne znalezienie i pobranie dwóch pierwszych bibliotek z poziomu środowiska Arduino IDE.

Rysunek 4.13 przedstawia połączenia między wyświetlaczem matrycowym, czujnikiem ruchu a modułem ESP32. Tym razem nie zamieściliśmy pełnego rysunku połączeń, ponieważ układ jest prosty, a czytelnicy mają już niezłe doświadczenie dzięki dwóm poprzednim przykładom zamieszczonym w tym cyklu. Pamiętajmy, że jeśli czujnik ruchu zawiera oprócz wyjścia cyfrowego również wyjście analogowe, to go nie używamy. Program rzucania kostką przedstawiono w listingu 4.3.

Wyświetlanie tekstów

Wyświetlacze matrycowe można łatwo łączyć kaskadowo, tworząc większe bloki wyświetlające teksty zarówno statycznie, jak i z przewijaniem. Jak to zrobić, pokazuje układ na **rysunku 4.14** oraz program z **listingu 4.4**. Przypis redaktora: wyświetlacze są tu połączone kaskadowo. Każdy z nich musi mieć wyjście, oznaczone zwykle jako DOUT, które dołączamy do wejścia DIN następnego wyświetlacza. Z linii D23 modułu ESP32 sterujemy wejściem DIN tylko pierwszego wyświetlacza. Należy tylko pamiętać, że trzeba zmodyfikować program, uwzględniając liczbę wyświetlaczy. Wymaga to wprowadzenia w listingu 4.3 następującej zmiany:

```
#define MAX_DEVICES 4
```

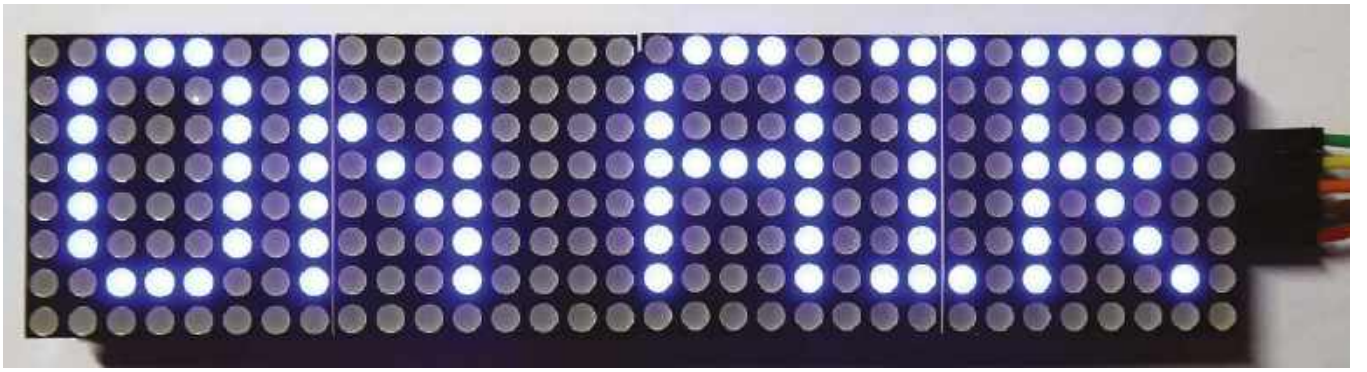
w miejsce

```
#define MAX_DEVICES 1
```

Zadanie

W niniejszym odcinku zadanie polega na rozbudowie sprzętu i modyfikacji programu z listingu 4.4 w celu stworzenia wyświetlacza przy drzwiach wejściowych, który będzie wyświetlał komunikat „CZEKAJ” lub

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 4.15. Tekst wyświetlany przez program z listingu 4.4

„WEJDŹ” w zależności od stanu przycisku dołączonego do jednego z wejść cyfrowych ESP32. Jeśli potrzebujecie wsparcia w zakresie obsługi przycisków, zajrzyjcie do 2. części naszego cyklu.

Za miesiąc

W części 5. przedstawimy czujniki temperatury i wilgotności, zgłębiając przy tej okazji temat popularnych interfejsów 1-wire i I²C. Wyjaśnimy także, jak do ESP32 dołączyć tani wyświetlacz LCD. Warsztaty programowania będą dotyczyły działań matematycznych i funkcji, a w ramach projektu praktycznego zaprezentujemy użyteczny wskaźnik temperatury i wilgotności. ■

Mike Tooley

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

REKLAMA



eprasa.pl fb05997b40



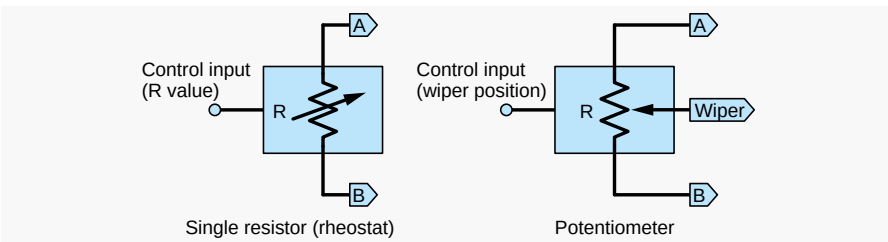
Chirurgia obwodowa

Rezystancja sterowana elektronicznie, część 4

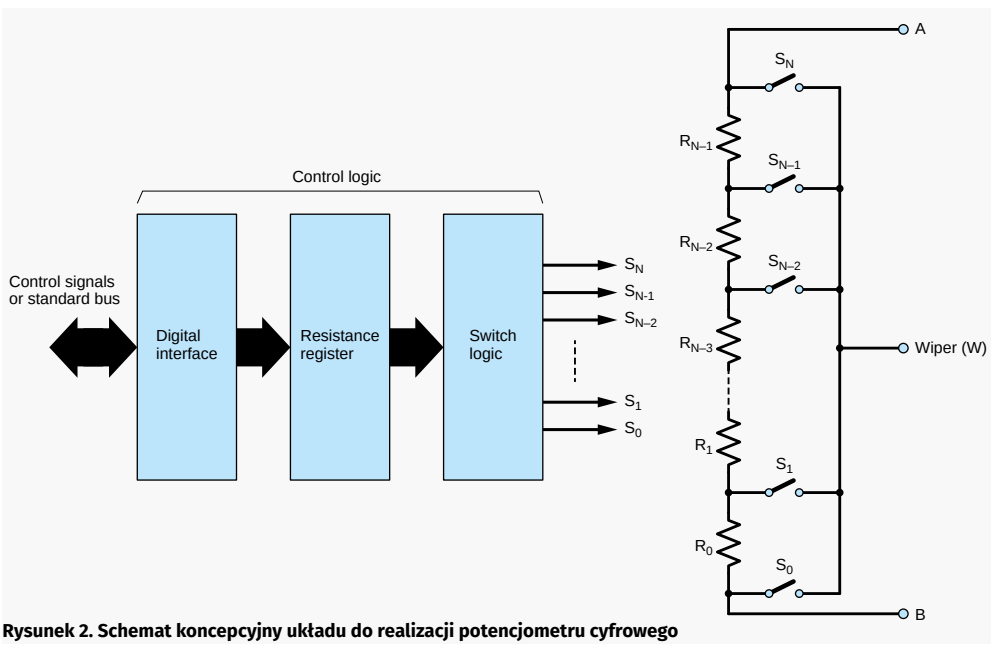
W ostatnich trzech odcinkach omawialiśmy zagadnienia związane z rezystancją sterowaną elektronicznie, skupiając się głównie na wykorzystaniu tranzystorów JFET jako rezystorów sterowanych napięciem. Ten cykl został zainicjowany przez post na forum EEWeb dotyczący elektronicznego sterowania rezystancją, ale nie konkretnie z użyciem tranzystorów JFET. Chociaż takie tranzystory są powszechnie stosowane jako rezystory sterowane elektronicznie i mają duże znaczenie historyczne, nie są one najczęściej stosowanym rozwiązaniem we współczesnych układach elektronicznych. W tym odcinku przyjrzymy się digipotom – potencjometrom cyfrowym – które są układami scalonymi realizującymi funkcję podobną do potencjometrów mechanicznych i trymerów.

Digipoty są dostępne zarówno w wersji reostatu, jak i potencjometru (**rysunek 1**). Wersje potencjometryczne można zazwyczaj używać w trybie reostatu, wykorzystując rezystancję między suwakiem a jednym ze skrajnych zacisków (A lub B). Rezystancja (reostat) lub pozycja suwaka (potencjometr) jest sterowana za pomocą interfejsu cyfrowego. Zazwyczaj digipoty są sterowane przez mikrokontroler, często za pośrednictwem magistrali szeregowej, takiej jak SPI lub I²C, ale dostępne są również prostsze interfejsy umożliwiające zwiększanie lub zmniejszanie nastawy, a także układy z równoległymi wejściami cyfrowymi. Liczba kroków jest zazwyczaj potęgą dwójki, powiązaną z liczbą bitów w cyfrowym układzie sterującym, i mieści się w zakresie od 32 (5-bitowy) do 1024 (10-bitowy), ale dostępne są również elementy o mniejszej liczbie kroków (4 i 16) oraz 100-stopniowe.

Krokowy charakter regulacji potencjometrów cyfrowych różni się od płynnej zmiany ustawień, jaką zapewniają potencjometry mechaniczne ze ścieżką przewodzącą lub rezystory sterowane elektronicznie



Rysunek 1. Podstawowe typy digipotów zastępujących reostat elektromechaniczny i potencjometr



Rysunek 2. Schemat koncepcyjny układu do realizacji potencjometru cyfrowego

eprasa.pl fb05997b40

typu JFET. Potencjometry mechaniczne także nie działają idealnie i w praktyce nie mają nieskończonej liczby stopni regulacji. Ich rzeczywista rozdzielczość i powtarzalność, czyli dokładność, z jaką można ustawić tę samą wartość, mogą wynosić około 0,5% do 1%. Mechaniczne potencjometry wieloobrotowe zapewniają dokładniejszą regulację, jednak są droższe. Potencjometry drutowe mają niższą rozdzielczość, ponieważ zwoje drutu powodują skokową regulację rezystancji. Rozdzielczość potencjometru cyfrowego o N stopniach wynosi 100/N %. Na przykład w przypadku 8-bitowego słowa sterującego wynosi to $100/2^8 = 100/256 = 0{,}4\%$.

Elementy typu digipot

Zanim przejdziemy do dalszego omówienia elementów typu digipot i ich parametrów, warto przyjrzeć się podstawowemu układowi regulacyjnemu z digipotem, ponieważ pozwala to lepiej zrozumieć jego właściwości. Na **rysunku 2** przedstawiony jest schemat koncepcyjny digipotu. Potencjometr składa się z zestawu rezystorów połączonych szeregowo, rozpiętych między punktami A i B. Taki układ jest często nazywany drabinką rezystorową. Całkowita rezystancja między punktami A i B jest stała i nazywana jest rezystancją digipotu. Na rynku dostępne są digipoty o rezystancji od 1 kΩ do 1 MΩ, aczkolwiek najczęściej spotyka się wartości od 5 kΩ do 100 kΩ. Zazwyczaj dany typ układu scalonego jest dostępny w kilku różnych wersjach rezystancyjnych.

Rolę suwaka pełnią przełączniki elektroniczne, z których w danej chwili włączony jest tylko jeden, a wszystkie pozostałe są wyłączone. Połączenia A, B i W odpowiadają standardowemu symbolowi potencjometru pokazanemu na rysunku 1. Przełączniki stanowiące suwak łączą się kolejno z punktami węzłowymi między rezystorami w układzie drabinkowym, dlatego często nazywane są odgałęzieniami. Przełączniki są zazwyczaj realizowane przy użyciu tranzystorów MOSFET.

To, który przełącznik jest włączony, zależy od działania sterujących układów logicznych. W układzie przedstawionym na rysunku 2 rejestr rezystancji przechowuje liczbę binarną określającą położenie suwaka. Jest ona dekodowana w celu ustalenia, który konkretny przełącznik ma być włączony. Wartość liczby zapisanej w rejestrze jest ustawiana przez użytkownika za pośrednictwem interfejsu, który, jak już wspomniano, może przybierać różne formy. Powszechnie stosowane są standardowe magistrale szeregowe oraz interfejsy umożliwiające zwiększanie lub zmniejszanie nastawy. Układy scalone typu Digipot mogą zawierać wiele potencjometrów w jednym chipie (zazwyczaj 2, 4 lub 6).

Rozdzielczość i charakterystyka regulacji

Liczba rezystorów między punktami A i B (rysunek 2) określa rozdzielczość potencjometru, a tym samym liczbę bitów w rejestrze rezystancji. Jeśli wszystkie rezystory mają tę samą wartość, zwaną rezystancją skoku, wówczas rezystancja między punktem A lub B a suwakiem będzie zależała liniowo od wartości zapisanej w rejestrze rezystancji. Nazywa się to liniową charakterystyką regulacji.

Możliwy jest również taki dobór wartości rezystorów, aby rezystancja między zaciskami A lub B a suwakiem zmieniała się logarytmicznie wraz ze zmianą wartości zapisanej w rejestrze rezystancji. Nazywa się to logarytmiczną charakterystyką regulacji.

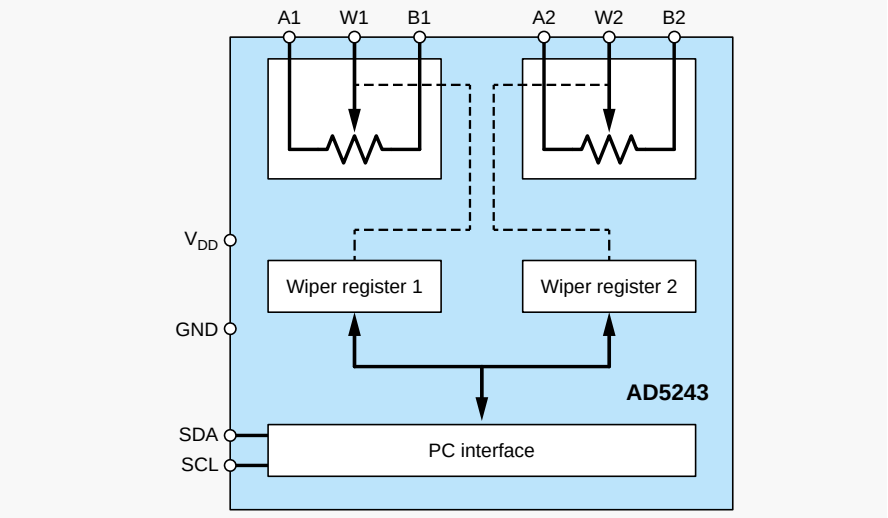
Opisane opcje odpowiadają bezpośrednio liniowym i logarytmicznym potencjometrom mechanicznym. Potencjometry logarytmiczne są często stosowane w sprzęcie akustycznym jako regulatory głośności ze względu na nieliniową reakcję ludzkiego ucha na głośność dźwięku. Zastosowanie potencjometru cyfrowego o logarytmicznej charakterystyce w regulatorze głośności powoduje zmianę poziomu sygnału w stałych krokach decybelowych.

W przypadku potencjometrów cyfrowych o takiej samej rozdzielczości możliwe są różne warianty połączenia punktów węzłowych z suwakiem. Jeśli mamy 7-bitowy rejestr rezystancji, to istnieje $2^7 = 128$ możliwych ustawień suwaka, co oznacza, że można sterować 128 przełącznikami, a tym samym liczba rezystorów jest o jeden mniejsza, czyli wynosi 127.

Na rysunku 2 przedstawiono N+1 przełączników (oznaczonych od S_0 do S_N) i N rezystorów (oznaczonych od R_0 do R_{N-1}), co pozwala na bezpośrednie podłączenie suwaka zarówno do zacisku A, jak i B. Odpowiada to sytuacji typowej dla potencjometru mechanicznego, w którym przy pełnym obrocie pokrętła suwak może być podłączony bezpośrednio do skrajnych zacisków ścieżki przewodzącej.

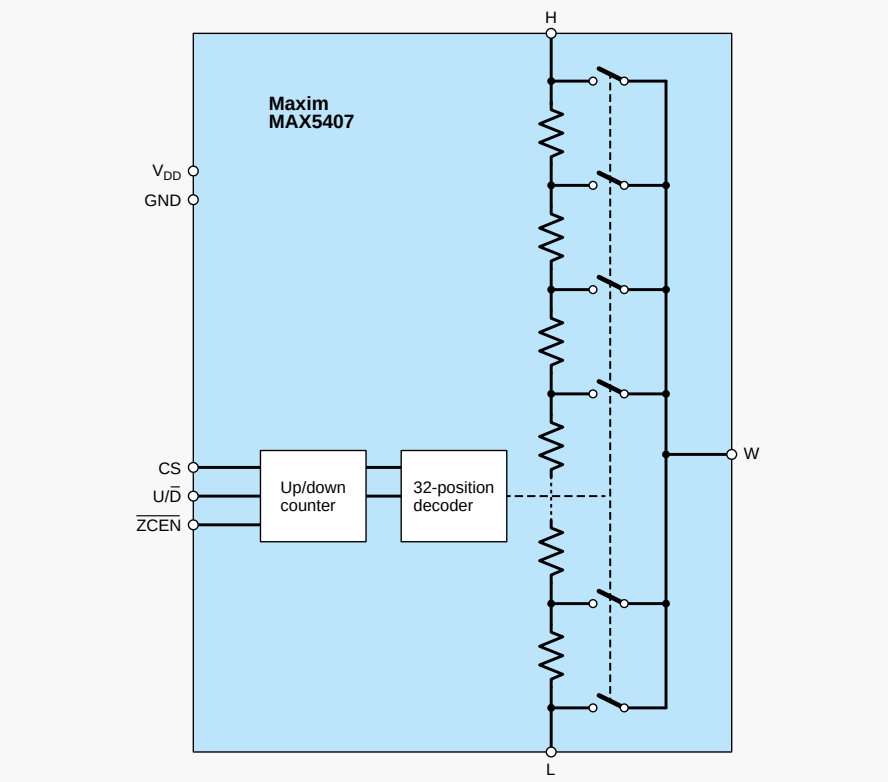
Biorąc pod uwagę digipot o liniowej charakterystyce i przyjmując za punkt odniesienia zacisk B, gdy przełącznik S_0 jest włączony, nominalna rezystancja między zaciskiem B a suwakiem W jest zerowa. Nazywa się to ustawieniem zerowym. Gdy włączony jest przełącznik S_N, maksymalna rezystancja między zaciskiem B a suwakiem W wynosi $N \times R_S$. Jest to ustawienie w pełnej skali.

Projektanci mogą preferować układ drabinkowy zawierający 128 rezystorów zamiast 127. Można to osiągnąć przez zastosowanie 8-bitowego rejestru rezystancji, którego wartość binarna zmienia się od 00000000 do 10000000. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie 7-bitowego rejestru rezystancji i usunięcie jednego ze skrajnych przełączników pokazanych na rysunku 2. Ta ostatnia opcja oznacza, że suwak nie może połączyć się bezpośrednio z jednym z zacisków i uzyskać zerowej rezystancji do zacisku A lub B. Te rozważania mają także zastosowanie do digipotów o innych rozdzielczościach, na przykład wyposażonych w 8- lub 9-bitowe rejestry i 255 lub 256 rezystorów. To, która z opcji ma zastosowanie, zależy od typu digipotu, a projektanci układów powinni być tego świadomi.



Rysunek 3. Schemat blokowy układu AD5243, podwójnego potencjometru o 256 pozycjach, sterowanego przez I²C

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 4. Schemat blokowy układu MAX5407, 32-punktowego potencjometru cyfrowego o charakterystyce logarytmicznej, z krokami co 1 dB

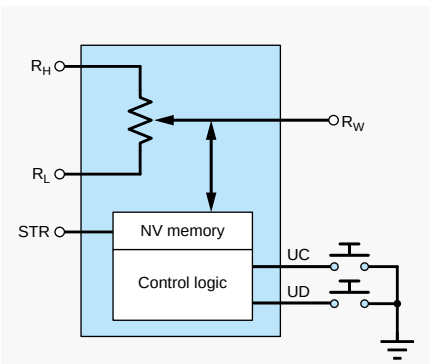
Pamięć

Jeśli potencjometr mechaniczny zostanie ustawiony na określoną wartość, a zasilanie układu zostanie wyłączone, to po ponownym jego włączeniu ustawienie potencjometru pozostanie bez zmian. Można powiedzieć, że potencjometr lub trymer mechaniczny zapamiętuje swoje ustawienie, o ile nikt nim nie obróci, gdy zasilanie układu jest wyłączone.

Najprostszy potencjometr cyfrowy traci informację o ustawieniu suwaka po odłączeniu zasilania. Zazwyczaj taki układ w momencie włączenia zasilania przyjmuje ustalone położenie początkowe. Może to nie zapewniać optymalnych warunków działania podczas uruchamiania urządzenia. Na przykład regulator głośności, który po włączeniu zasilania jest zawsze ustawiony w pozycji zerowej, może nie zapewniać użytkownikowi odpowiedniego komfortu obsługi systemu akustycznego.

W systemach, w których digipoty są sterowane za pomocą mikrokontrolera, procesor może zapisywać bieżące ustawienia suwaków w pamięci nieulotnej i przywracać je po ponownym uruchomieniu systemu. Problem polega na tym, że konfiguracja całego systemu przez oprogramowanie zajmuje trochę czasu, szczególnie jeśli mamy do czynienia z kilkoma potencjometrami cyfrowymi i złożonymi procedurami inicjalizacyjnymi. Oznacza to, że potencjometry cyfrowe będą tymczasowo ustawione na wartości domyślne, które mogą być nieodpowiednie, szczególnie w przypadku, gdy potencjometry cyfrowe są używane jako regulatory do ustawiania krytycznych parametrów, takich jak napięcie polaryzacji czy poziom wzmocnienia. W niektórych przypadkach nieodpowiednie wartości początkowe lub ich gwałtowne zmiany podczas inicjalizacji mogą powodować niestabilność, zakłócenia, a nawet awarię systemu. Problem nie występuje w przypadku regulatorów mechanicznych, ponieważ po włączeniu zasilania zachowują one wymagane ustawienia.

Rozwiązaniem problemu jest umieszczenie pamięci nieulotnej w strukturze układu scalonego digipotu. Wtedy potencjometr cyfrowy zachowuje ustawienie suwaka z momentu wyłączenia zasilania i przywraca je natychmiast po włączeniu. Niektóre urządzenia są wyposażone w pamięć jednokrotnego zapisu (OTP). Umożliwia ona zapisanie położenia suwaka przywracanego po każdym włączeniu zasilania albo trwałe ustalenie jego położenia, bez możliwości późniejszej zmiany. Rozwiązanie to jest zazwyczaj stosowane w układach wymagających jednorazowej kalibracji.

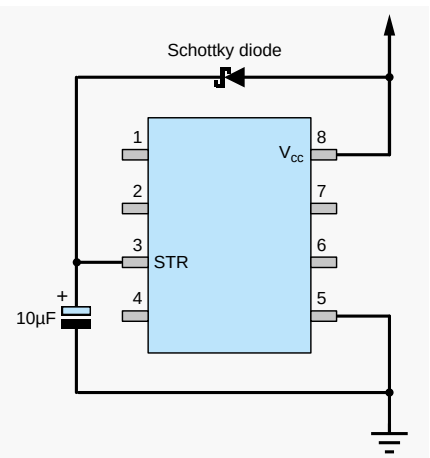


Rysunek 5. Schemat blokowy 64-pozycyjnego, liniowego digipotu DS1809

Potencjometr cyfrowy typu AD5243

Jak wspomniano powyżej, dostępne są różne warianty wykonania potencjometrów cyfrowych. Przyjrzymy się trzem przykładowym układom scalonym, aby zaprezentować różne dostępne opcje. Na **rysunku 3** przedstawiony jest schemat blokowy potencjometru cyfrowego typu AD5243 firmy Analog Devices. W 10-pinowej obudowie umieszczone są dwa 256-pozycyjne potencjometry o nominalnej rezystancji równej 2,5 kΩ, 10 kΩ, 50 kΩ lub 100 kΩ. Układ zastępuje mechaniczne trymery służące do wstępnej regulacji urządzeń elektronicznych. Interfejsem sterującym jest magistrala szeregowa I²C, która wymaga zastosowania tylko dwóch przewodów: zegara (SCL) i danych (SDA). Podobny układ typu AD5248 zawiera dwa reostaty oraz ma piny adresowe, co pozwala na współdzielenie tej samej magistrali I²C przez wiele elementów. Zazwyczaj magistrala I²C jest podłączona do mikrokontrolera, którego oprogramowanie steruje położeniem suwaków potencjometrów.

Pozycje suwaków w układzie AD5243 ustawia się poprzez wprowadzenie 8-bitowej wartości za pośrednictwem magistrali I²C oraz podanie pojedynczego bitu adresowego wskazującego, który z potencjometrów jest aktualnie



Rysunek 6. Schemat układu DS1809 z zewnętrznymi elementami umożliwiającymi zapisanie pozycji suwaka w pamięci nieulotnej po wyłączeniu zasilania

eprasa.pl fb05997b40

sterowany. Za pośrednictwem tej samej magistrali można również odczytać aktualną pozycję suwaka. Potencjometr można dezaktywować za pomocą bitu sterującego. Powoduje to odłączenie zacisku A i zwarcie suwaka z zaciskiem B. Układ AD5243 nie posiada pamięci nieulotnej, ale charakteryzuje się bardzo niskim poborem prądu, na poziomie 1,3 µA, więc w celu zachowania ostatniego ustawienia suwaka może pozostawać włączony, gdy reszta systemu jest wyłączona. Taki sposób wykorzystania układu jest omówiony w jego nocie katalogowej.

Potencjometr cyfrowy MAX5407

Na **rysunku 4** przedstawiony jest schemat blokowy układu typu MAX5407 firmy Maxim. MAX5407 to potencjometr cyfrowo-analogowy o charakterystyce logarytmicznej z 32 punktami węzłowymi, skonfigurowany tak, aby odstępy między kolejnymi krokami regulacji wynosiły 1 dB. Jego rezystancja całkowita wynosi 20 kΩ. Układ MAX5407 został stworzony w celu zastąpienia potencjometrów mechanicznych w torach akustycznych, w takich elementach sterujących jak regulatory głośności i balansu. Po włączeniu zasilania urządzenie resetuje się do najniższej pozycji i nie zapisuje poprzedniego ustawienia w pamięci nieulotnej.

Problemem, który może wystąpić w przypadku potencjometrów cyfrowych stosowanych w układach akustycznych, jest kliknięcie słyszalne podczas zmiany położenia suwaka. Aby rozwiązać ten problem, układ MAX5407 został wyposażony w detektor przejścia przez zero, włączany przez podanie stanu niskiego na wejście ZCEN. Zmiana położenia suwaka następuje po wykryciu zerowego napięcia między zaciskami L i H, co ogranicza słyszalne kliknięcia. Jeśli w ciągu 50 ms od momentu odebrania polecenia zmiany położenia suwaka detektor nie wykryje przejścia sygnału przez zero, układ i tak zrealizuje to polecenie.

Położenie suwaka w układzie MAX5407 jest sterowane przez dwukierunkowy licznik, którego stan można zmienić za pomocą pinów U/D i CS. Kierunek liczenia jest ustalany przez wartość na pinie U/D w momencie, gdy stan pinu CS zmienia się z niskiego na wysoki. Następnie, gdy pin CS pozostaje w stanie wysokim, licznik może być zwiększany lub zmniejszany przez podawanie zboczy narastających na pin U/D. Gdy pin CS jest w stanie niskim, zmiana pozycji suwaka jest niemożliwa i utrzymuje on swoje ostatnie ustawienie.

Potencjometr cyfrowy DS1809

Na **rysunku 5** przedstawiony jest schemat blokowy potencjometru cyfrowego DS1809 „Dallastat", również firmy Maxim/Analog Devices. Należy zauważyć, że w przeciwieństwie do dwóch układów omówionych powyżej, które są elementami do montażu powierzchniowego, model DS1809 jest dostępny w 8-pinowej obudowie do montażu przewlekanego. DS1809 to 64-pozycyjny potencjometr cyfrowy o rezystancji 10 kΩ, 50 kΩ lub 100 kΩ, z wbudowaną pamięcią nieulotną do przechowywania ostatniej pozycji suwaka.

Interfejs sterujący układu DS1809 został zaprojektowany tak, aby umożliwić proste sterowanie położeniem suwaka za pomocą zwykłych przycisków. W razie potrzeby takim interfejsem można łatwo sterować za pomocą procesora. W przypadku sterowania przyciskami piny wejściowe UC (sterowanie w górę) i DC (sterowanie w dół) są do nich podłączone w sposób pokazany na rysunku 5. Piny DC i UC są podciągnięte do poziomu wysokiego przez wewnętrzne rezystory, a do ich prawidłowego działania nie jest wymagany zewnętrzny układ eliminujący skutki odbijania styków.

Niski stan na jednym z wejść (DC lub UC), trwający dłużej niż 1 ms, ale krócej niż 0,5 s, spowoduje przesunięcie licznika o jedną pozycję w górę lub w dół. Powtarzające się impulsy muszą być rozdzielone odstępem trwającym co najmniej 1 ms, w przeciwnym razie zostaną zignorowane. Stan niski na wejściu trwający dłużej niż 0,5 s będzie interpretowany jako naciśnięcie i przytrzymanie przycisku i spowoduje zmianę pozycji licznika o jeden krok co 100 ms, aby ułatwić szybką regulację w szerszym zakresie.

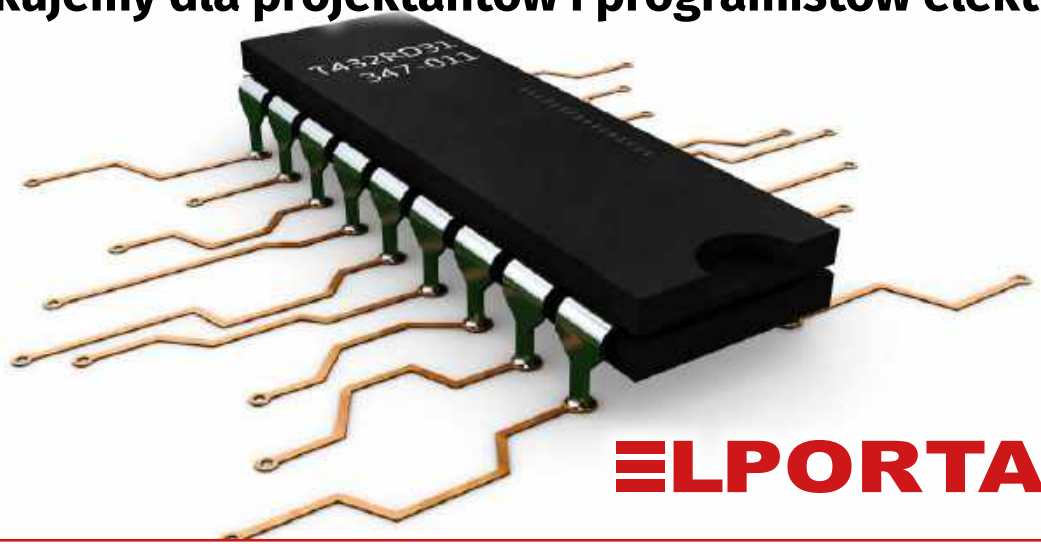
Aby układ DS1809 mógł zapisać położenie suwaka w pamięci nieulotnej, konieczne jest zastosowanie zewnętrznego kondensatora i diody Schottky'ego, podłączonych zgodnie ze schematem z **rysunku 6**. Jeśli układ DS1809 jest sterowany przez procesor, zapis położenia suwaka można zainicjować za pomocą pinu STR bez konieczności stosowania zewnętrznej diody i kondensatora. ■

Ian Bell

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

REKLAMA

Publikujemy dla projektantów i programistów elektroniki



ELPORTAL.pl

eprasa.pl fb05997b40

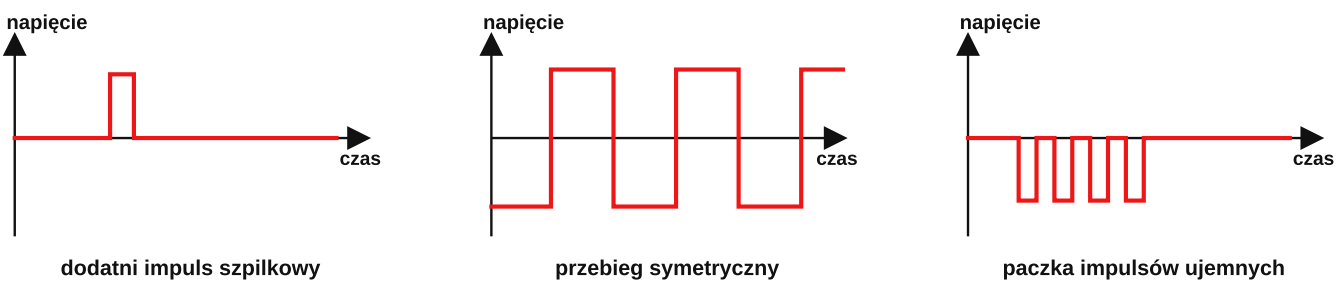
Patronat EdW nad szkołami i uczelnianymi Kołami Naukowymi rozkwita i daje redakcji EdW impulsy zachęcające do wspierania edukacji szkolnej i uczelnianej. Działa sprzężenie zwrotne. Dostajemy mnóstwo wiadomości od uczniów, nauczycieli i studentów. Dla nich jest ta rubryka.



Sygnały impulsowe, obok sygnałów sinusoidalnych, należą do najczęściej wykorzystywanych w codziennej praktyce. Są powszechnie stosowane w układach cyfrowych, między innymi do sterowania ich pracą. Impulsy można jednak również wykorzystywać do szybkiej oceny charakterystyk przenoszenia układów analogowych i cyfrowych.

Informacje podstawowe
Czym jest napięcie impulsowe?

Impuls jest sygnałem napięciowym, który może przyjmować tylko dwie wartości i co najmniej dwukrotnie szybko przełącza się między nimi. Na poniższym rysunku przedstawiono idealne przebiegi kilku sygnałów impulsowych. Seria impulsów (ang. *burst*) to ciąg kilku jednakowych impulsów.



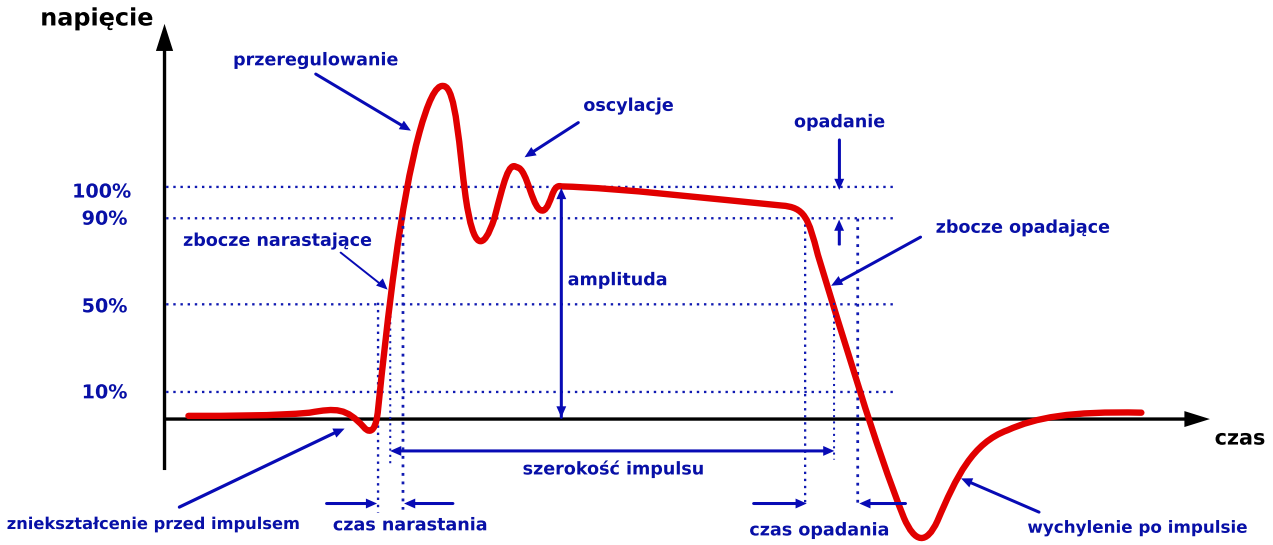
Przykłady idealnych przebiegów sygnałów impulsowych. (© 2019 Jos Verstraten)

Anatomia impulsu napięciowego

Oczywiście przedstawione idealne przebiegi impulsowe nie występują w praktyce. Dokładna analiza impulsu pozwala stwierdzić, że taki sygnał ma wiele charakterystycznych cech, z których każda ma własną nazwę. Na poniższym rysunku przedstawiono budowę impulsu.

- Zniekształcenia poprzedzające impuls (*pre-pulse distortion*). Występują niekiedy na wyjściu układu, jeśli opóźnienia propagacji poszczególnych harmonicznych zawartych w impulsie znacznie się różnią (więcej informacji w dalszej części artykułu).
- Zbocze narastające (*leading edge*). Czas, w którym napięcie wzrasta od 10% do 90% wartości końcowej. Nazywa się go czasem narastania.
- Przeregulowanie (*overshoot*). Występuje, gdy układ wzmacnia wyższe harmoniczne impulsu bardziej niż niższe (więcej informacji w dalszej części artykułu).
- Oscylacje tłumione (*ringing*). Wskazują, że układ generujący impuls ma skłonność do oscylacji o wysokiej częstotliwości.

eprasa.pl fb05997b40

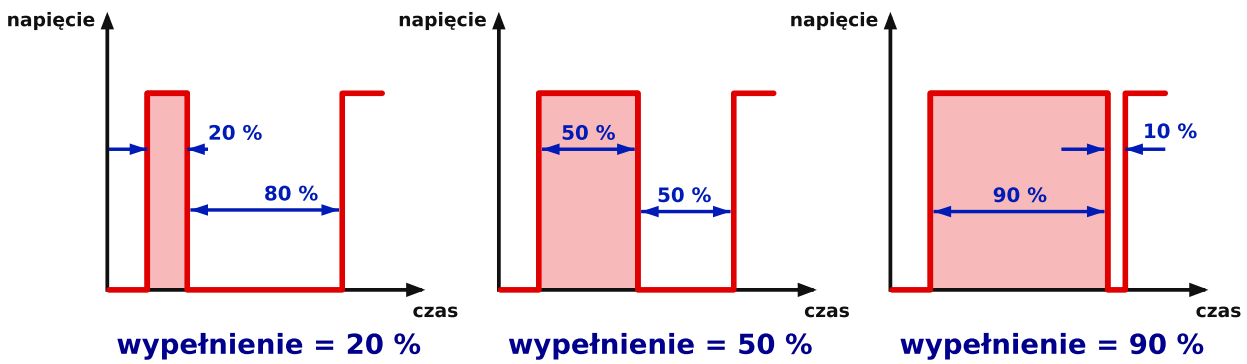


Elementy składowe impulsu. (© 2019 Jos Verstraten)

- Amplituda. Różnica napięć między poziomem niskim a wysokim impulsu, wyrażona w woltach.
- Opadanie wierzchołka impulsu (*droop*). Miejscowe zmniejszenie amplitudy spowodowane słabszym wzmacnianiem niższych harmonicznych sygnału (więcej informacji w dalszej części artykułu).
- Zbocze opadające (*trailing edge*). Czas, w którym napięcie spada od 90% do 10% wartości końcowej. Nazywa się go czasem opadania.
- Podbicie po zboczu opadającym (*backswing*). Opóźnione wygasanie sygnału spowodowane różnicami czasu propagacji w układzie przetwarzającym impuls.
- Szerokość impulsu (*pulse width*). Czas między chwilą, w której zbocze narastające osiąga 50% amplitudy, a chwilą, w której zbocze opadające osiąga tę samą wartość.

Współczynnik wypełnienia impulsu (*duty cycle*)

Jednej z ważnych właściwości napięcia impulsowego nie można przedstawić na powyższym rysunku. Współczynnik wypełnienia określa procentowy udział czasu, przez który sygnał utrzymuje wysoki poziom napięcia, w całym okresie przebiegu. Okres to oczywiście czas trwania jednego pełnego cyklu sygnału. Na poniższym rysunku przedstawiono graficznie tę właściwość napięcia impulsowego. Jeśli przebieg impulsowy jest całkowicie symetryczny w czasie, współczynnik wypełnienia wynosi 50%.



Graficzne wyjaśnienie pojęcia współczynnika wypełnienia. (© 2019 Jos Verstraten)

Okres T przebiegu impulsowego

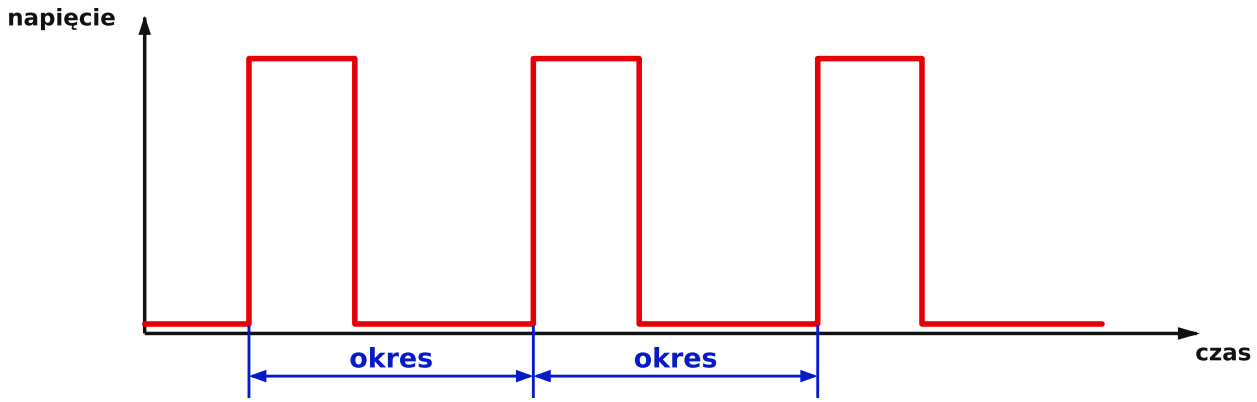
Inną bardzo ważną wielkością charakteryzującą okresowy przebieg impulsowy jest okres. Wyjaśniono to na poniższym wykresie. Okres T sygnału okresowego to czas trwania jednego pełnego cyklu przebiegu, czyli odstęp czasu między dwoma kolejnymi punktami przebiegu o tej samej fazie. Okres T jest odwrotnością częstotliwości f i wyraża się go w sekundach. Zależność tę opisuje wzór: $T = 1/f$ lub $f = 1/T$

Sygnał impulsowy o okresie 1 milisekundy ma zatem częstotliwość: $f = 1/0{,}001 = 1000$ Hz $= 1$ kHz

Poziomy logiczne impulsu cyfrowego

Impulsy są często wykorzystywane do sterowania cyfrowymi układami scalonymi z rodzin TTL 74xx i CMOS 40xx. Należy wówczas uwzględnić dopuszczalne zakresy napięć odpowiadających stanom logicznym niskim (L) i wysokim (H) na wejściach tych układów.

eprasa.pl fb05997b40



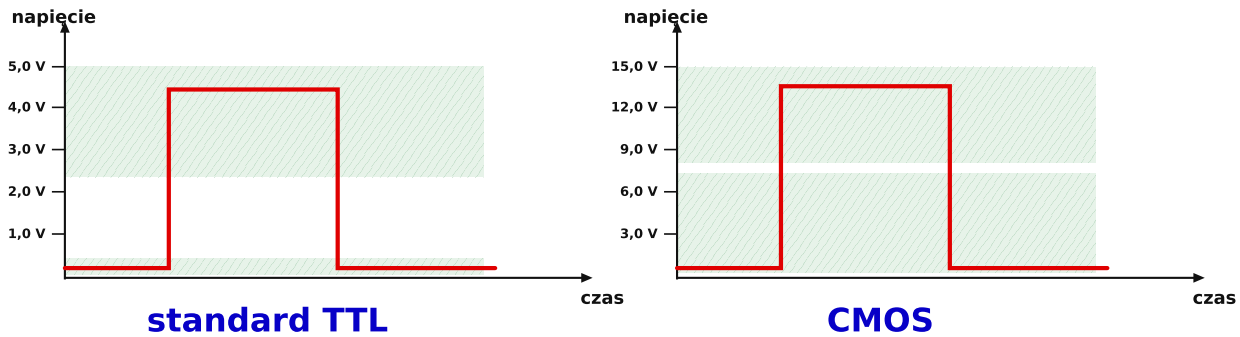
Graficzne wyjaśnienie pojęcia okresu. (© 2019 Jos Verstraten)

W przypadku standardowych układów TTL wartości progowe wynoszą:

- Poniżej 0,4 V dla stanu niskiego (L).
- Powyżej 2,4 V dla stanu wysokiego (H).

Przypis redaktora: Podane powyżej wartości 0,4 V i 2,4 V dotyczą gwarantowanych poziomów napięć wyjściowych standardowych układów TTL przy określonych warunkach obciążenia, a nie dopuszczalnych poziomów wejściowych. Dla wejść standardowych układów TTL napięcie nieprzekraczające 0,8 V jest rozpoznawane jako stan niski, natomiast napięcie wynoszące co najmniej 2,0 V – jako stan wysoki.

W przypadku układów CMOS i rodziny 74HC próg przełączania znajduje się w przybliżeniu w połowie napięcia zasilania. Jeśli na przykład bramka NAND CD4011 jest zasilana napięciem 15 V, próg przełączania między stanami niskim (L) i wysokim (H) wynosi około 7,5 V.



Progi napięciowe stanów niskiego (L) i wysokiego (H) w standardowych układach TTL i CMOS. (© 2019 Jos Verstraten)

Przypis redaktora: Wartość 7,5 V jest orientacyjnym, typowym progiem przełączania, a nie gwarantowaną granicą rozpoznawania stanów logicznych. W układach CMOS rzeczywisty próg zależy między innymi od konstrukcji układu, napięcia zasilania i temperatury. Gwarantowane zakresy napięć wejściowych należy sprawdzać w dokumentacji konkretnego układu.

Szereg Fouriera impulsu symetrycznego w czasie
Sumowanie sinusoid pozwala uzyskać przebieg impulsowy

Choć może się to wydawać niewiarygodne, wykazano, że napięcie o przebiegu impulsowym można przedstawić jako sumę teoretycznie nieskończonej liczby napięć sinusoidalnych o częstotliwościach będących całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości przebiegu impulsowego. Sygnał impulsowy o częstotliwości 1 kHz można zatem przedstawić jako sumę sygnałów sinusoidalnych o częstotliwościach 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz itd. Wzajemne proporcje amplitud tych sygnałów sinusoidalnych decydują o kształcie przebiegu impulsowego. Taką sumę sinusoid nazywa się szeregiem Fouriera. Składowe sinusoidalne o częstotliwościach wyższych od częstotliwości podstawowej przebiegu impulsowego nazywa się wyższymi harmonicznymi. Teorię tę opracował w XIX wieku francuski matematyk Fourier. Jest ona jedną z najważniejszych teorii matematycznych stosowanych w elektronice.

Szereg Fouriera impulsu symetrycznego w czasie

Z teorii tej wynika, że symetryczny w czasie przebieg prostokątny składa się z następujących harmonicznych sinusoidalnych:

$$f(x) = \sin x + 1/3 \sin 3x + 1/5 \sin 5x + 1/7 \sin 7x + 1/9 \sin 9x + ...$$

Być może ten zapis matematyczny niewiele Państwu mówi, dlatego wyjaśnijmy ten wzór prostszym językiem.

Symetryczny przebieg prostokątny o częstotliwości 1 kHz można uzyskać przez zsumowanie następujących sinusoidalnych składowych harmonicznych:

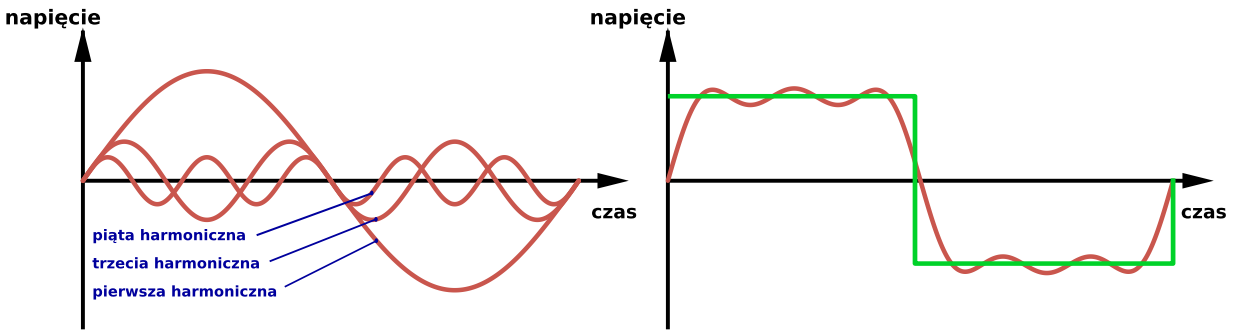
- Sinusoida o częstotliwości 1 kHz i amplitudzie 1,000 V.

eprasa.pl fb05997b40

- Sinusoida o częstotliwości 3 kHz i amplitudzie 0,333 V.
- Sinusoida o częstotliwości 5 kHz i amplitudzie 0,200 V.
- Sinusoida o częstotliwości 7 kHz i amplitudzie 0,142 V.
- Sinusoida o częstotliwości 9 kHz i amplitudzie 0,111 V.
- Sinusoida o częstotliwości 11 kHz i amplitudzie 0,090 V.
- itd.

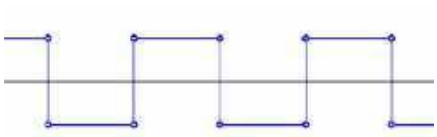
Jak widać, amplitudy kolejnych harmonicznych są coraz mniejsze. W praktyce można uzyskać przebieg wyraźnie przypominający symetryczny przebieg prostokątny, sumując harmoniczne nieparzyste aż do dziewiętnastej włącznie.

Na poniższym rysunku przedstawiono przebieg sygnału powstałego przez zsumowanie pierwszej, trzeciej i piątej harmonicznej. Widać już wyraźnie zarys symetrycznego przebiegu prostokątnego.



Sumowanie nieparzystych harmonicznych o odpowiednich amplitudach pozwala ostatecznie uzyskać przebieg prostokątny. (© 2019 Jos Verstraten)

Na animacji (na stronie: https://elportal.pl/do-pobrania), przygotowanej przez LucasVB, można wyraźnie zobaczyć, jak wraz ze wzrostem liczby sumowanych harmonicznych przebieg coraz bardziej zbliża się do idealnego symetrycznego przebiegu prostokątnego. Symbol N oznacza oczywiście liczbę harmonicznych sinusoidalnych uwzględnionych w sumie.

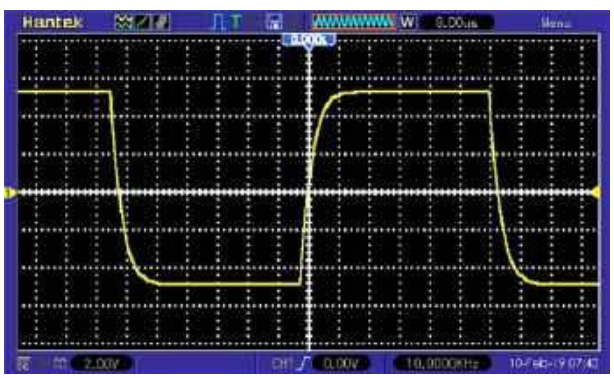


Pod adresem https://elportal.pl/do-pobrania znajduje się animacja, która pokazuje, jak za pomocą szeregu Fouriera powstaje idealny symetryczny przebieg prostokątny (© LucasVB – Wikimedia Commons)

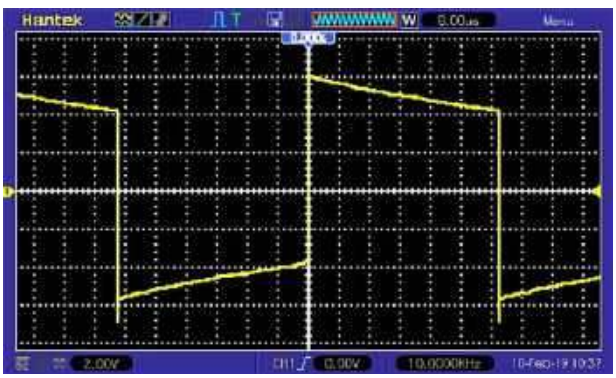
Impuls symetryczny jako narzędzie analizy

Oczywiste jest, że kształt symetrycznego przebiegu prostokątnego zmienia się wraz ze zmianą stosunku amplitud poszczególnych harmonicznych. Dzięki temu zjawisku można wykorzystać taki przebieg do szybkiej oceny właściwości układu. Wystarczy podać na wejście układu sygnał o prawidłowym, symetrycznym przebiegu prostokątnym i za pomocą oscyloskopu sprawdzić jego kształt na wyjściu. Jeśli na wyjściu nadal występuje prawidłowy, symetryczny przebieg prostokątny, oznacza to, że układ jednakowo wzmacnia wszystkie harmoniczne aż do dwudziestej włącznie, a więc ma szerokie pasmo przenoszenia. Aby sprawdzić, czy wzmacniacz akustyczny jednakowo wzmacnia wszystkie częstotliwości słyszalne, wystarczy zatem podać na jego wejście kilka symetrycznych przebiegów prostokątnych o różnych częstotliwościach. Jeśli na wejście wzmacniacza podamy przebieg prostokątny o częstotliwości 1 kHz, a na wyjściu otrzymamy sygnał niezniekształcony, możemy stwierdzić, że wzmacniacz prawidłowo pracuje do częstotliwości 20 kHz, odpowiadającej dwudziestej harmonicznej częstotliwości podstawowej 1 kHz.

Przypis redaktora: Badanie wzmacniacza sygnałem prostokątnym pozwala szybko ocenić jego odpowiedź częstotliwościową, ale nie zastępuje pomiaru charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej. Zachowanie kształtu przebiegu nie gwarantuje jednakowego wzmocnienia wszystkich częstotliwości do 20 kHz. Ponadto symetryczny przebieg prostokątny zawiera wyłącznie harmoniczne nieparzyste, zatem nie występuje w nim dwudziesta harmoniczna o częstotliwości 20 kHz.



Typowy kształt symetrycznego przebiegu prostokątnego, którego wyższe harmoniczne zostały stłumione. (© 2019 Jos Verstraten)



Tak wygląda impuls, gdy niższe harmoniczne są tłumione. (© 2019 Jos Verstraten)

eprasa.pl fb05997b40

Tłumienie wysokich częstotliwości

Jeśli przebieg na wyjściu układu przypomina ten przedstawiony na poniższym oscylogramie, oznacza to, że badany układ słabiej wzmacnia wyższe harmoniczne sygnału, a więc źle przenosi wysokie częstotliwości. Im mniej strome są zbocza narastające i opadające, tym silniej tłumione są wyższe harmoniczne.

Tłumienie niskich częstotliwości

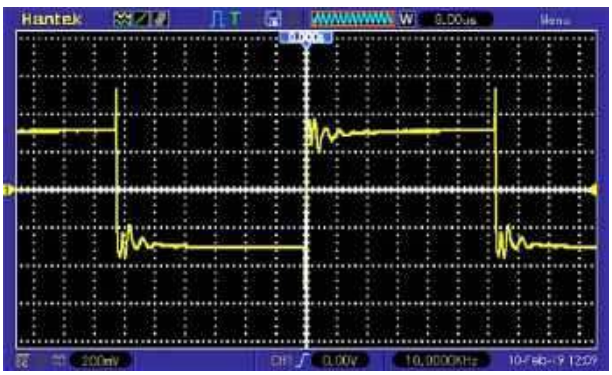
Jeśli przebieg prostokątny na wyjściu układu wykazuje znaczne opadanie wierzchołka impulsu, jak na poniższym oscylogramie, oznacza to, że układ tłumi niższe harmoniczne sygnału, a więc nie wzmacnia prawidłowo niskich częstotliwości.

Ryzyko wystąpienia oscylacji

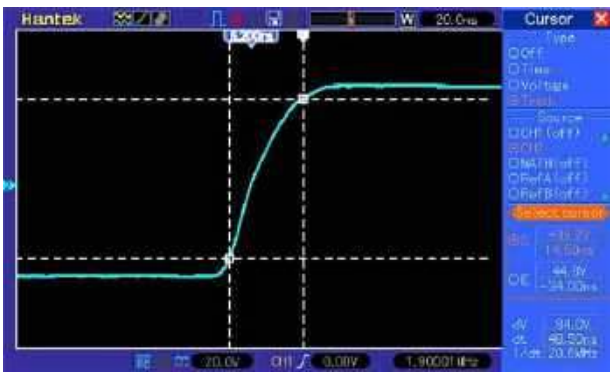
Jeśli przebieg prostokątny na wyjściu układu wykazuje wyraźne oscylacje tłumione, jak na poniższym oscylogramie, oznacza to, że w układzie występują pasożytnicze indukcyjności i istnieje ryzyko wzbudzenia się oscylacji.

Przypis redaktora: Oscylacje tłumione mogą wynikać z rezonansu z udziałem pasożytniczych indukcyjności i pojemności, ale ich obecność nie oznacza automatycznie, że badany układ jest niestabilny. Na obserwowany przebieg mogą również wpływać przewody pomiarowe, pojemność sondy oscyloskopowej i sposób podłączenia masy. Dlatego przed oceną stabilności układu należy wykluczyć wpływ toru pomiarowego.

W przypadku wzmacniaczy mocy małej częstotliwości może to w najgorszym razie doprowadzić do uszkodzenia tranzystorów końcowych.



Oscylacje tłumione na przebiegu impulsowym wskazują na ryzyko wzbudzenia się oscylacji w układzie. (© 2019 Jos Verstraten)



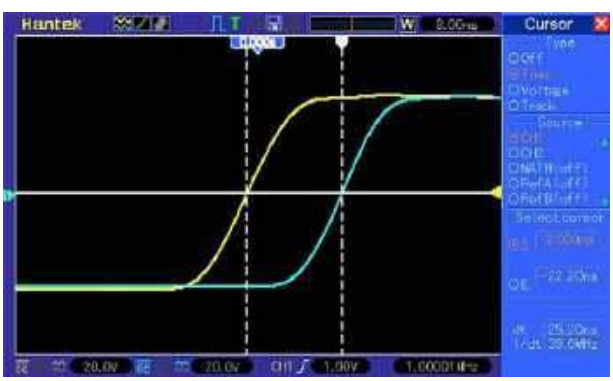
Pomiar czasu narastania sygnału w układzie za pomocą impulsu o stromym zboczu. (© 2019 Jos Verstraten)

Pomiary cyfrowe z wykorzystaniem impulsów
Pomiar czasu narastania za pomocą impulsu

Impuls o prawidłowym kształcie i stromym zboczu narastającym jest doskonałym sygnałem do pomiaru czasu narastania w układach analogowych i cyfrowych. W większości przypadków krótszy czas narastania jest korzystniejszy niż dłuższy. Podaj „idealny" impuls na wejście badanego układu, a jego wyjście podłącz do oscyloskopu. Większość współczesnych oscyloskopów umożliwia ustawienie kursorów poziomych i pionowych. Ustaw kursory poziome na poziomach 10% i 90% amplitudy sygnału. Linie te przecinają przebieg sygnału wyjściowego w dwóch punktach. Ustaw kursory pionowe w miejscach tych przecięć. Teraz możesz odczytać czas narastania sygnału w badanym układzie bezpośrednio z ekranu oscyloskopu.

Pomiar opóźnienia sygnału

Nic w przyrodzie nie zachodzi bez opóźnienia, z wyjątkiem być może niektórych, wciąż niezrozumiałych zjawisk kwantowych. Jeśli więc podamy impuls na wejście układu, upłynie pewien czas, zanim pojawi się on na jego wyjściu. Czas między podaniem impulsu na wejście a pojawieniem się odpowiedzi układu na wyjściu nazywamy czasem opóźnienia lub czasem propagacji. Na poniższym oscylogramie przedstawiono na przykład pomiar czasu opóźnienia między sygnałem wejściowym a wyjściowym dość rozbudowanego układu logicznego. Oba sygnały doprowadzono do dwóch kanałów oscyloskopu. Czułość i położenie przebiegów obu kanałów ustawiono tak, aby oba sygnały miały jednakową amplitudę, a ich poziomy odniesienia (masy) pokrywały się. Korzystając z funkcji kursorów oscyloskopu, można teraz ustawić dwa kursory pionowe w punktach przecięcia obu przebiegów z linią poziomą. Następnie można odczytać czas opóźnienia układu z ekranu oscyloskopu. ■



Pomiar opóźnienia sygnału w układzie przez porównanie impulsów wejściowego i wyjściowego. (© 2019 Jos Verstraten)

Jos Verstraten

eprasa.pl fb05997b40

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

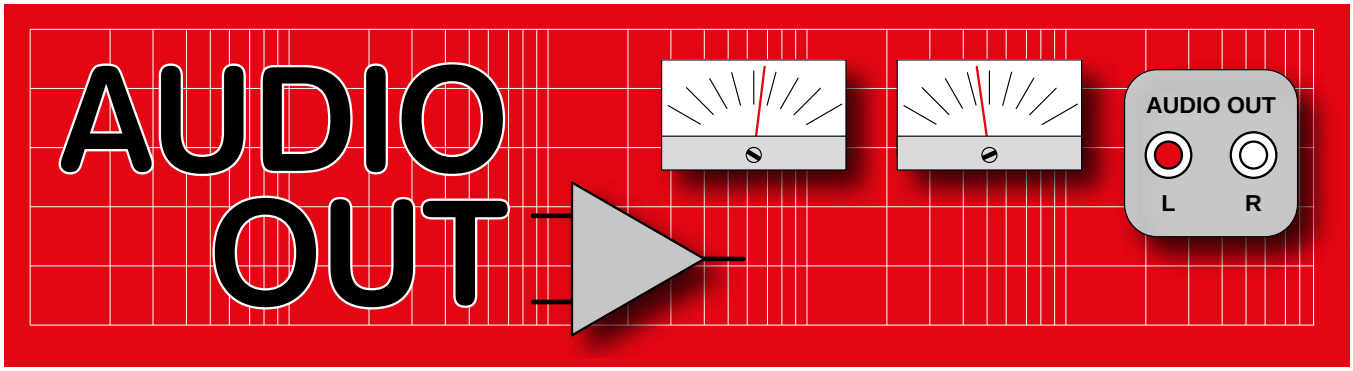


Retro PRL (bakelit)

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



eprasa.pl fb05997b40

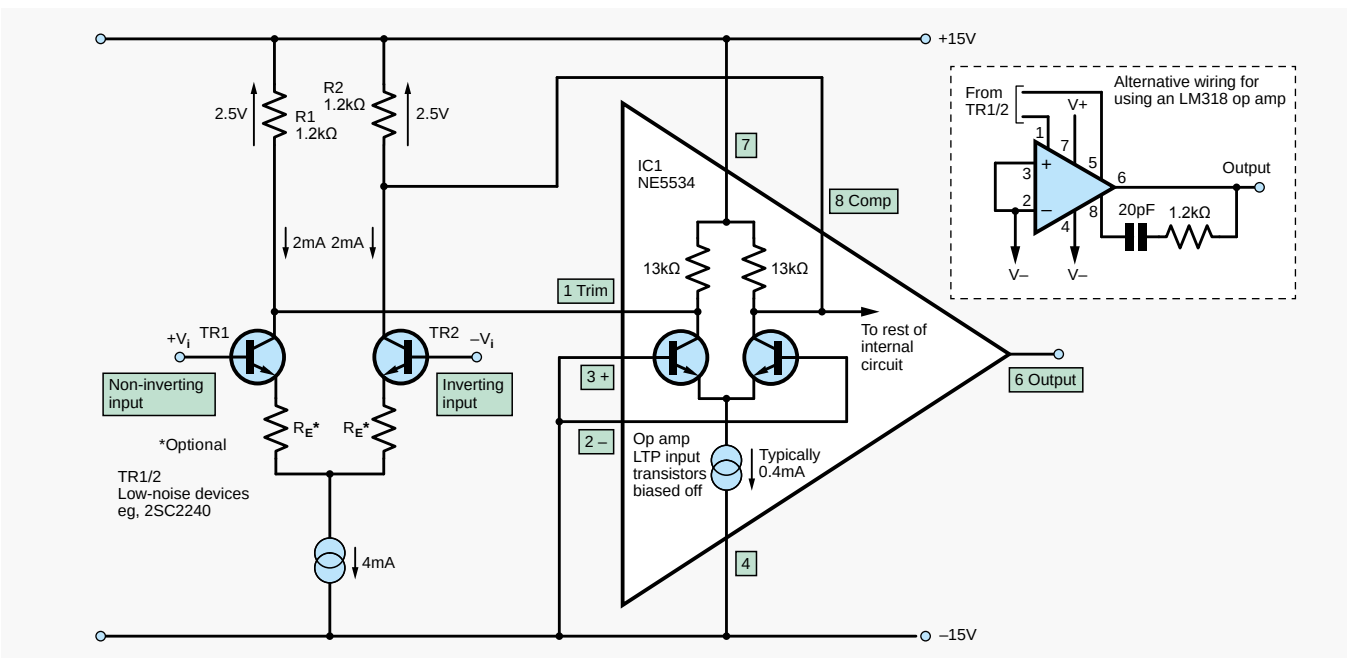


Dyskretny wzmacniacz operacyjny, część 1

Proste zasady ekonomii sprawiają, że zdecydowana większość współczesnych produktów elektronicznych zbudowana jest w oparciu o układy scalone. Rzadko spotyka się urządzenia oparte na pojedynczych tranzystorach, czyli tak zwane konstrukcje dyskretne. Większość analogowych układów przetwarzania sygnałów wykorzystuje scalone wzmacniacze operacyjne, które prawie zawsze mają lepsze parametry niż ich dyskretne odpowiedniki. Widać to zwłaszcza w przypadku precyzyjnych przyrządów pomiarowych, gdzie istotne znaczenie ma zgodność parametrów tranzystorów, łatwa do uzyskania w układach scalonych, oraz wynikające z niej niewielkie napięcie niezrównoważenia.

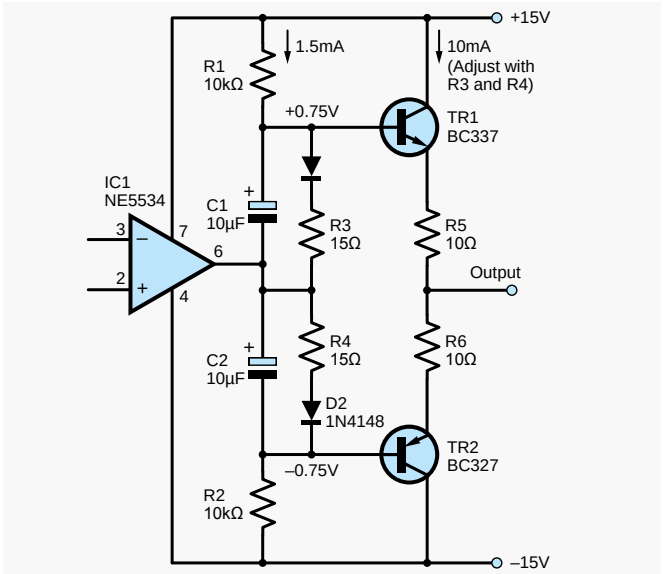
Priorytety w systemach akustycznych

Jednak w systemach akustycznych, w których poszczególne stopnie mogą być ze sobą sprzężone tylko dla prądu przemiennego, minimalizacja przesunięć dla prądu stałego ma mniejsze znaczenie. Ponadto nie jest wymagana bardzo wysoka częstotliwość graniczna układu. Nasuwa się więc uzasadnione pytanie: po co płacić za układy pracujące w paśmie do 300 MHz, skoro 100 kHz w zupełności wystarcza do celów akustycznych? W rzeczywistości znacznie ważniejszymi



Rysunek 1. Umieszczenie dyskretnych tranzystorów przed scalonym wzmacniaczem operacyjnym w celu uzyskania niższego poziomu szumów. Wewnętrzne tranzystory są wyłączone przez podłączenie wejść do ujemnej szyny zasilania. Dodatkowe tranzystory o niskim poziomie szumów są podłączone do następnego stopnia układu scalonego przez wyprowadzenia kompensacyjne. Zastosowanie LM318 (układ pokazany w ramce) z zewnętrznymi tranzystorami wejściowymi było na początku lat siedemdziesiątych jedynym sposobem na zbudowanie akustycznego wzmacniacza operacyjnego najwyższej jakości

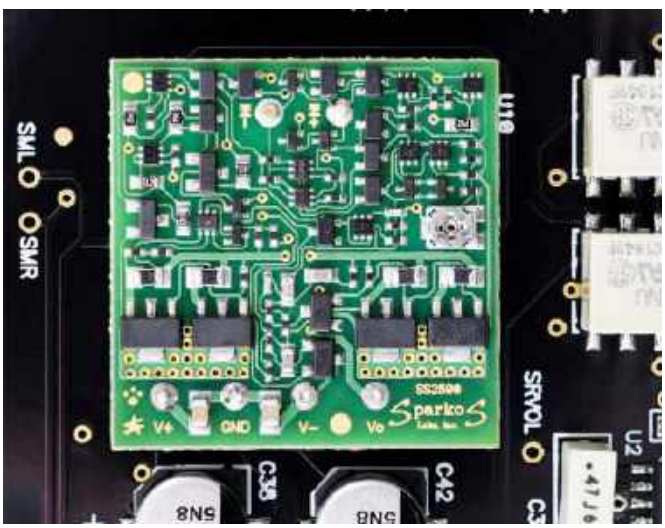
eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 2. Usprawnienie wyjścia scalonego wzmacniacza operacyjnego za pomocą zewnętrznych wtórników emiterowych. Jest to skuteczny sposób na zwiększenie obciążalności wczesnych wzmacniaczy operacyjnych, takich jak TL071, które działają prawidłowo tylko przy obciążeniach o rezystancji powyżej 2 kΩ



Rysunek 3. Prosty dyskretny wzmacniacz operacyjny do celów edukacyjnych, pochodzący z serwisu mitchelectronics.co.uk. Nie jest to układ Hi-Fi, ale doskonale nadaje się na początek



Rysunek 4. Sparkos Labs – czy to najlepszy dyskretny wzmacniacz operacyjny?

kryteriami są rezerwa mocy wyjściowej, małe zniekształcenia i niski poziom szumów. Ze względu na krótkie serie produkcyjne sprzętu akustycznego najwyższej jakości oraz wysoką cenę profesjonalnych scalonych wzmacniaczy operacyjnych warto przekonać się, czy układy zbudowane z elementów dyskretnych nie mają jakichś zalet.

Na początek przypomnijmy, że wzmacniacze operacyjne z serii OP i AD firmy Texas Instruments kosztują zazwyczaj od 2,50 do 10 funtów za sztukę, a inne specjalistyczne układy są trudne do zdobycia lub stają się przestarzałe zaraz po zakończeniu projektu! Stali czytelnicy mojego cyklu wiedzą, że istnieje jeden niedrogi, dostępny u wielu dostawców wyjątek wśród drogich, trudno dostępnych wzmacniaczy operacyjnych przystosowanych do pracy w układach akustycznych. Jest to scalony wzmacniacz operacyjny typu NE5534 lub NE5532, który zazwyczaj kosztuje poniżej jednego funta. Aby projekt dyskretnego wzmacniacza operacyjnego był wart rozważenia, musi być lepszy niż te układy i właśnie tego spróbujemy dokonać.

Projektowanie hybrydowe

Często stosuję podejście hybrydowe, czyli umieszczam dyskretne tranzystory przed scalonym wzmacniaczem operacyjnym w celu zmniejszenia szumów (**rysunek 1**) lub dodaję tranzystory do jego wyjścia w celu uzyskania większej obciążalności (**rysunek 2**). Chociaż jest to przydatna technika, pomyślałem, by pójść na całość i stworzyć układ czysto dyskretny, aby porównać go z jego scalonymi odpowiednikami.

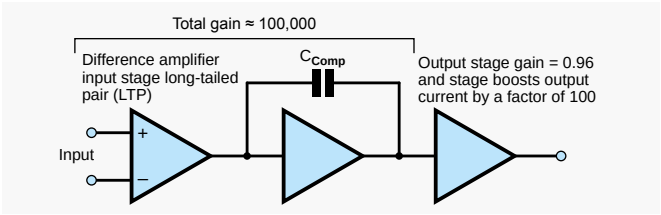
Głównym problemem w podejściu hybrydowym jest ograniczenie maksymalnej wartości napięcia zasilania wzmacniacza operacyjnego, zazwyczaj do ±18 V. W rzeczywistości w przypadku niektórych nowych wzmacniaczy operacyjnych napięcie robocze jest jeszcze niższe, na przykład w LM4562 wynosi ±17 V. Wynika to z procesów technologicznych, w których zmniejszane są rozmiary struktur na matrycy, a wraz z nimi maleje maksymalne napięcie zasilania. Dyskretne bipolarne tranzystory sygnałowe, takie jak BC556, kosztują grosze, a ich maksymalne napięcie pracy wynosi 65 V. Umożliwia to stworzenie taniego dyskretnego wzmacniacza operacyjnego zasilanego napięciem od ±24 V do ±30 V. To prawda, że rachunek ekonomiczny nie uwzględnia kosztów pracy, ale dla hobbystów nie ma to większego znaczenia – to przecież praca dla przyjemności!

To nieco zaskakujące, jednak dzięki zautomatyzowanym technikom montażu powierzchniowego konstrukcja dyskretna może przynieść oszczędności w porównaniu z produkcją układów scalonych



Rysunek 5. Magazyn Elektor nie zajmuje się już techniką audio, lecz obecnie koncentruje się na projektach Arduino. Opisany dawno temu układ Prelude był doskonałym dyskretnym wzmacniaczem operacyjnym. Mój działał ponad 30 lat

eprasa.pl fb05997b40



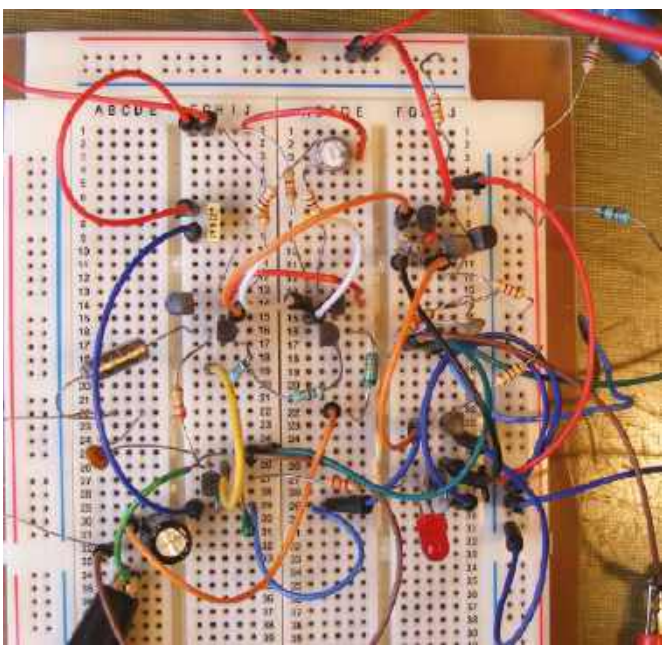
Rysunek 6. Podstawowa struktura wzmacniacza operacyjnego z dwoma stopniami wzmocnienia, zawierająca wzmacniacz różnicowy, główny wzmacniacz napięciowy i stopień wyjściowy. Zwróć uwagę na kondensator kompensacyjny, który powoduje spadek wzmocnienia przy wysokich częstotliwościach. Jego wpływ musi być dominujący, ponieważ spadek wzmocnienia powodowany przez tranzystory nie jest ściśle określony

z wyższej półki. Inne zalety to możliwość zastosowania niskoszumnych tranzystorów PNP o wysokim wzmocnieniu, metalizowanych rezystorów cienkowarstwowych i kondensatorów dobrej jakości. Nie bez znaczenia jest łatwość modyfikacji i rozbudowy układu. Te dwa ostatnie czynniki są szczególnie istotne dla hobbystów. Konstrukcja dyskretna oferuje nieograniczone możliwości majsterkowania, eksperymentowania i ulepszania podstawowego projektu.

Problemy związane z układami dyskretnymi

Mimo tych zalet większość zrealizowanych przeze mnie projektów wzmacniaczy operacyjnych z elementami dyskretnymi wypadła gorzej niż standardowe układy scalone. Robiłem to głównie w celach edukacyjnych. Przykładem może być zestaw przedstawiony na rysunku 3. Rzeczywistym dowodem wysokiej jakości wzmacniacza NE5534 jest to, że bardzo trudno było mi stworzyć układ z elementami dyskretnymi, który byłby równie dobry. Przedstawiony tutaj projekt odznacza się podobnym poziomem zniekształceń (tyle że bez wzrostu powyżej 10 kHz), o połowę mniejszym poziomem szumów, dwukrotnie większą obciążalnością i zakresem napięcia wyjściowego ±25 V.

W sklepach internetowych dostępnych jest wiele zestawów do budowy dyskretnych wzmacniaczy operacyjnych, głównie opartych na cenionym amerykańskim modelu Jensen 990. Chociaż są one niemal doskonałe, są również drogie. Pomijając cenę, ich zaletą jest to, że można je ulepszać, czego przykładem jest modernizacja układu SGA-SOA-1 autorstwa Samuela Gronera. Bardzo popularne są również moduły API 2520 firmy Automated Processes, a ja przebadałem wiele zestawów Gar2520 firmy Classic Audio Products.



Rysunek 7. Gęsto upakowana płytka prototypowa – 12 tranzystorów to dla mnie umowna granica, po przekroczeniu której niestabilne połączenia stają się problemem

Rozkład wyprowadzeń w modelach API wydaje się być standardem dla dyskretnych wzmacniaczy operacyjnych. Na **rysunku 4** przedstawiono produkt firmy Sparkos Labs, wykonany w technologii SMT. Model SS2590 powinien mieć najwyższe parametry spośród wszystkich wzmacniaczy, jakie kiedykolwiek wyprodukowano, skoro zawiera aż 40 tranzystorów! Próbowałem przetestować te układy, jednak natrafiłem na trudności. Dystrybutor nie mógł dostarczyć pojedynczych egzemplarzy, nawet przy cenie 90 dolarów za sztukę!

Wzmacniacz Elektor Prelude z 1983 roku, pokazany na **rysunku 5**, oraz układ Codda opublikowany w magazynie „Wireless World" w październiku 1979 roku są doskonałymi wzmacniaczami operacyjnymi w wersji dyskretnej. Podejrzewam, że projekty te stanowiły podstawę do budowy wszechobecnego wzmacniacza mocy Blameless Douglasa Selfa. Warto przeczytać szczegółową analizę tej topologii autorstwa Selfa, zamieszczoną w jego artykułach na temat projektowania wzmacniaczy mocy, opublikowanych w magazynie „Wireless World" w 1996 roku. Ten układ z dwoma stopniami wzmocnienia (**rysunek 6**) stał się podstawą kilku projektów z magazynów PE/EPE/Silicon Chip, takich jak wzmacniacz słuchawkowy Hifi Stereo z magazynu PE z października 2014 roku. Warto zaznaczyć, że tego rodzaju wzmacniacz mocy jest w istocie wzmacniaczem operacyjnym i dlatego stanowił podstawę mojego projektu. Większość specjalistycznych wzmacniaczy akustycznych wykorzystuje topologię trzystopniową, której realizacja z elementów dyskretnych jest dość skomplikowana, chociaż zastosowano ją w API 2520. Dla porównania w układzie NE5534 wykorzystano tylko 29 tranzystorów.

Nie tak dyskretne

Głównym praktycznym problemem związanym z dyskretną konstrukcją wzmacniacza operacyjnego jest duża liczba elementów składowych. Zazwyczaj trzeba zastosować kilkanaście tranzystorów, aby uzyskać przyzwoite efekty. Pokazano to we wstępnym projekcie przedstawionym na **rysunku 7**. Liczne połączenia i złożoność układu wpływają na pogorszenie niezawodności i przypuszczam, że średni czas między awariami dyskretnego wzmacniacza operacyjnego jest ponad dziesięciokrotnie krótszy niż w przypadku równoważnej wersji scalonej. Dlatego nie polecałbym stosowania dyskretnego wzmacniacza operacyjnego w żadnym układzie krytycznym, takim jak awionika samolotu. Jednak w innych zastosowaniach, na przykład w studiu nagraniowym, są one z pewnością opłacalne, pod warunkiem że wykorzystują standardowe, powszechnie dostępne elementy. Co ciekawe, pierwszy brytyjski półprzewodnikowy wzmacniacz Hi-Fi autorstwa Toby'ego Dinsdale'a (1964) początkowo stanowił fragment serwomechanizmu awionicznego.

Kolejnym problemem związanym z konstrukcją dyskretną jest to, że parametry dostępnych tranzystorów nie uległy znacznej poprawie w ciągu ostatnich 30 lat, co oznacza, że nadal stosuje się stare, sprawdzone modele Mullard/Philips, takie jak BC549 i BD139 z lat siedemdziesiątych. Po tym, jak Europa zrezygnowała z dalszego rozwoju tranzystorów, japońskie firmy, w szczególności Toshiba i Sanyo, kontynuowały ulepszanie swoich tranzystorów bipolarnych do montażu przewlekanego. Trwało to aż do końca lat dziewięćdziesiątych. Ich nowe elementy z serii 2SA/B/C, opracowane dla japońskiego przemysłu produkującego wzmacniacze Hi-Fi, stały się bardzo poszukiwane. Niestety, ten postęp również się zatrzymał, a dalsze udoskonalenia procesów technologicznych ukierunkowano na produkcję układów scalonych, co zapewniło im dodatkową przewagę.

eprasa.pl fb05997b40

Najlepsze wersje tranzystorów zaprojektowanych w Japonii są nadal produkowane w Korei przez firmę Unisonic Technologies Co. z prefiksem „KT" zamiast „2S". Niektóre z nich można nadal nabyć w firmach Profusion Plc i Tayda, ale są one stopniowo wycofywane z oferty. Doprowadziło to do typowej dla serwisu eBay sytuacji, w której nabywcy muszą zmagać się z wygórowanymi cenami i podrobionymi elementami firmy Toshiba.

W Wielkiej Brytanii przez pewien czas trwały prace nad układami dyskretnymi zbudowanymi na bazie tranzystorów Ferranti „Zetex", czyli ZTX, które cieszyły się popularnością wśród audiofilów. Obecnie są one produkowane przez firmę Diodes Incorporated.

Ogólny zastój w rozwoju tranzystorów małosygnałowych skłonił Johna Little'a z firmy Little Labs do zastosowania scalonych układów wyjściowych SMD w swoim wzmacniaczu słuchawkowym Monotor (**rysunek 8**). Niestety, nie mogę się dowiedzieć, jakie układy zostały użyte. Jest to dla mnie frustrujące!

Jak wynika ze wstępu, kwestia przewagi układów dyskretnych nad scalonymi jest złożona. Jednak w przypadku konstrukcji domowych jestem głęboko przekonany, że dobrze zaprojektowany układ oparty na dyskretnych wzmacniaczach operacyjnych nadal stanowi najlepszą opcję dla najwyższej jakości wzmacniaczy słuchawkowych, a także przedwzmacniaczy gramofonowych lub mikrofonowych klasy Hi-Fi.

Wzmacniacz operacyjny 101

Zbudowanie dyskretnego wzmacniacza operacyjnego to świetny sposób, aby poznać działanie wszystkich wzmacniaczy operacyjnych i zobaczyć, co naprawdę dzieje się wewnątrz układu. Przyjrzyjmy się jego wewnętrznym stopniom i zapoznajmy się z ich działaniem oraz możliwościami optymalizacji.

Jeśli chodzi o wyjaśnienie zasady działania wzmacniacza operacyjnego z ujemnym sprzężeniem zwrotnym, zawsze mówię: „napięcie wyjściowe samoczynnie ustala się na takim poziomie, aby różnica napięć między wejściami była zerowa". Elementy w torze sprzężenia zwrotnego, łączące wyjście z wejściem odwracającym wzmacniacza, określają sposób działania układu. Na przykład, jeśli tłumienie w torze sprzężenia zwrotnego ma wartość 10, wówczas zmiany napięcia wyjściowego muszą być 10 razy większe, aby utrzymać ten sam poziom napięcia na obu wejściach. W ten sposób stworzyliśmy wzmacniacz o wzmocnieniu 10. Aby taki układ działał w przewidywalny sposób, musimy określić właściwości idealnego wzmacniacza operacyjnego. Wzmocnienie w otwartej pętli powinno być nieskończenie duże, wejścia nie powinny pobierać prądu, a wyjście powinno mieć zerową rezystancję wewnętrzną.

Omówię teraz działanie poszczególnych stopni typowego wzmacniacza operacyjnego.

Wzmacniacz różnicowy

Podstawową cechą wzmacniacza operacyjnego jest obecność symetrycznego wejścia różnicowego. Oznacza to, że w praktyce ma on dwa wejścia – nieodwracające i odwracające. Wzmocnieniu podlega napięcie występujące między tymi wejściami, czyli różnica napięć między nimi. Wejście różnicowe pozwala przystosować układ do wykonywania różnych operacji, na przykład mnożenia (wzmacniania), sumowania (miksowania), odejmowania (równoważenia wejść) oraz wielu innych funkcji analogowych lub operacji matematycznych.

Budowa wzmacniacza różnicowego opiera się na słynnej konfiguracji long-tailed pair (LTP), opatentowanej w 1936 roku przez Blumleina. Pierwotnie stosował on lampy elektronowe, obecnie najczęściej stosuje się pary tranzystorów bipolarnych NPN lub tranzystorów polowych z kanałem N, jak pokazano na **rysunku 9**.



Rysunek 8. Wzmacniacz słuchawkowy Little Labs Monotor – wspaniała konstrukcja, ale nie mogę go naprawić ze względu na układy wyjściowe SMD dostępne tylko u jednego dostawcy

Aby zminimalizować przesunięcie dla prądu stałego i inne zniekształcenia, oba elementy wzmacniacza różnicowego muszą być dobrze dopasowane pod względem transkonduktancji, rozumianej jako stosunek przyrostu prądu kolektora do przyrostu napięcia baza–emiter, wyrażanej w mA/V. Współczynnik wzmocnienia prądowego H_{fe} ma mniejsze znaczenie, chyba że stosuje się źródła sygnału o dużej impedancji. Tranzystory można sparować ręcznie za pomocą multimetru lub analizatora, takiego jak przyrządy produkowane przez firmę Peak Electronic Design.

Najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie podwójnego tranzystora, takiego jak popularny, ale drogi SSM2210, co nie pasuje do naszego taniego projektu. W 2001 roku firma Toshiba wprowadziła na rynek kilka podwójnych tranzystorów do montażu powierzchniowego, takich jak HN1C01FY o napięciu pracy 50 V. Na płytce drukowanej przewidzieliśmy miejsca na takie elementy. Są one dostępne w firmie Mouser za około 30 pensów.

Warto wspomnieć o jednym szczególe historycznym: w latach siedemdziesiątych we wzmacniaczach różnicowych preferowano tranzystory PNP zamiast NPN, ponieważ miały one mniejszą rezystancję rozproszoną bazy Rbb', co skutkowało niższym poziomem szumów. Obecnie różnica ta jest znacznie mniejsza, więc w naszym projekcie użyjemy tranzystorów NPN. Należy pamiętać, że wybór elementów jest znacznie większy niż kiedyś.

Wejścia z tranzystorami JFET

Często w stopniach wejściowych scalonych wzmacniaczy operacyjnych stosuje się tranzystory JFET zamiast tranzystorów bipolarnych. Pozwala to uzyskać dużą impedancję wejściową, stanowiącą jedno z kluczowych założeń idealnego wzmacniacza operacyjnego. W zastosowaniach akustycznych niezerowe prądy polaryzacji baz tranzystorów bipolarnych zmuszają do stosowania kondensatorów oddzielających potencjometry od układu, aby zapobiec szumom podczas ich obracania. Lepsze pod tym względem tranzystory JFET mają około 40 razy mniejszą transkonduktancję niż tranzystory bipolarne, co oznacza znaczne zwiększenie zniekształceń sygnału.

Produkowane są specjalne tranzystory JFET do zastosowań akustycznych, takie jak 2SK170 i 2SJ74, które mają dużą transkonduktancję, jednak elementy te są drogie. Istnieją również podobne elementy SMD firmy Toshiba, takie jak 2SK2145. W ich przypadku oba źródła tranzystorów polowych są ze sobą połączone i wyprowadzone na tej samej końcówce, co nie stanowi ograniczenia w naszym projekcie. Na marginesie warto zauważyć, że trudno jest jednocześnie wytwarzać tranzystory FET i tranzystory bipolarne w tej samej strukturze scalonej, co sprawia, że niskoszumowe wzmacniacze operacyjne z wejściami FET są drogie. W przypadku dyskretnych wzmacniaczy operacyjnych można zastosować oba rodzaje tranzystorów.

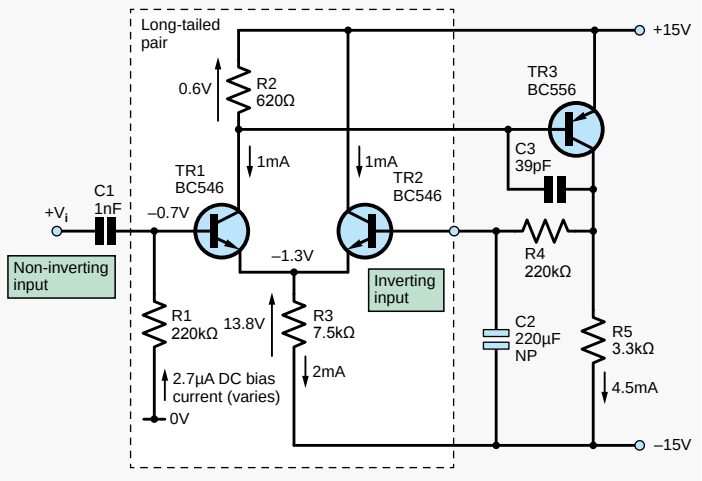
eprasa.pl fb05997b40

Źródła i obciążenia prądowe

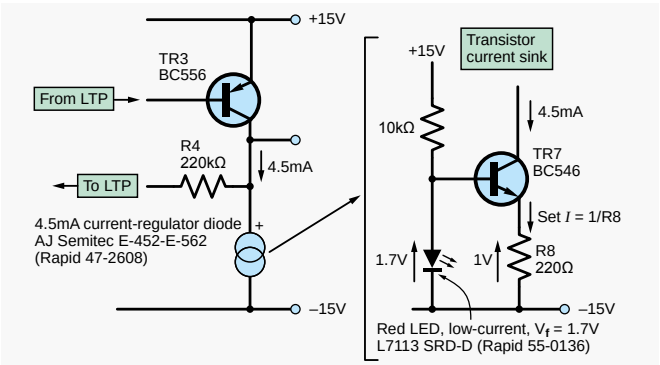
W przypadku zastosowań akustycznych, aby uzyskać niski poziom szumów przy małej impedancji źródła sygnału, natężenie prądu przepływającego przez tranzystory wejściowe musi być większe niż 1 mA. Istnieją jednak źródła sygnału o nieco większej impedancji, takie jak wkładki gramofonowe z ruchomym magnesem, które mogą wymagać mniejszych prądów. Oznacza to, że rezystory kolektorowe (R3 i R5, rysunek 9) muszą mieć małą rezystancję, co skutkuje zmniejszeniem wzmocnienia. Zastąpienie rezystorów źródłami prądowymi pozwala utrzymać wymagane natężenie prądu przy zachowaniu dużej impedancji dynamicznej, co znacznie zwiększa wzmocnienie układu.

Zastosowanie źródeł prądowych ma dodatkową zaletę w postaci zwiększonego współczynnika tłumienia zakłóceń pochodzących z zasilania, gdyż natężenie prądu nie zmienia się przy zmianach napięcia zasilania. Diody regulujące prąd są najprostszym sposobem na osiągnięcie tego celu, ponieważ nie wymagają polaryzacji. Ułatwiają eksperymentowanie, gdyż mogą być montowane w miejsce rezystorów o tych samych rozmiarach. Jednak ze względu na to, że diody prądowe zawierają starannie dobierane tranzystory JFET, są niestety dość drogie. Znacznie tańsze jest zastosowanie zwykłego tranzystora. Zauważyłem, że zastąpienie rezystora emiterowego R3, widocznego na rysunku 9, źródłem prądowym zwiększyło wzmocnienie do zaledwie 3500, jednak sprawiło, że natężenie prądu stało się niezależne od napięcia zasilania. W przypadku użycia zwykłego rezystora natężenie prądu jest proporcjonalne do napięcia zasilania, co jest niepożądanym zjawiskiem.

Szum pochodzący ze źródła prądowego, choć większy niż w przypadku zwykłego rezystora, nie stanowi problemu, ponieważ w równym stopniu oddziałuje na oba tranzystory wejściowe, a tym samym jest znoszony na wyjściu. Jedną z zalet dyskretnego wzmacniacza operacyjnego jest to, że napięcia polaryzacji źródeł prądowych są łatwo dostępne i można je odfiltrować za pomocą dowolnie dużych kondensatorów.



Rysunek 9. Układ Blumleina z rezystorem emiterowym (umieszczony w ramce) został zaprojektowany w celu wyeliminowania transformatorów i uzyskania znacznie szerszego pasma przenoszenia. Jako elementy wejściowe można w nim zastosować tranzystory bipolarne, tranzystory polowe (FET) lub triody (ECC88 działa dobrze przy napięciu 90 V). Na rysunku przedstawiono najprostszy układ wzmacniacza operacyjnego, jaki można wykonać. Jego wzmocnienie w otwartej pętli wynosi 3000. Rezystor sprzężenia zwrotnego (R4) jest całkowicie odsprzężony przez kondensator C2, dzięki czemu można zmierzyć wzmocnienie w otwartej pętli



Rysunek 10. Dodanie obciążenia prądowego do stopnia wzmacniacza napięciowego TR3 zwiększa wzmocnienie do 12 500. Zwróć uwagę na z pozoru odwrotne podłączenie tranzystora PNP. Dla porównania wymieniłem rezystor na diodę prądową, a następnie zastąpiłem ją odpowiednio spolaryzowanym tranzystorem TR7

Stopień wzmocnienia napięciowego

Zasadniczą część wzmocnienia napięciowego w naszym projekcie zapewnia kolejny tranzystor, pracujący w układzie wspólnego emitera, jak pokazano na rysunku 10. Termin „stopień wzmocnienia napięciowego", ukuty przez Douglasa Selfa, jest mylący, ponieważ stopień ten ma wejście prądowe. Podobnie jak poprzednio, obciążenie w postaci źródła prądowego może zapewnić tutaj większe wzmocnienie i lepszą stabilność dla prądu stałego. W układzie przedstawionym na rysunku 9 zastąpienie rezystora kolektorowego R5 diodą prądową o znamionowym natężeniu 4,5 mA zwiększyło wzmocnienie z 3500 do 12 500.

Czasami w celu uzyskania większej amplitudy napięcia wyjściowego stosuje się kondensator bootstrapowy. Źródło prądowe zazwyczaj wymaga spadku napięcia o wartości około 1,5 V, dlatego warto zastosować układ typu bootstrap w układach z niskim napięciem zasilania.

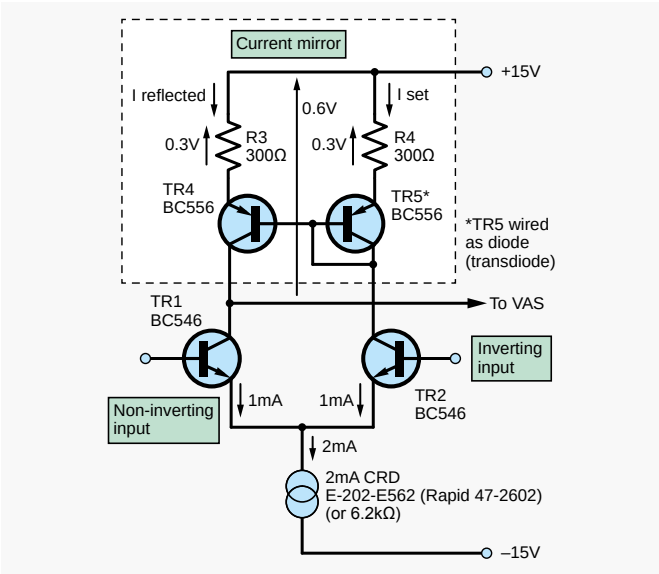
Impedancja obciążenia stopnia napięciowego powinna być możliwie duża. Jeśli jednak jest zbyt mała, wzmocnienie w otwartej pętli spada, a zaleta, jaką daje źródło prądowe, zostaje utracona, co sprowadza nas z powrotem do sytuacji, w której używamy zwykłego rezystora. Problem ten dotyczy także układów z lustrem prądowym. Można go zmniejszyć, stosując tranzystor TR3 o dużym współczynniku H_{fe} (>450). Niestety, do realizacji naszych celów potrzebujemy tranzystorów o napięciu V_{ce} przekraczającym 50 V, a większość standardowych tranzystorów o dużym współczynniku wzmocnienia, takich jak BC559C, ma napięcie V_{ce} na poziomie 30 V.

Wszystko opiera się na lustrach prądowych

Układ lustra prądowego składający się z tranzystorów TR4 i TR5 może być użyty do zrównoważenia wartości prądów przepływających przez tranzystory w stopniu różnicowym, eliminując potrzebę ścisłego parowania TR1 i TR2, patrz **rysunek 11**. Układ lustra prądowego stanowi obciążenie o dużej impedancji, przez co wzmocnienie rośnie dziesięciokrotnie w porównaniu ze stopniem z obciążeniem rezystancyjnym. W układzie przedstawionym na rysunku 9 przy częstotliwości 1 kHz osiągnięto wzmocnienie około 150 000, typowe dla wzmacniaczy operacyjnych, w których wzmocnienie w otwartej pętli wynosi około 100 dB. Wzmocnienie spada wraz ze wzrostem częstotliwości z powodu efektu Millera, polegającego na zwielokrotnieniu wpływu pojemności baza–kolektor tranzystora.

Niestety układ lustra prądowego także wykazuje pewną asymetrię, którą można zmniejszyć, stosując rezystory emiterowe R3 i R4 widoczne na **rysunku 13**. Spadki napięcia na tych rezystorach, wynoszące około 0,3 V, pozwalają wyrównać prądy w układzie lustrzanym. W ich miejsce można zastosować potencjometr służący do ustalania zerowej wartości napięcia stałego na wyjściu wzmacniacza. W przypadku stosowania dyskretnych tranzystorów TR1 i TR2

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 11. Lustro prądowe we wzmacniaczu różnicowym wyrównuje rozpływ prądów i zwiększa wzmocnienie do około 150 000 (bez rezystorów emiterowych)

oraz TR4 i TR5, wykazujących pewne niezrównoważenie, taka regulacja może być przydatna.

Kompensacja częstotliwościowa

Wszystkie układy pracujące z ujemnym sprzężeniem zwrotnym wymagają kompensacji, aby zapobiec oscylacjom o wysokiej częstotliwości. Ogranicza ona wzmocnienie w otwartej pętli do jedności przy częstotliwości, dla której przesunięcie fazowe wynosi 180°. Dzięki temu nie dochodzi do powstania dodatniego sprzężenia zwrotnego. Wspomniane przesunięcie fazowe powstaje głównie w tranzystorach wyjściowych, które mają niższe częstotliwości graniczne od reszty układu. Najprostszym sposobem rozwiązania tego problemu jest podłączenie kondensatora (C3) o pojemności od 22 pF do 100 pF między bazą a kolektorem tranzystora TR3. Spowoduje to kontrolowane ograniczenie maksymalnej częstotliwości pracy układu. Pojemność kondensatora powinna być odpowiednio dobrana w zależności od planowanego wzmocnienia w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego.

Trudno jest określić optymalną pojemność tego kondensatora. Zbyt duża wartość spowoduje, że zniekształcenia w zakresie wysokich częstotliwości będą większe niż to konieczne. Zbyt mała pojemność może spowodować oscylacje wzmacniacza. Jedną z zalet układów dyskretnych w porównaniu z układami scalonymi jest możliwość zoptymalizowania pojemności tego kondensatora w zależności od użytych tranzystorów i konstrukcji układu. W tym projekcie zastosowano pojemność 39 pF dla wzmocnienia równego 10 i 82 pF dla wzmocnienia jednostkowego. Innym sposobem jest użycie dwóch kondensatorów w celu uzyskania kompensacji drugiego rzędu. Nie jest to możliwe w przypadku układów scalonych, ponieważ drugi kondensator zajmowałby zbyt dużą powierzchnię w strukturze półprzewodnikowej.

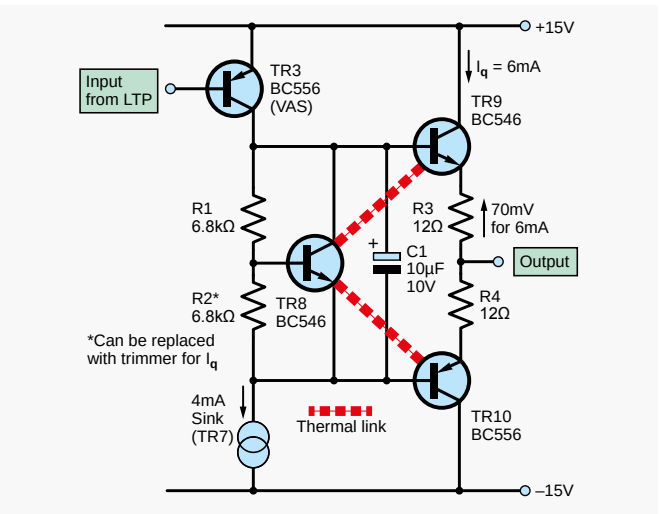
Baxandall uznał za przydatne zastosowanie dodatkowej gałęzi sprzężenia zwrotnego, połączonej z wyjściem wzmacniacza. Nazwał to „kompensacją Millera z uwzględnieniem wyjścia". Nie ma to większego znaczenia w przypadku wzmacniacza operacyjnego o małej mocy wyjściowej, gdyż wtedy tranzystory końcowe nie powodują dużego przesunięcia fazowego. Jednak przy większych mocach wyjściowych tranzystory końcowe mają gorsze parametry częstotliwościowe i dlatego dodatkowa gałąź sprzężenia zwrotnego zostanie uwzględniona na naszej płytce drukowanej jako jedna z opcji.

Rezystory emiterowe

Maksymalna amplituda sygnału wejściowego doprowadzanego do stopnia różnicowego zbudowanego z wykorzystaniem tranzystorów bipolarnych, niepowodująca zauważalnych zniekształceń typu soft clipping, wynosi około 50 mV_{pp}. Rzeczywisty sygnał występujący w układzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym ma amplitudę zaledwie kilku mV_{pp}. Sposobem na zwiększenie tej amplitudy jest zastosowanie rezystorów emiterowych (R1 i R2) w celu wprowadzenia lokalnego ujemnego sprzężenia zwrotnego. Dobrą analizę zniekształceń wytwarzanych przez tranzystory bipolarne przedstawił Cocking w magazynie „Wireless World" z maja 1972 roku. Rezystory emiterowe zmniejszają wzmocnienie stopnia różnicowego około dziesięciokrotnie, ale można to w pewnym stopniu skompensować przez zwiększenie natężenia prądu roboczego.

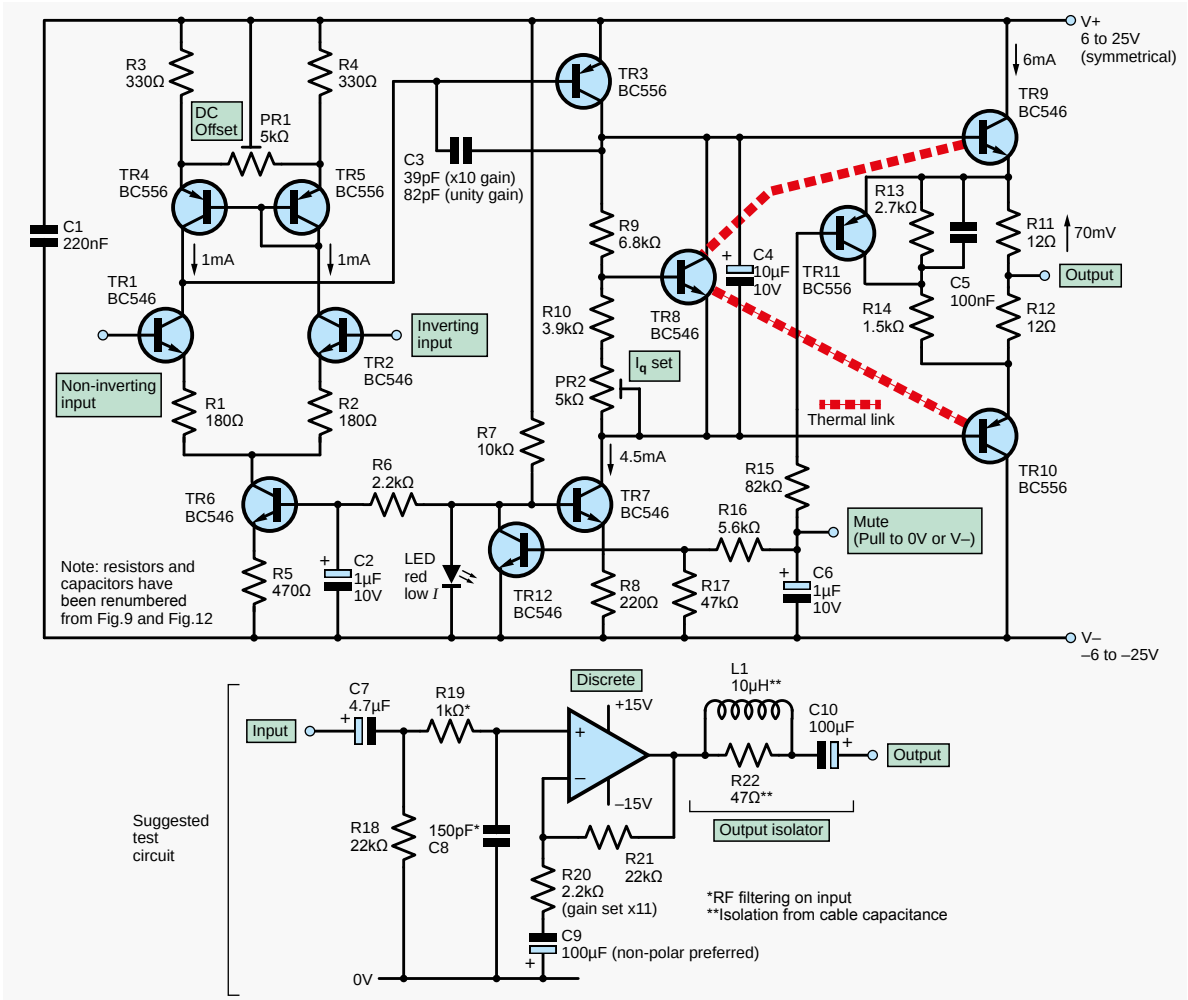
To zmniejszenie wzmocnienia jest przydatne w przypadku, gdy jako obciążenie obwodu kolektora stosuje się układ lustra prądowego, ponieważ zazwyczaj wzmocnienie jest zbyt duże. Dziesięciokrotne ograniczenie pozwala na zmniejszenie pojemności kondensatora kompensacyjnego. Powoduje to zwiększenie impedancji obciążenia obwodu kolektora przy wysokich częstotliwościach (>10 kHz) i ogranicza ryzyko przesterowania stopnia wejściowego. Związane z tym zniekształcenia są powodowane ograniczeniem szybkości narastania sygnału wyjściowego i stanowią problem, gdy wymagana jest duża amplituda napięcia wyjściowego przy wysokich częstotliwościach akustycznych. Takie zniekształcenia są łatwo zauważalne, gdyż sinusoidalny sygnał wyjściowy o częstotliwości 20 kHz przyjmuje kształt trójkątny.

Problem z rezystorami emiterowymi (R1 i R2) polega na tym, że generują one szumy Johnsona. Staje się to problemem tam, gdzie wymagane jest duże wzmocnienie przy małych impedancjach wejściowych, na przykład w przedwzmacniaczu mikrofonowym lub przedwzmacniaczu gramofonowym do wkładki z ruchomą cewką. Jednak w takich przypadkach sygnał wejściowy ma małą amplitudę, dlatego zniekształcenia są niewielkie i można pominąć rezystory emiterowe. W przypadku



Rysunek 12. Stopień wyjściowy z wtórnikami emiterowymi. W tym przypadku stosuje się stałą polaryzację baz i duże rezystory emiterowe R3 i R4. Często R2 jest trymerem umożliwiającym regulację natężenia prądu spoczynkowego. Układ może sterować obciążeniami o impedancji nie mniejszej niż 300 Ω. Jeśli obciążenie ma mieć niższą impedancję, na przykład 100 Ω, tranzystory wyjściowe trzeba wymienić na ZTX651/751 i wyposażyć w radiatory. Obciążenia o impedancji poniżej tej wartości, takie jak słuchawki 32 Ω, będą wymagały dodatkowych tranzystorów wyjściowych (patrz następny odcinek)

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 13. Układ jest już prawie gotowy – to pełny układ wzmacniacza operacyjnego. W stopniu różnicowym dodano rezystory emiterowe R1 i R2, co zmniejsza wzmocnienie i poprawia liniowość. Ułatwia to eliminowanie oscylacji o wysokiej częstotliwości. Dodano również trymer PR1 do zerowania przesunięcia dla prądu stałego i trymer PR2 do regulacji natężenia prądu spoczynkowego. Ostateczna wersja płytki drukowanej będzie miała kilka drobnych ulepszeń zwiększających jej wszechstronność. Zostaną również przewidziane elementy sprzężenia zwrotnego dla podstawowych konfiguracji nieodwracającej i odwracającej, jak pokazano w układzie testowym

stosowania tranzystorów JFET rezystory źródłowe nie są stosowane, ponieważ transkonduktancja tych elementów jest mała i należy wykorzystać całe dostępne wzmocnienie.

Modernizacją zmniejszającą poziom szumów różnicowego stopnia wejściowego (TR1, TR2, TR4 i TR5) jest zastosowanie tranzystorów 2SA970 i ich komplementarnych odpowiedników 2SC2240. Mają one maksymalne napięcie pracy równe 120 V i współczynnik szumów równy 0,5 dB.

Stopień wyjściowy

Stopień wyjściowy może być wzmacniaczem napięciowym lub prądowym. W większości wzmacniaczy operacyjnych jest to symetryczny układ wtórnikowy, pracujący w klasie AB, jak pokazano na rysunku 12. Przy małych obciążeniach, do 300 Ω, stopień napięciowy może z łatwością sterować tym układem. W przypadku większych mocy wyjściowych należy zastosować dodatkowe tranzystory w układzie Darlingtona, które można podłączyć do wyjścia wzmacniacza operacyjnego, a wewnętrzne tranzystory wyjściowe stają się w tym układzie tranzystorami sterującymi.

Stabilność termiczna

Stopień wyjściowy scalonego wzmacniacza operacyjnego ma z góry ustaloną wartość prądu spoczynkowego, wynoszącą zazwyczaj od 3 mA do 15 mA. Ma to na celu redukcję zniekształceń przejściowych związanych z pracą w klasie AB. W układach dyskretnych mamy możliwość zwiększenia tego prądu do 100 mA, aby zapewnić pracę w klasie A i zlikwidować wspomniane zniekształcenia. Jednak natężenie prądu spoczynkowego rośnie wraz ze wzrostem temperatury stopnia wyjściowego i prawdopodobna jest awaria spowodowana przegrzaniem tranzystorów, chyba że zastosuje się skuteczne radiatory i układ stabilizacji termicznej. Zazwyczaj jest nim tranzystor polaryzujący (TR8) z zestawem rezystorów powodujących zwielokrotnienie napięcia V_{be}. Tranzystor jest bocznikowany dla prądu przemiennego przez kondensator (C4) o dużej pojemności. Taka konfiguracja jest łatwa do zrealizowania w układach dyskretnych. W układach scalonych nagrzewa się cały układ. W konstrukcjach dyskretnych o dużej mocy, wykorzystujących oddzielny stopień wyjściowy, tylko tranzystory wyjściowe muszą być termicznie sprzężone z układem polaryzującym.

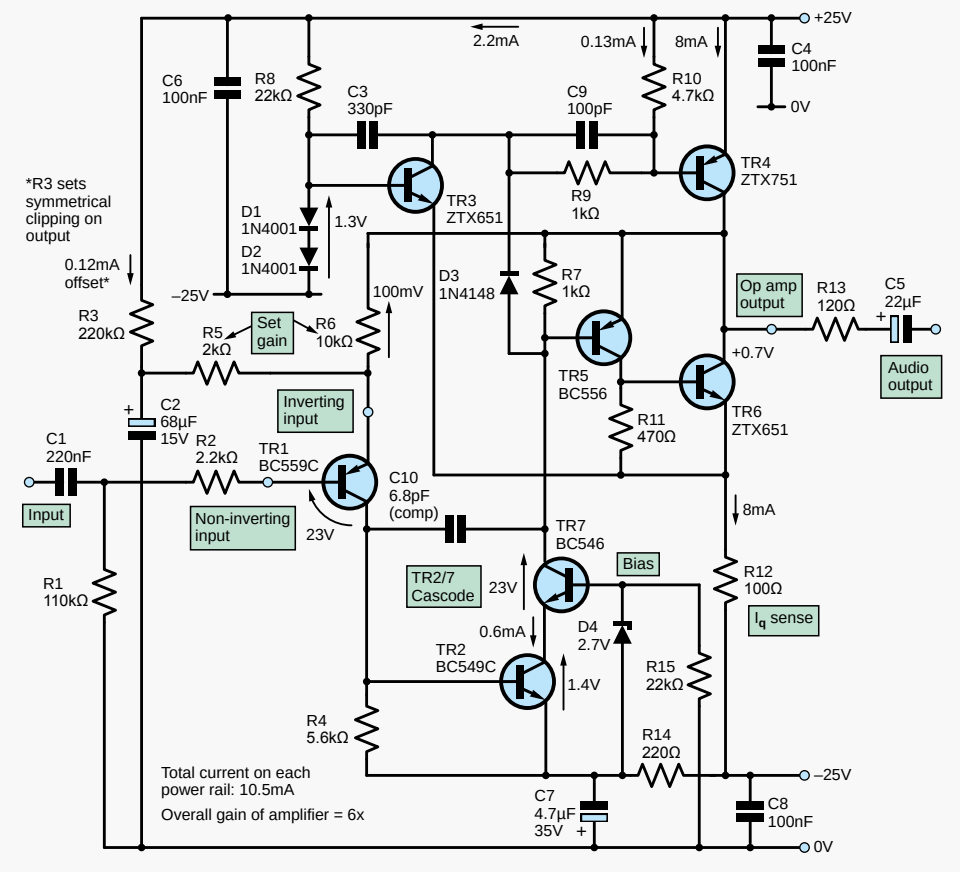
Mechanizmy zabezpieczające

Wszystkie stopnie końcowe wymagają zastosowania ogranicznika prądu chroniącego tranzystory przed skutkami zwarcia na wyjściu układu. Wystarczy jeden wadliwy przewód lub omsknięcie się sondy pomiarowej, aby zniszczyć wzmacniacz i tranzystory wyjściowe. W najprostszej postaci ogranicznikiem może być rezystor emiterowy o dużej rezystancji, rzędu kilkudziesięciu omów, lub szeregowy rezystor wyjściowy. Jednak powoduje to wzrost impedancji wyjściowej układu i zmniejsza maksymalną amplitudę sygnału. Lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie układów pomiaru prądu wykorzystujących spadek napięcia na rezystorach emiterowych lub układów zasilających z ograniczeniem prądu.

eprasa.pl fb05997b40

Cechą charakterystyczną proponowanego rozwiązania jest to, że zwarcie źródła napięcia odniesienia zbudowanego z wykorzystaniem diody LED powoduje wyłączenie całego układu. Pozwala to na wyprowadzenie końcówki umożliwiającej wyłączenie układu w celach ochronnych. Układ wyłącza się również w przypadku zaniku jednego z napięć zasilających, ponieważ dioda LED jest podłączona między obiema szynami zasilania. Dzięki takiemu rozwiązaniu opracowano dość prosty układ zabezpieczający, który umożliwia pracę z obciążeniem o rezystancji powyżej 300 Ω, a całkowicie wyłącza wzmacniacz przy obciążeniu o rezystancji poniżej 100 Ω.

Ostateczny układ dyskretnego wzmacniacza operacyjnego pokazano na rysunku 13. Wykorzystuje on niedrogie tranzystory typu BC546/56. Zaletą układów dyskretnych jest możliwość wymiany elementów, które uległy uszkodzeniu. W przypadku układu scalonego nie jest to możliwe. Jednak układ zbudowany z elementów dyskretnych łatwiej uszkodzić niż układ scalony. Dyskretne zabezpieczenia termiczne i nadprądowe nie obejmują całego układu, a jedynie jego fragmenty. Inaczej przedstawia się sprawa w przypadku układu scalonego, w którym kontrolowana jest temperatura całej struktury.



Rysunek 14. Wzmacniacz z jednym wejściem, oparty na projekcie opracowanym dla firmy Avondale Audio, w którym nie zastosowano wzmacniacza różnicowego. Kaskodowy stopień napięciowy pozwala obniżyć zniekształcenia przy wysokich częstotliwościach do 0,001%. Stopień wyjściowy w konfiguracji Taylora ma układ samoczynnej regulacji natężenia prądu spoczynkowego, patrz „Audio Out", sierpień 2016

Nietypowy wzmacniacz operacyjny

Na koniec przedstawiam układ pokazany na **rysunku 14**, ilustrujący niekonwencjonalne podejście do tematu. Tego układu nie będziemy realizować w praktyce. Celem prezentacji jest wykazanie, że akustyczne wzmacniacze operacyjne mogą odbiegać swoją budową od typowego rozwiązania pokazanego na rysunku 13. Możliwa jest realizacja stopnia wejściowego z użyciem pojedynczego tranzystora, co pozwala obniżyć koszty, jeśli w miejscu tranzystora TR1 ma być użyty drogi element, taki jak 2SJ74. Stopnie niesymetryczne charakteryzują się wyższym poziomem parzystych harmonicznych, ponieważ nie dochodzi do kompensacji dwóch nieliniowych charakterystyk przenoszenia, jak ma to miejsce we wzmacniaczu różnicowym. Występuje również niekorzystne przesunięcie dla prądu stałego, spowodowane napięciem V_{be} tranzystora oraz spadkiem napięcia na rezystorze sprzężenia zwrotnego, ponieważ musi przez niego przepływać cały prąd zasilający stopień wejściowy. Nie stanowi to problemu w układach z jednym źródłem zasilania i rezystorami sprzężenia zwrotnego o małej rezystancji. Istotną zaletą takiego układu jest zmniejszenie poziomu szumów o 3 dB w stosunku do pary różnicowej.

Układ kaskodowy

W tej nietypowej konstrukcji wzmacniacza operacyjnego zastosowano kaskodowy stopień napięciowy, jak pokazano na rysunku 14. Przez kaskodę rozumie się szeregowe połączenie dwóch tranzystorów, przy czym dolny z nich (TR2) pracuje w układzie ze wspólnym emiterem, a górny (TR7) w układzie ze wspólną bazą. W ten sposób z dwóch tanich elementów tworzony jest tranzystor zastępczy o bardzo dobrych parametrach. Taka topologia poprawia charakterystykę częstotliwościową układu dzięki ograniczeniu wpływu efektu Millera i zmniejsza zniekształcenia wynikające z efektu Early'ego. Pozwala to na zastosowanie dolnego tranzystora (TR2) o niskim napięciu roboczym i dużym współczynniku wzmocnienia oraz górnego tranzystora (TR7) o wysokim napięciu roboczym. Wymagane napięcie polaryzacji o wartości od 2,7 V do 4,7 V jest dostarczane przez diodę Zenera D4. Połączenie kaskodowe można także wykorzystać we wzmacniaczach różnicowych, co pozwala na zastosowanie niskonapięciowych tranzystorów FET jako elementów wejściowych. Rozwiązanie takie zastosowano w przedwzmacniaczu gramofonowym wzmacniacza Pioneer SX-1980, przy napięciu zasilania ±34 V. Układy kaskodowe mogą być użyte do dalszego udoskonalenia wzmacniacza przedstawionego na rysunku 13.

W kolejnym odcinku zbudujemy wzmacniacz operacyjny z elementów dyskretnych przeznaczonych do montażu przewlekanego, a także zapoznamy się ze szczegółowym opisem jego konstrukcji i wynikami testów. ■

Jake Rothman

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

eprasa.pl fb05997b40

Bezbateryjny wyświetlacz e-papierowy

Wraz z postępem technologicznym pojawiły się różne metody pozyskiwania energii, co zapoczątkowało nową erę czujników działających bez baterii. Przedstawiony tutaj bezbateryjny wyświetlacz z papieru elektronicznego jest jednym z takich projektów. (Papier elektroniczny, znany również jako e-papier, to technologia wyświetlania obrazu naśladująca wygląd zwykłego atramentu na papierze. Stosuje się w niej między innymi atrament elektroniczny (e-ink)).

E-papier to technologia, która dzisiaj nie jest już żadnym science fiction. Korzystamy z niej na co dzień. Autorski projekt bezbateryjnego wyświetlacza e-ink przedstawiono na **rysunku 1**.

Wielu z was mogło już widzieć lub używać bezbateryjnych wyświetlaczy e-ink (wyświetlaczy e-papierowych). Kilka firm sprzedaje je już od pewnego czasu, a ich przykłady można znaleźć tutaj:

1. https://www.waveshare.com/wiki/7.5inch_NFC-Powered_e-Paper
2. https://www.ynvisible.com/news-inspiration/ynvisible-e-paper-displays-nfc-energy-harvesting
3. https://www.good-display.com/product/423.html
4. https://lummico.com/product/smarttag-batteryless-2-90
5. https://www.usocard.com/case-detail/id-32.html
6. https://github.com/GDSID/Hipoink



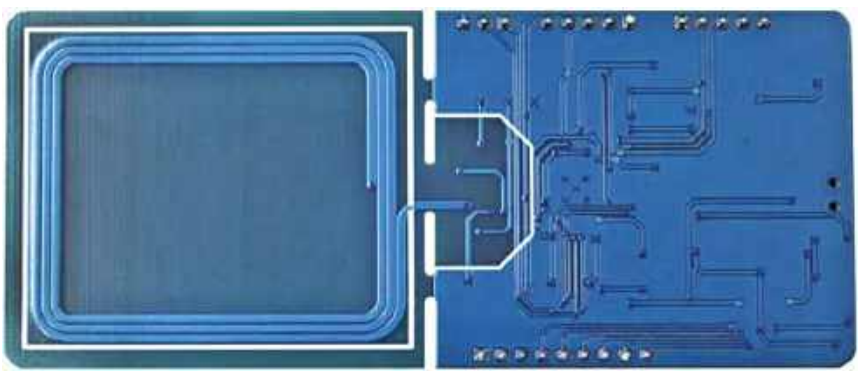
Rysunek 1. Prototyp bezbateryjnego wyświetlacza e-ink

Wyświetlacz e-ink

Wyświetlacze e-ink to wyjątkowy rodzaj wyświetlaczy, w których po aktualizacji ekranu wyświetlana zawartość pozostaje widoczna nawet po odłączeniu zasilania. Energia jest potrzebna tylko podczas aktualizacji, a jej ilość jest na tyle mała, że można ją łatwo pozyskać z fal radiowych, promieniowania słonecznego lub innych źródeł dostępnych w pobliżu.

W większości dostępnych obecnie na rynku wyświetlaczy bezbateryjnych stosowana jest komunikacja bliskiego zasięgu (NFC – *Near Field Communication*). Wyświetlacze te działają dzięki pozyskiwaniu energii z pola elektromagnetycznego NFC. Aby zaktualizować zawartość wyświetlacza, wystarczy użyć telefonu z NFC lub urządzenia do programowania wyświetlaczy NFC. Zaktualizowana zawartość ekranu pozostaje widoczna nawet wtedy, gdy wyświetlacz nie jest zasilany. Takie wyświetlacze są niezwykle przydatne w przypadku bezbateryjnych węzłów czujnikowych, urządzeń noszonych o niskim poborze mocy, metek cenowych w sklepach odzieżowych i na straganach oraz wyświetlaczy reklamowych. Mogą również służyć jako inteligentne wizytówki i karty identyfikacyjne, których zawartość można aktualizować w razie potrzeby.

Jak widać, takie wyświetlacze bezbateryjne mają wiele zastosowań. W artykule przedstawiono dwie wersje wyświetlaczy. Pierwsza pokazuje, w jaki sposób można zaprojektować

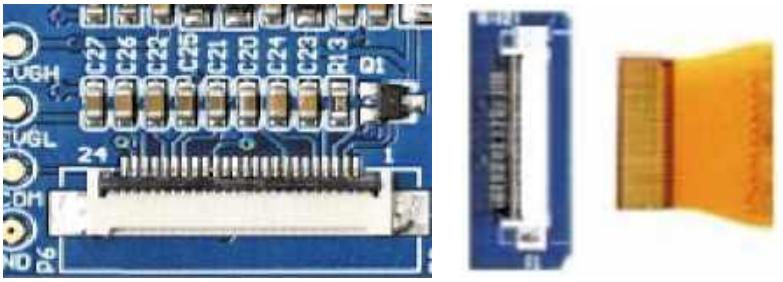


Rysunek 2. Moduł sterownika wyświetlacza pozyskujący energię z pola NFC

Tabela 1. Wykaz elementów bezbateryjnego wyświetlacza wykorzystującego NFC

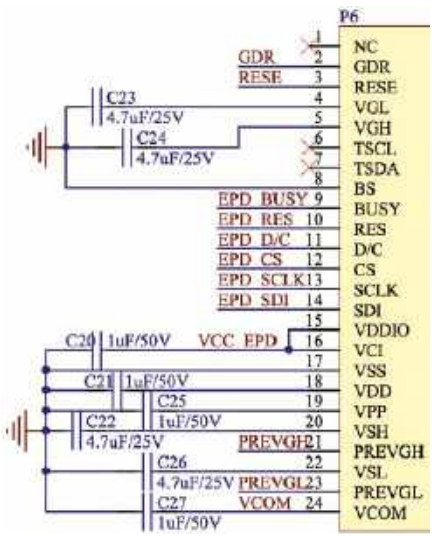
Element	Opis	Liczba
Moduł pozyskiwania energii DENFC-M0	Moduł SPI DENFC-M01	1
Wyświetlacz e-ink GDEY0213B74	1,5 s, częściowe odświeżanie, 4 poziomy szarości, sterownik SSD1680Z, rozdzielczość 250×122 piksele	1
Programator ST-Link	Moduł złącza	1

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 3. Złącze FPC i połączenie z wyświetlaczem

wyświetlacze bezbateryjne oparte na NFC. Druga wersja jest przeznaczona dla osób, które nie mają możliwości lutowania elementów SMD ani dostępu do odpowiednich procesów produkcyjnych. W tej wersji opisano wyświetlacz bezbateryjny oparty na Wi-Fi, w którym do zasilania podczas aktualizacji wyświetlacza zastosowano cewkę do bezprzewodowego przesyłania energii. W tym miejscu zostaną omówione tylko wyświetlacze bezbateryjne oparte na NFC i Wi-Fi.



Rysunek 4. Połączenie wyświetlacza EPD (źródło: https://v4.cecdn.yun300.cn/100001_1909185148/NFC-DEMO_SCH.pdf)

Wyświetlacz bezbateryjny oparty na NFC

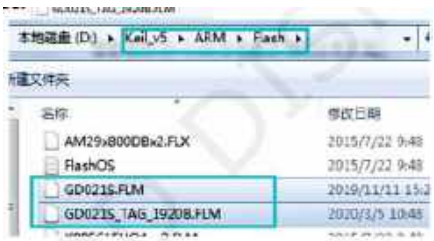
Jeśli ktoś chce tworzyć bezbateryjne wyświetlacze identyfikacyjne, wizytówki lub znaczniki bez konieczności montażu powierzchniowego (SMT), może wybrać modułowe podejście do projektowania. Można zakupić moduł sterownika wyświetlacza, który pozyskuje energię z pola elektromagnetycznego NFC i jest kompatybilny z wyświetlaczami e-ink. Aby uruchomić wyświetlacz bezbateryjny oparty na technologii NFC, potrzebne będą elementy wymienione w **tabeli 1**.

Jeśli jednak ktoś woli zaprojektować własną płytkę drukowaną i jest gotowy na montaż SMT, dostępny jest projekt referencyjny (https://github.com/GDSID/Hipoink). W prototypie bezbateryjnego wyświetlacza opartego na NFC zastosowano sterownik wyświetlacza „DENFC-M0 Energy Harvesting" i wyświetlacz e-ink GDEY0213B74. Na **rysunku 2** przedstawiono moduł sterownika wyświetlacza Energy Harvesting.

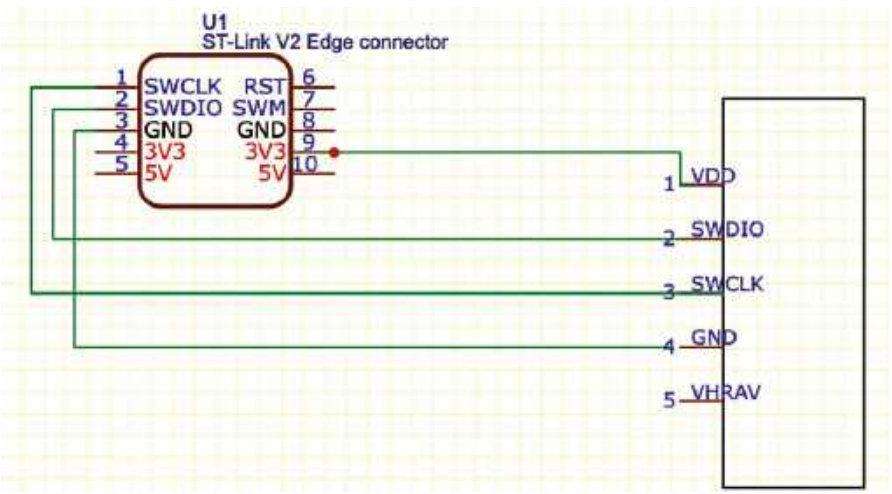
PS. Oprócz elementów wymienionych w tabeli 1 do bezprzewodowej aktualizacji wyświetlacza bez użycia baterii potrzebny jest również telefon z systemem Android i odpowiednią aplikacją. Aplikacja i wszystkie pozostałe informacje techniczne są dostępne pod adresem https://buy-lcd.com/products/e-paper-display-spi-module-denfc-m01-nfc-e-ink-display-board.

Przed podłączeniem elementów należy zapoznać się z **rysunkami 3**, **4** i **5**. Najpierw podłącz wyświetlacz e-ink GDEY0213B74 do modułu sterownika DENFC-M0 za pomocą złącza FPC znajdującego się na płytce modułu pozyskującego energię z pola NFC. Następnie podłącz emulator ST do płytki sterownika wyświetlacza NFC. Złącze FPC i połączenie z wyświetlaczem przedstawiono na rysunku 3. Wewnętrzne połączenia pinów wyświetlacza pokazano na rysunku 4, a połączenie z emulatorem ST-Link pokazano na rysunku 5.

Oprogramowanie układowe można wgrać do modułu sterownika za pomocą środowiska Keil. Płytka obsługuje programowanie przez interfejs SWD. Pobierz środowisko Keil i oprogramowanie układowe, a następnie umieść pliki oprogramowania układowego w katalogu głównym środowiska Keil. Jako MCU wybierz ARMCM0. Następnie skompiluj oprogramowanie układowe i wgraj je na płytkę. Na **rysunku 6** przedstawiono zrzut ekranu środowiska Keil.



Rysunek 6. Zrzut ekranu ze środowiska Keil

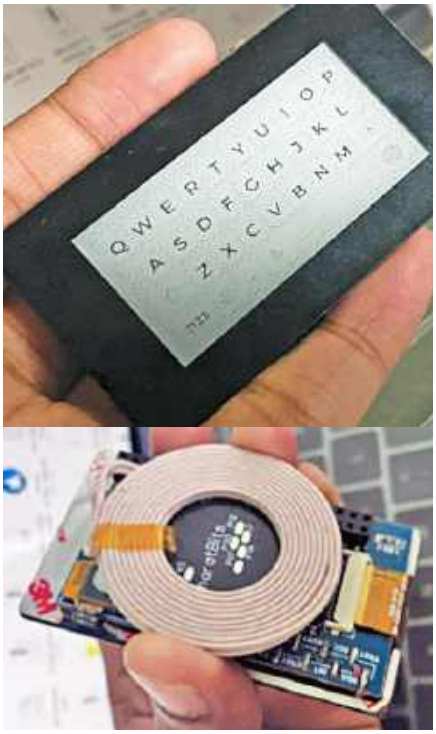


Rysunek 5. Połączenie z programatorem ST-Link



Rysunek 7. Telefon z systemem Android przesyłający obraz do wyświetlacza e-ink

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 8. Cewka odbiorcza zasilania bezprzewodowego połączona z wyświetlaczem e-ink

Do testów należy pobrać aplikację za pomocą kodu QR dostarczonego z modułem sterownika i zainstalować ją w telefonie. Umieść sterownik wyświetlacza NFC w pobliżu anteny NFC telefonu i prześlij żądany obraz lub tekst. Po kilku sekundach wyświetlacz odświeży się i pokaże przesłany tekst lub obraz. Na **rysunku 7** przedstawiono telefon z systemem Android i wyświetlacz e-ink.

Co ciekawe, do sterownika wyświetlacza nie jest podłączona żadna bateria, a mimo to zawartość wyświetlacza aktualizuje się bez podłączonego źródła zasilania, można więc zakwalifikować go jako urządzenie bezbateryjne. Sterownik NFC można odsunąć od telefonu, a zawartość wyświetlacza pozostanie niezmieniona nawet bez zasilania. Ponadto wyświetlacz można odłączyć od modułu sterownika i umieścić w dowolnym miejscu, na przykład na identyfikatorze, cenniku sklepowym lub tablicy reklamowej. Wyświetlana zawartość może pozostać widoczna przez lata bez konieczności zasilania.

Tabela 2. Wykaz elementów bezbateryjnego wyświetlacza wykorzystującego Wi-Fi

Element	Opis	Liczba
Moduł Indusboard (MOD1)	Płytka wielkości monety	1
Cewka odbiorcza zasilania bezprzewodowego (C1)	Cewka XKT-L10, 20 mm, 20 µH	1
Wyświetlacz e-ink (MOD2)	Wyświetlacz e-ink o przekątnej 2,13 cala z interfejsem SPI	1

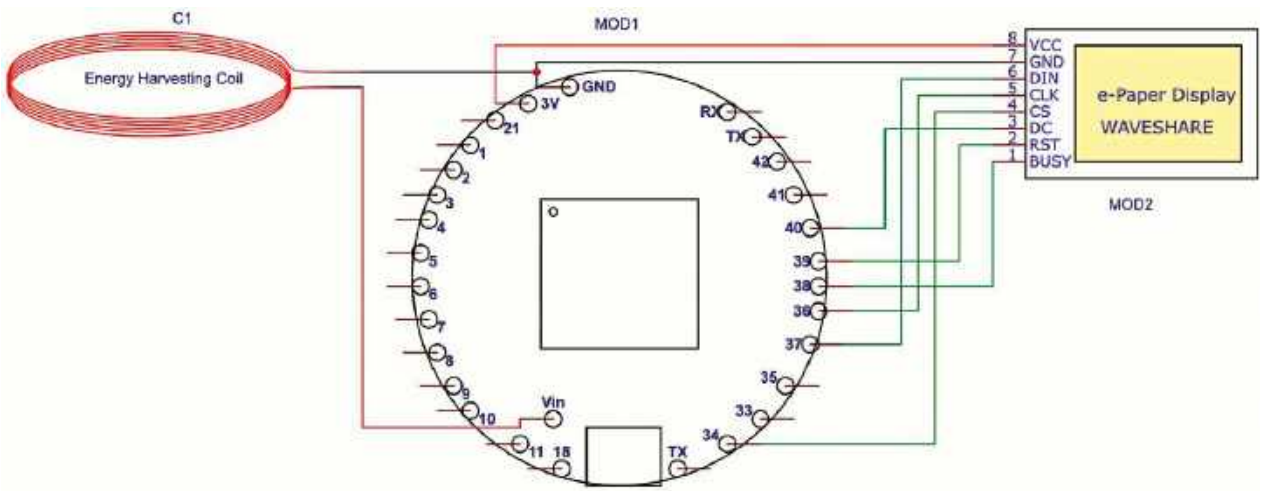
Bezprzewodowy wyświetlacz bezbateryjny oparty na Wi-Fi

Do zaprojektowania bezprzewodowego wyświetlacza o dużym zasięgu, który można aktualizować i który nie wymaga baterii, można wykorzystać płytkę Indusboard i cewkę do bezprzewodowego przesyłania energii. Jak wspomniano wcześniej, wyświetlacze e-ink wymagają jedynie niewielkiej ilości energii podczas aktualizacji, a informacje na ekranie pozostają niezmienione nawet po odłączeniu zasilania. Dlatego zastosowano tę samą koncepcję co we wcześniejszym projekcie, ale zamiast pozyskiwania energii z pola NFC energia jest pozyskiwana z pola magnetycznego za pomocą cewki. Zastosowano płytkę Indusboard, cewkę do bezprzewodowego przesyłania energii, moduł ładowarki bezprzewodowej i wyświetlacz e-ink.

Gdy chcesz zaktualizować zawartość wyświetlacza, po prostu umieść go na ładowarce bezprzewodowej lub module ładowarki bezprzewodowej. Płytka jest zasilana energią pozyskiwaną z pola magnetycznego wytwarzanego przez cewkę ładowarki, a moduł Indusboard zapewnia łączność Wi-Fi. Następnie można połączyć wyświetlacz ze smartfonem lub laptopem, aby przesłać żądany tekst lub obraz do wyświetlenia na ekranie. Po zaktualizowaniu zawartości ekranu można zdjąć wyświetlacz z ładowarki.

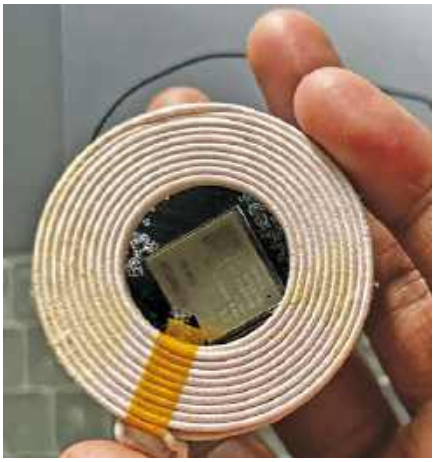
Aby uruchomić wyświetlacz bezbateryjny oparty na Wi-Fi, potrzebne są elementy wymienione w **tabeli 2**. Na **rysunku 8** pokazano cewkę do bezprzewodowego pozyskiwania energii z wyświetlaczem e-ink.

Na **rysunku 9** przedstawiono sposób podłączenia cewki służącej do pozyskiwania energii, modułu Indusboard (MOD1) i wyświetlacza e-papierowego (MOD2). Podłącz cewkę pozyskującą energię do pinów 5 V i GND płytki Indusboard. Układ zasilania płytki umożliwia uzyskanie stabilizowanego napięcia 3,3 V z napięcia wejściowego 3 V...9 V pochodzącego z cewki. Następnie należy połączyć piny SPI wyświetlacza e-ink z pinami SPI płytki. Wykorzystywane są tutaj piny sprzętowego interfejsu SPI i te same piny powinny być zdefiniowane w kodzie. Można jednak zmienić ich przypisanie w kodzie, ponieważ płytka umożliwia elastyczną konfigurację interfejsu SPI. Można wykorzystać inne piny GPIO, pod warunkiem że obsługuje je zastosowana konfiguracja interfejsu SPI. Na **rysunku 10** przedstawiono cewkę do pozyskiwania energii z płytką Indusboard,

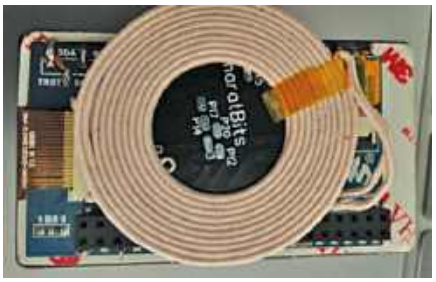


Rysunek 9. Połączenia modułu Indusboard z pozostałymi elementami układu

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 10. Cewka odbiorcza zasilająca moduł Indusboard



Rysunek 11. Cewka pozyskująca energię z pola elektromagnetycznego, połączona z wyświetlaczem e-ink

a na **rysunku 11** cewkę do pozyskiwania energii z wyświetlaczem e-ink.

W kodzie źródłowym należy zdefiniować piny SPI zgodnie z połączeniami, ustawić nazwę punktu dostępowego (hotspotu) wyświetlacza i hasło, a następnie wgrać program do modułu Indusboard, wybierając odpowiednią płytkę i port w Arduino IDE. Zrzut ekranu kodu źródłowego przedstawiono na **rysunku 12**.

Aby zaktualizować zawartość wyświetlacza, umieść go na ładowarce bezprzewodowej lub cewce zasilającej, a następnie uruchom telefon. Połącz telefon z punktem dostępowym wyświetlacza. W tym przypadku jego nazwa to „BATERYLESSDISPLAY”, jak pokazano na **rysunku 13**. Następnie wprowadź hasło.

Materiał filmowy do artykułu:
https://youtu.be/qVx6Yo1I4tY

- Strona projektu:
  https://www.electronicsforu.com/electronics-projects/batteryless-e-paper-display

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

Ten artykuł był wcześniej opublikowany na łamach „Electronics For You”, maj 2024, dodatkowe informacje i ew. materiały dostępne są na stronie https://www.electronicsforu.com

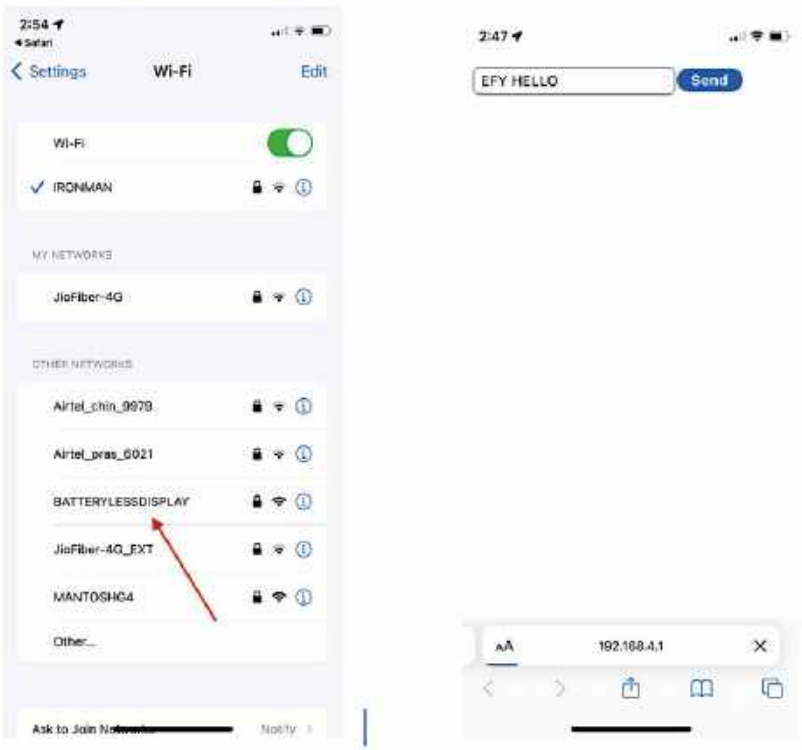
terylessdisplaytest.ino

```
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include <GxEPD.h>
#include <GxGDEH0154D67/GxGDEH0154D67.h>
#include <GxIO/GxIO_SPI/GxIO_SPI.h>
#include <GxIO/GxIO.h>

const char* ssid = "DISPLAY"; // WiFi hotspot SSID
const char* password = "1234567890"; // WiFi hotspot password
const int port = 80; // Port for web server
const int RST_PIN = 39;
const int BUSY_PIN = 38;

GxIO_Class io(SPI, /*CS=*/ 34, /*DC=*/ 36, /*RST=*/ 39);
GxEPD_Class display(io, /*RST=*/ 39, /*BUSY=*/ 38);

WebServer server(port); // Create a web server listening on port 80

String newText = ""; // Variable to hold new text received from webpage

void handleRoot() {
  server.send(200, "text/html", "<form method='post' action='/send'><input type='te
}

void handleSend() {
  if (server.hasArg("message")) {
    newText = server.arg("message");
    displayMessage(newText);
    server.send(200, "text/plain", "Message received and displayed!");
  } else {
```

Rysunek 12. Zrzut ekranu kodu źródłowego

Domyślnie jest to 1234567890. Wpisz adres IP w przeglądarce internetowej i prześlij tekst do wyświetlacza. W ciągu kilku sekund zawartość wyświetlacza zostanie zaktualizowana dzięki energii pozyskiwanej przez cewkę, a na ekranie pojawi się nowy tekst. ■

Ashwini Kumar Sinha



Rysunek 13. Punkt dostępowy wyświetlacza widoczny na telefonie

eprasa.pl fb05997b40

Pomiar pH w systemie hydroponicznym

Podstawowa konfiguracja opisanego w artykule systemu do pomiaru pH znajduje się w pomieszczeniu o powierzchni około 9,29 metra kwadratowego. Pomieszczenie nie jest klimatyzowane i nie jest narażone na bezpośrednie działanie promieni słonecznych. Proponowana konfiguracja ma na celu ocenę możliwości zastosowania elektrodowego czujnika pH E201 BNC do pomiaru pH wody przed i po dodaniu płynnych składników odżywczych.

Na **rysunku 1** zilustrowano prototyp opracowany przez autorów, przedstawiający różne aspekty konfiguracji i instalacji. Monitorowanie wartości pH ma kluczowe znaczenie dla utrzymania optymalnych warunków wzrostu roślin. Moduł ESP32 jest używany w trybie głębokiego uśpienia, a za pomocą czujnika dotykowego można uruchomić pomiar pH roztworu hydroponicznego przez dotknięcie czujnika. Czujnik dotykowy wyzwala przerwanie na wejściu zewnętrznym ESP32, wybudzając go tym samym z trybu głębokiego uśpienia. Na **rysunku 2** przedstawiono schemat blokowy całej konfiguracji.

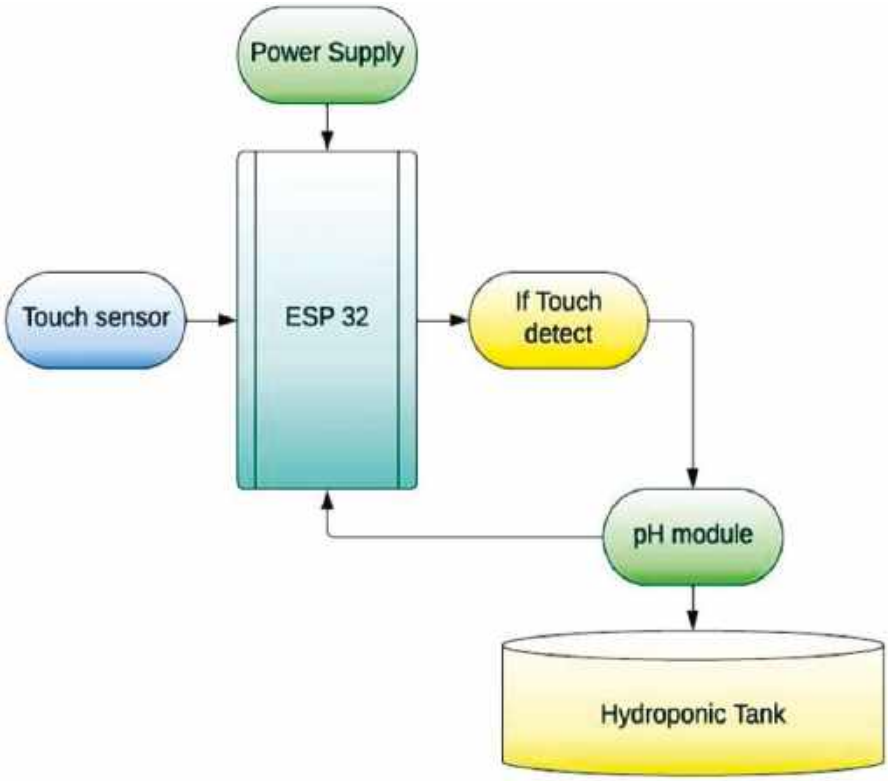
pH określa kwasowość lub zasadowość roztworu, wyrażając ją wartością liczbową. Skala pH obejmuje zakres od 0 do 14. Wartość pH poniżej 7 wskazuje na odczyn kwasowy, natomiast wartość powyżej 7 wskazuje na odczyn zasadowy. pH służy jako istotny wskaźnik chemiczny w systemach hydroponicznych, odzwierciedlając zmiany zachodzące w wodzie wskutek dodawania, wchłaniania i równoważenia płynnych nawozów. Do wskazywania zakresów pH odpowiednio od około 8 do 10, od 4,5 do 6 i od 6 do 7,5 powszechnie stosuje się takie wskaźniki, jak fenoloftaleina, czerwień metylowa i błękit bromotymolowy. Fenoloftaleina zmienia barwę z bezbarwnej na różową, a czerwień metylowa zmienia barwę z czerwonej na żółtą. Termin ten, szeroko stosowany w chemii, biologii i agronomii, pozwala wyrazić wartości stężenia jonów wodorowych, zwykle w zakresie od około 1 do 10^{-14} gramorównoważnika na litr, w skali od 0 do 14.

Wartość pH roztworu można obliczyć jako ujemny logarytm stężenia jonów hydroniowych, zgodnie ze wzorem $pH=-\log[H_3O^+]$. W temperaturze 25°C roztwór o pH<7 ma odczyn kwasowy, pH>7 – zasadowy, a pH=7 – obojętny. Do pomiaru pH stosuje się dwie metody: kolorymetryczną, wykorzystującą roztwory lub papierki wskaźnikowe, oraz



Rysunek 1. Autorski prototyp proponowanej konfiguracji do pomiaru pH

eprasa.pl fb05997b40

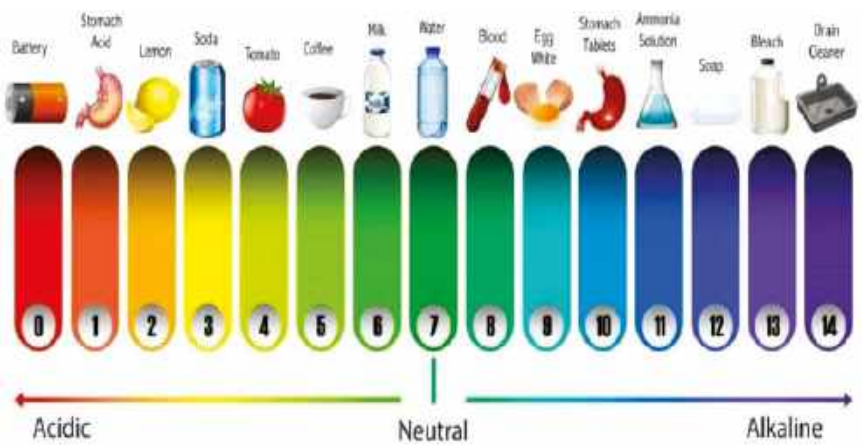


Rysunek 2. Schemat blokowy projektu

dokładniejszą metodę elektrochemiczną, wykorzystującą elektrody i miliwoltomierz (miernik pH). W opisanym w artykule projekcie stosujemy tę drugą metodę, używając ponadto mikrokontrolera pozwalającego zwiększyć dokładność odczytów.

Rośliny mają różne wymagania dotyczące pH, jednak zakres pH od 5,5 do 6,5 jest ogólnie uważany za optymalny dla ogrodnictwa hydroponicznego. Większość roślin rozwija się w warunkach lekko kwaśnych. Powszechnie stosowanymi środkami chemicznymi do regulacji pH są kwas fosforowy (w celu obniżenia pH) i wodorotlenek potasu (w celu podniesienia pH). Chociaż obie substancje chemiczne są stosunkowo bezpieczne, mogą powodować oparzenia, dlatego nie należy dopuszczać do ich kontaktu z oczami.

Poszczególne składniki odżywcze wymagają określonego zakresu pH, aby rośliny mogły je optymalnie przyswajać. Nieprawidłowe wartości pH mogą prowadzić do niedoborów niektórych składników odżywczych lub ich toksycznego działania. Na przykład, gdy wartość pH spadnie poniżej 5,0, u roślin mogą wystąpić niedobory magnezu i wapnia lub toksyczne działanie miedzi i żelaza. Typową skalę pH i odpowiadające jej wartości pH substancji codziennego użytku przedstawiono na **rysunku 3**.



Rysunek 3. Typowa skala pH

Tryby zasilania ESP32

Tryb aktywny. W tym trybie wszystkie układy peryferyjne mikrokontrolera pozostają aktywne, między innymi Wi-Fi, Bluetooth i radio, zgodnie z danymi wejściowymi programu.

Tryb uśpienia modemu. Procesor działa, a częstotliwość zegara jest konfigurowalna. Układy przetwarzania sygnałów w paśmie podstawowym Wi-Fi/Bluetooth oraz układy radiowe są wyłączone.

Tryb lekkiego uśpienia. Normalna praca procesora jest wstrzymana, ale pamięć RTC, urządzenia peryferyjne RTC i koprocesor ULP działają. Zdarzenia wybudzające (MAC, host SDIO, zegar RTC lub przerwania zewnętrzne) wybudzają układ.

Tryb głębokiego uśpienia. Zasilane są tylko pamięć RTC i urządzenia peryferyjne RTC. Dane połączeń Wi-Fi i Bluetooth są przechowywane w pamięci RTC. Koprocesor ULP pozostaje funkcjonalny.

Tryb hibernacji. Wewnętrzny oscylator 8 MHz i koprocesor ULP są wyłączone. Pamięć recovery RTC jest wyłączona. Aktywny pozostaje tylko jeden timer RTC taktowany wolnym zegarem oraz określone porty GPIO RTC. Układ może zostać wybudzony z trybu hibernacji przez zegar RTC lub GPIO RTC.

Tryb głębokiego uśpienia ESP32 jest wykorzystywany w Arduino Cloud. W obecnej konfiguracji mikrokontroler ESP32 jest wprowadzany w tryb głębokiego uśpienia i wybudzany w razie potrzeby. Można to osiągnąć na trzy sposoby: wybudzenie za pomocą timera, wybudzenie dotykowe i wybudzenie zewnętrzne.

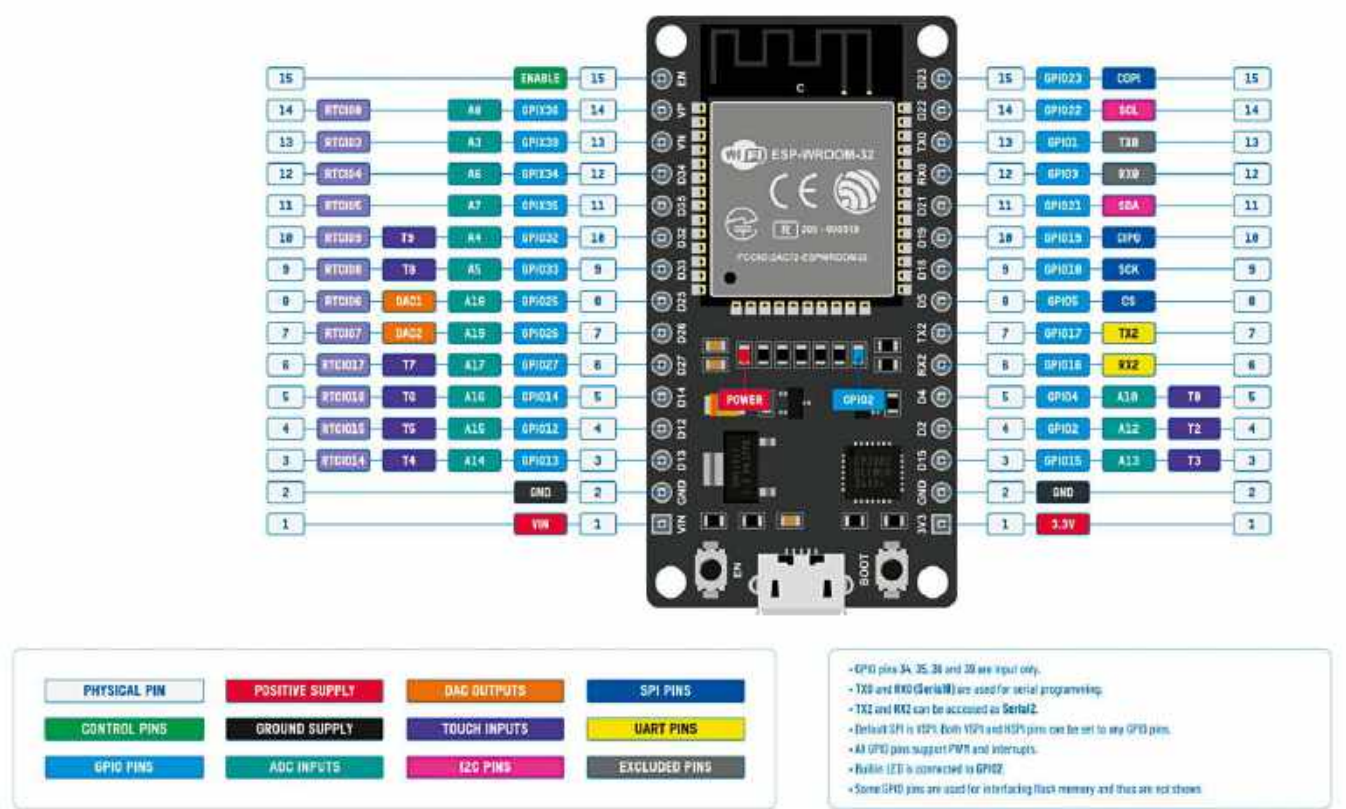
Porównanie pięciu różnych trybów przedstawiono w **tabeli 1** w nocie katalogowej ESP32. Rozkład wyprowadzeń przedstawiono na **rysunku 4**, a w tabeli 1 przedstawiono różne tryby zasilania i zużycie energii przez układ ESP32.

Wybudzanie za pomocą timera, wybudzanie dotykowe i wybudzanie zewnętrzne

Każda konfiguracja ma specyficzne wymagania. W opisanej konfiguracji wartość pH wody krążącej w instalacji hydroponicznej jest monitorowana za pomocą czujnika E201 BNC. ESP32 pozostaje w trybie głębokiego uśpienia, co pozwala oszczędzać energię. Mikrokontroler jest wybudzany za pomocą zewnętrznego czujnika dotykowego. Po dotknięciu czujnika następuje pomiar pH, a jego wynik jest wyświetlany na monitorze portu szeregowego.

Podczas głębokiego uśpienia niektóre z pinów modułu ESP32 mogą być używane przez koprocesor ULP. Są to na przykład piny RTC_GPIO i piny związane z czujnikiem

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 4. Schemat wyprowadzeń modułu ESP32 Development Kit V1

Tabela 1. Różne tryby zasilania i pobór prądu przez układ ESP32

Tryb zasilania	Opis			Pobór prądu
Aktywny (działa RF)	Pakiet Wi-Fi Tx			–
	Pakiet Wi-Fi/BT Tx			
	Wi-Fi/BT Rx i nasłuch			
Tryb uśpienia modemu	Procesor jest włączony	240 MHz	Układy dwurdzeniowe	30 mA...68 mA
			Układy jednordzeniowe	NA
		160 MHz	Układy dwurdzeniowe	27 mA...44 mA
			Układy jednordzeniowe	27 mA...34 mA
		Normalna prędkość: 80 MHz	Układy dwurdzeniowe	20 mA...31 mA
			Układy jednordzeniowe	20 mA...25 mA
Tryb lekkiego uśpienia	-			0,8 mA
Tryb głębokiego uśpienia	Koprocesor ULP jest włączony			150 µA
	Wzorzec monitorowany przez czujnik ULP			100 µA przy współczynniku wypełnienia 1%
	Zegar RTC + pamięć RTC			10 µA
Hibernacja	Tylko zegar RTC			5 µA
Wyłączenie zasilania	CHIP_PU jest ustawiony na niski poziom, układ jest wyłączony			1 µA

dotykowym. Na schemacie wyprowadzeń modułu ESP32 piny RTC_GPIO są zaznaczone zielonym prostokątem.

Wybudzenie zewnętrzne

Wybudzenie zewnętrzne to kolejna metoda wybudzania modułu ESP32 z trybu głębokiego uśpienia, w której zmiana stanu pinu

Tabela 2. Wykaz elementów

Komponenty	Liczba	Opis
ESP32 (MOD2)	1	Do programowania
Czujnik pH (MOD3)	1	Odczyt wartości pH
Czujnik dotykowy (MOD1)	1	Zewnętrzne wejście wyzwalające
Przewody połączeniowe (męsko-żeńskie)	3	Połączenia z czujnikiem

eprasa.pl fb05997b40

```
const int wakeupPin = 4; // GPIO 4 for external wake-up
RTC_DATA_ATTR int bootCount = 0; // Number of reboots

int pHSense = 35;//p0
int samples = 10;
float adc_resolution = 4095.0; //ESP 32 12 bit ADC Resolution
int measurings=0;

float ph (float voltage)
{
   return 7 + ((2.50 - voltage) / 0.18);
}

void setup()
{
  Serial.begin(115200); // Start serial port at 115200 baud rate
  pinMode(wakeupPin, INPUT_PULLUP); // Declare touch sensor pin as INPUT_PULLUP
  bootCount++; // Increment the number of boots by 1
  Serial.println("Boot number: " + String(bootCount)); // Print the boot number at execution

for (int i = 0; i < samples; i++)
 {
  measurings += analogRead(pHSense);
  delay(10);
 }
float voltage = 3.3 / adc_resolution * measurings/samples;
    Serial.print("pH= ");
    Serial.println(ph(voltage));
    delay(1000);
esp_sleep_enable_ext0_wakeup((gpio_num_t)wakeupPin, HIGH); // Configure ext
  wakeup delay(1000); // Adding a 1 second delay to avoid multiple presses
  Serial.println("I'm going to sleep now.");// Print the statement before entering deep
  sleep esp_deep_sleep_start(); // Enter deep sleep mode
  }

void loop()
 {
//We will never use loop
 }
```

Rysunek 5. Fragment kodu źródłowego

Tabela 3. Połączenia między MOD1, MOD2 i MOD3

MOD3 (czujnik pH)	MOD2 (ESP32)
Napięcie zasilania (5 V)	Vcc (5 V)
Wyjście czujnika (A)	G35
GND	GND
MOD1 (czujnik dotykowy)	MOD2 (ESP32)
Napięcie zasilania (Vcc)	Vcc (5 V)
Wyjście czujnika (SIG)	G4
GND	GND

GPIO inicjuje wybudzenie. Przed wprowadzeniem modułu ESP32 w tryb głębokiego uśpienia należy odpowiednio skonfigurować źródło wybudzania. Można skonfigurować dwa rodzaje wybudzania zewnętrznego: ext0 i ext1. Ext0 umożliwia wybudzanie za pomocą jednego pinu GPIO, natomiast ext1 służy do wybudzania za pomocą wielu pinów GPIO. Należy pamiętać, że tylko piny GPIO RTC mogą być używane jako źródło wybudzania zewnętrznego.

Aby włączyć źródło wybudzania ext0, użyj następującego interfejsu API:

```
esp_sleep_enable_ext0_wakeup()
```

Za wyzwalanie wybudzania ext0 odpowiada moduł RTC IO. Gdy jako źródło wybudzania używane jest ext0, urządzenia peryferyjne RTC muszą być włączone w trybie głębokiego uśpienia, ponieważ moduł RTC IO jest częścią domeny zasilania urządzeń peryferyjnych RTC.

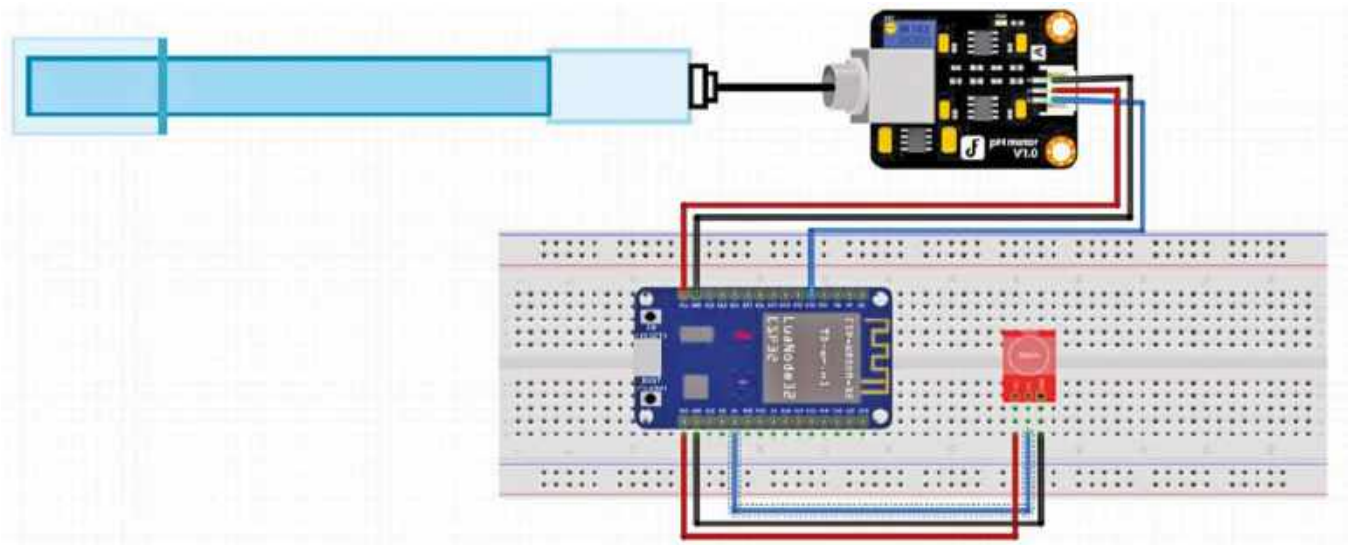
Oprogramowanie

Kod jest przygotowywany w środowisku Arduino IDE. Tutaj definiowany jest numer pinu dla czujnika, a następnie wartość pH jest obliczana za pomocą odpowiedniego wzoru. Aby umożliwić procesorowi przechodzenie ze stanu uśpienia do stanu aktywnego podczas przetwarzania danych z czujnika, przetwarzanie to odbywa się w funkcji konfiguracyjnej z wykorzystaniem funkcji uśpienia. Na rysunku 5 przedstawiono fragment kodu źródłowego, a na rysunku 6 dodatkowe informacje na temat konfiguracji i użytych elementów. Układ wyprowadzeń sondy pomiarowej wraz z zespołem sondy umożliwia odczyt wartości pH, z uwzględnieniem korekty przesunięć wynikających z odczytów analogowych i limitów pH. W **tabeli 2** zawarto wykaz użytych elementów, a w **tabeli 3** przedstawiono połączenia wyprowadzeń służących do podłączenia czujnika.

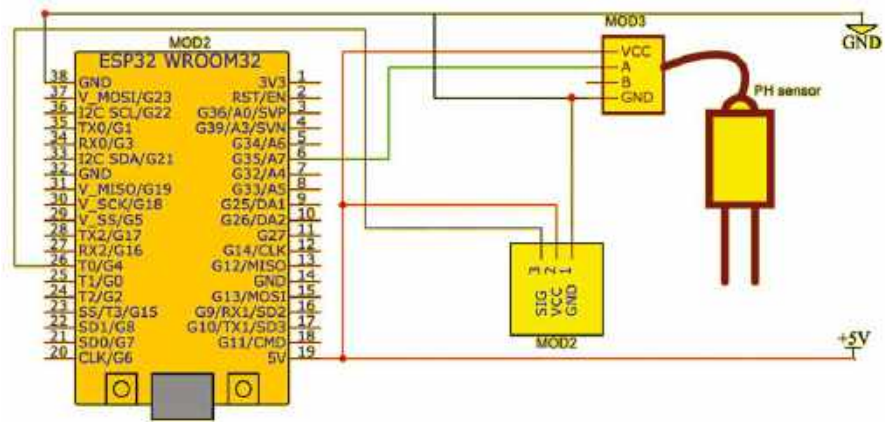


Rysunek 6. Dodatkowe informacje o różnych aspektach konfiguracji

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 7. Połączenia elementów proponowanego układu na płytce stykowej



Rysunek 8. Schemat układu do pomiaru pH

Materiał filmowy do artykułu: https://youtu.be/GcbKSXrS0dA

- Strona projektu: https://www.electronicsforu.com/electronics-projects/hydroponics-system-ph-measurement

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

Ten artykuł był wcześniej opublikowany na łamach „Electronics For You", kwiecień 2024, dodatkowe informacje i ew. materiały dostępne są na stronie https://www.electronicsforu.com

Schemat układu

Cały układ składa się z czujnika dotykowego (MOD1), modułu ESP32 (MOD2), czujnika pH (MOD3) i kilku zworek. Na **rysunku 7** zilustrowano połączenia elementów proponowanego układu na płytce prototypowej, a na **rysunku 8** przedstawiono schemat ideowy proponowanego systemu pomiarowego.

Przed zmontowaniem układu należy zapoznać się z rysunkami 7 i 8. Po prawidłowym zmontowaniu układu na podstawie schematu załaduj program do ESP32, a następnie włącz urządzenie i przetestuj jego działanie. Wartość pH zostanie wyświetlona w monitorze portu szeregowego po zanurzeniu czujnika w badanej cieczy.

Uwaga. Podsumowując, możliwe jest mierzenie pH roztworu hydroponicznego za pomocą czujnika przy jednoczesnym oszczędzaniu energii dzięki wykorzystaniu trybu głębokiego uśpienia. ■

dr Geetali Saha i Dhruv Vachhani

REKLAMA



eprasa.pl fb05997b40

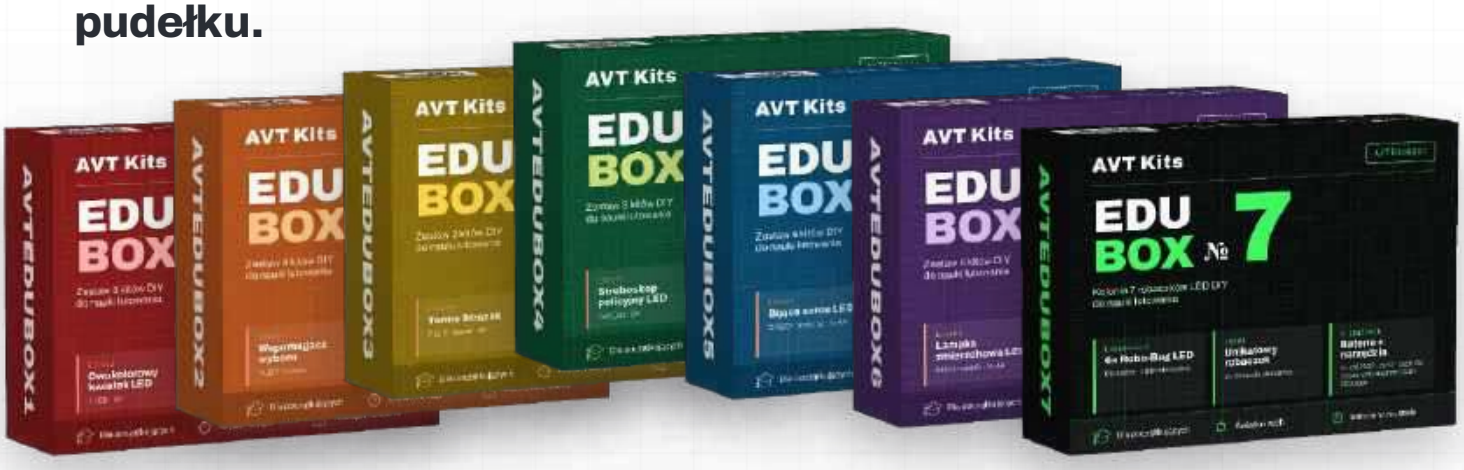
AVT Kits

SERIA ZESTAWÓW DO NAUKI LUTOWANIA

NOWOŚĆ · SIEDEM PUDEŁEK

EDU BOX

Otwierasz, lutujesz, działa. Komplet elementów i kolorowa instrukcja po polsku w każdym pudełku.



1 3 KITY — THE BEST OF — **Dwukolorowy kwiatek LED**

2 3 KITY — THE BEST OF — **Kolorofon LED**

3 3 KITY — THE BEST OF — **Super Ucho**

4 3 KITY — THE BEST OF — **Pikająca kostka do gry**

5 4 KITY — THE BEST OF — **Bijące serce LED**

6 5 KITÓW — THE BEST OF — **Minipianino**

7 7 ROBACZKÓW — THE BEST OF — **6× Robo-Bug LED**



Kolorowa instrukcja po polsku w każdym zestawie

ZDJĘCIA MONTAŻU · SCHEMAT · WYKAZ ELEMENTÓW · KOLEJNOŚĆ LUTOWANIA

Lutownica, kilka elementów i układ, który świeci, gra albo mierzy temperaturę.

EDU BOX to siedem pudełek dla tych, którzy dopiero biorą lutownicę do ręki. W każdym od trzech do siedmiu kompletnych zestawów AVT — płytki, komplet elementów i kolorowa instrukcja po polsku. Od pierwszego migającego LED-a po kolonię świecących robaczków na wibrujących silniczkach.

1. **Dla początkujących**
   Montaż przewlekany, bez elementów SMD
2. **Komplet elementów**
   Płytki, podzespoły, cyna i instrukcja. Lutownicę i baterie dokupujesz osobno
3. **Kolorowa instrukcja po polsku**
   Zdjęcia montażu, schemat i wykaz elementów — w pełnym kolorze
4. **Efekt widać od razu**
   Światło, dźwięk i czujniki — działa zaraz po zmontowaniu

sklep.avt.pl

AVT SPV Sp. z o.o. · ul. Leszczynowa 11 · 03-197 Warszawa

EDU BOX 1–7
AVTEDUBOX1 … AVTEDUBOX7
zeskanuj i zobacz serię

eprasa.pl/b05997b40

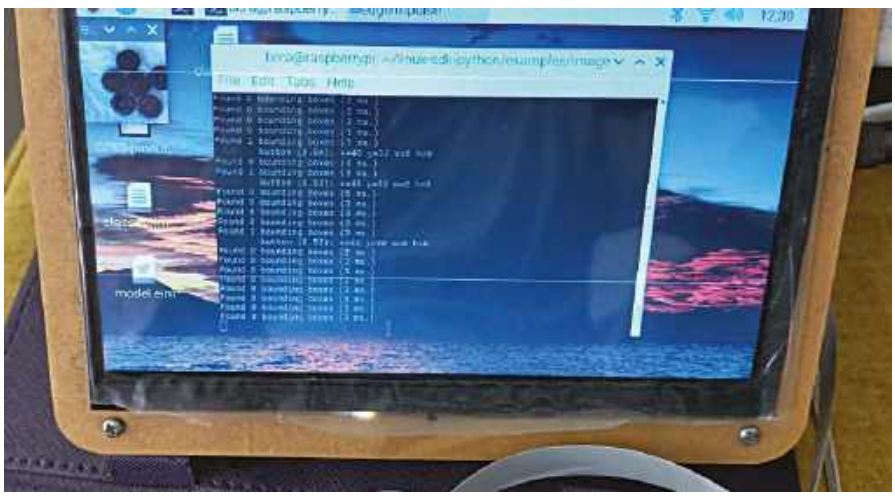
Zliczanie drobnych elementów z wykorzystaniem platformy Edge Impulse

Klasyfikacja obiektów odgrywa kluczową rolę w automatyce przemysłowej oraz w urządzeniach, w których różne przedmioty są sortowane lub zliczane podczas pakowania. Fabryki produkujące guziki, czekoladki czy podobne wyroby wymagają precyzyjnego liczenia w celu sprawnego pakowania, co przy ręcznym wykonywaniu jest procesem czasochłonnym i kosztownym. Wdrożenie systemu automatyzacji do wykrywania, klasyfikowania, sortowania i zliczania obiektów może znacząco usprawnić proces produkcyjny. Celem niniejszego projektu jest stworzenie niedrogiego urządzenia pozwalającego na realizację takiego systemu automatyki przemysłowej.

Klasyfikację obiektów można z łatwością zrealizować za pomocą modeli tworzonych na platformie Edge Impulse. Umożliwia ona na przykład odróżnienie człowieka od zwierząt, roweru od innych typów pojazdów i tak dalej. W analogiczny sposób można dokładnie zliczać obiekty jednego rodzaju znajdujące się wśród innych przedmiotów.

Projekt pierwotnie powstawał z myślą o wdrożeniu na poziomie mikrokontrolera na urządzeniach takich jak ESP32 czy Arduino Nicla Vision, z założeniem zliczania w niewielkim kadrze o wymiarach 120 × 120 pikseli, gdzie analizowanym obiektem był stosunkowo mały guzik. Szybko okazało się jednak, że nawet przy tak małym kadrze mikrokontrolery były niewystarczające, ponieważ sam plik modelu ma rozmiar około 8 MB. W rezultacie projekt uruchomiono ostatecznie na minikomputerze Raspberry Pi, na którym działa bez zakłóceń. Działający prototyp autora przedstawiono na **rysunku 1**.

Podzespoły wymagane do wykonania projektu zestawiono w tabeli elementów.



Rysunek 1. Działający prototyp autora

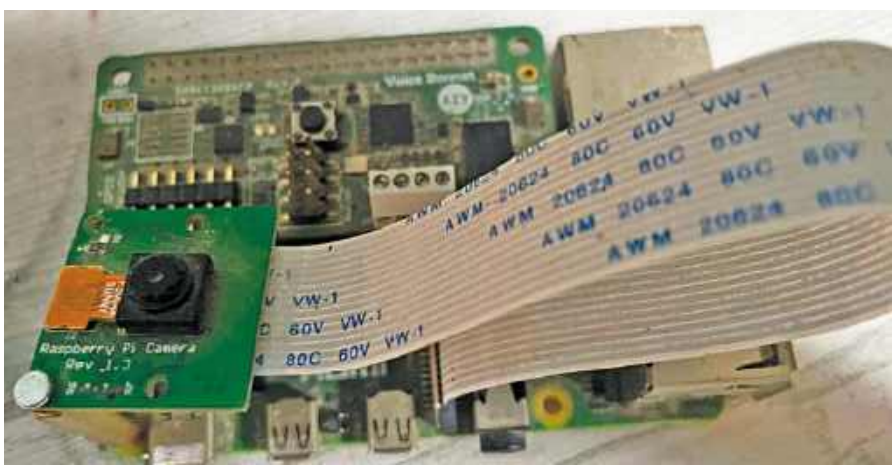
Połączenia

Sposób podłączenia kamery do Raspberry Pi pokazano na **rysunku 2**. Podłącz kamerę dedykowaną do Raspberry Pi oraz wyświetlacz zgodnie z ilustracją, a kabel wyświetlacza wepnij do gniazda HDMI minikomputera Raspberry Pi.

Tworzenie modelu uczenia maszynowego (ML)

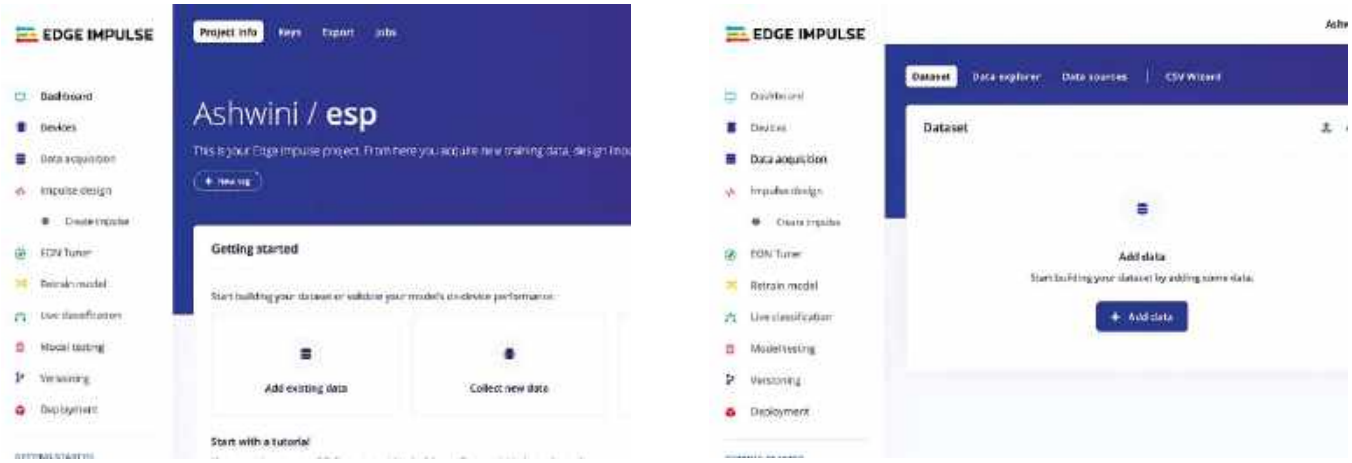
Do stworzenia modelu uczenia maszynowego (ML) konieczne jest sklasyfikowanie i rozpoznanie obiektów. Do tego celu można wykorzystać różne platformy, takie jak TensorFlow, Edge Impulse czy Google Teachable Machine.

Rozpocznij od założenia konta w serwisie edgeimpulse.com za pomocą adresu e-mail. Przygotuj garść podobnych guzików. Jeśli korzystasz z serwisu z poziomu minikomputera Raspberry Pi, użyj kamery do zebrania zdjęć guzików pod różnymi kątami – jest to kluczowe z punktu widzenia późniejszego działania w warunkach rzeczywistych.



Rysunek 2. Podłączenie kamery do minikomputera Raspberry Pi

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 3. Dodawanie urządzenia i zbieranie danych w serwisie Edge Impulse

Platforma Edge Impulse umożliwia również podłączenie telefonu komórkowego lub laptopa jako wygodnego urządzenia wejściowego na etapie akwizycji danych. Dodawanie urządzenia oraz zbieranie danych w środowisku Edge Impulse przedstawiono na **rysunku 3**.

Struktura projektu

Projekt w serwisie Edge Impulse dzieli się zasadniczo na następujące etapy:

a) Akwizycja danych (Data acquisition). Obejmuje gromadzenie różnego rodzaju danych, takich jak obrazy, dźwięk, temperatura, odległość itp. Część tych danych jest wydzielana jako zbiór testowy, natomiast cała reszta służy jako dane treningowe.

b) Projektowanie procesu przetwarzania (Impulse design). Krok ten dzieli się na konfigurację kolejnych bloków:

1. Parametry wejściowe: obraz (szerokość, wysokość), dźwięk (parametry audio).
2. Blok przetwarzania: określa sposób wstępnej obróbki danych wejściowych.
3. Blok uczenia: dane obiektów dla tworzonego modelu.
4. Przetwarzanie obrazu: generowanie cech charakterystycznych z zebranych obrazów.
5. Detekcja obiektów: wybór modelu sieci neuronowej oraz jego wytrenowanie.



Rysunek 4. Kod QR do testowania i uruchamiania modelu uczenia maszynowego

Część związana z detekcją obiektów wymaga pewnego doświadczenia – lub po prostu metody prób i błędów – aby uzyskać poziom dokładności rzędu 85 procent lub wyższy. Do wyboru jest kilka modeli, a każdy wynik powyżej 90 procent uznaje się za doskonały. Warto jednak pamiętać, że dokładność nie powinna wynosić 100 procent, gdyż mogłoby to świadczyć o problemach ze zbiorem danych (na przykład o przeuczeniu modelu). W przypadku opisywanego urządzenia osiągnięto dokładność na poziomie 98,6 procent, co jest godnym uwagi rezultatem jak na projekt początkowy, zwłaszcza przy skromnym zbiorze danych obejmującym około 40 próbek. Więcej szczegółów przedstawiono na rysunku 3.

Testowanie modelu

W pierwszej kolejności model można przetestować na danych testowych. Pozwala to sprawdzić jakość jego działania, a następnie skierować kamerę na rzeczywiste obiekty i ocenić rezultaty w praktyce. Opcję tę można przetestować bezpośrednio w oknie przeglądarki internetowej. Na **rysunku 4** pokazano kod QR służący do testowania i uruchamiania modelu uczenia maszynowego.

Funkcja ta jest dostępna w panelu głównym strony startowej Edge Impulse. Można zeskanować kod smartfonem i uruchomić model na telefonie lub wykonać to bezpośrednio w oknie przeglądarki. Skieruj kamerę na guziki i sprawdź, czy poprawnie je zlicza. Na **rysunku 5** pokazano akwizycję danych dla trzech próbek.

Wdrożenie modelu

Aby uruchomić model na minikomputerze Raspberry Pi, należy pobrać na niego plik z rozszerzeniem *.eim. Jednak w przeciwieństwie do innych platform sprzętowych, takich jak Arduino Nicla Vision czy ESP32, gdzie pliki wgrywa się bezpośrednio, w przypadku Raspberry Pi należy najpierw zainstalować narzędzia Edge Impulse w systemie minikomputera. Plik ten pobiera się z poziomu oprogramowania `edge-impulse-daemon`. Bez obaw – serwis Edge Impulse udostępnia dedykowaną stronę z instrukcją instalacji oprogramowania na Raspberry Pi (odnośnik: https://docs.edgeimpulse.com/docs/development-platforms/officially-supported-cpu-gpu targets/raspberry-pi-4).

Po zainstalowaniu narzędzi Edge Impulse na minikomputerze Raspberry Pi uruchom polecenie `edge-impulse-linux-runner`. Uwaga: minikomputer Raspberry Pi musi mieć aktywne połączenie z Internetem. W terminalu Raspberry Pi połącz się ze swoim kontem Edge Impulse (polecenie `edge-impulse-linux-runner --clean` pozwala przełączyć projekt). Polecenie to automatycznie skompiluje i pobierze model sztucznej inteligencji dla danego urządzenia, a następnie uruchomi go na minikomputerze. Skieruj kamerę podłączoną do Raspberry Pi na guziki – urządzenie zacznie je zliczać.



Rysunek 5. Akwizycja danych dla próbek od 1 do 3

eprasa.pl fb05997b40

```
# Listing
#!/usr/bin/env python

import device_patches # Poprawki specyficzne dla urządzenia - obsługiwane przez oprogramowanie
import cv2 # Import biblioteki wizji komputerowej (OpenCV)
import os
import sys, getopt
import signal
import time
from edge_impulse_linux.image import ImageImpulseRunner
import subprocess # Ta linia została dodana przez autora.

elif "bounding_boxes" in res["result"].keys():
    print('Found %d bounding boxes (%d ms.)' % (len(res["result"]["bounding_boxes"]), res['timing']['dsp'] +
res['timing']['classification']))
    if (len(res["result"]["bounding_boxes"]) > 0):
        exitCode = subprocess.call(["espeak", "-ven+f3", "-a200", " Found %d Buttons" % len(res["result"]["bounding_
boxes"])]) # Ta linia została dodana przez autora
```

Uruchomienie modelu w języku Python

W powyższym scenariuszu model działa zgodnie z domyślną konfiguracją Edge Impulse. Aby jednak wykorzystać go do własnych, sprecyzowanych celów – takich jak włączenie alarmu dźwiękowego lub zapalenie diody LED, gdy zliczona liczba obiektów osiągnie zadaną wartość (na przykład co najmniej 2) – trzeba sięgnąć po inne rozwiązanie. Z pomocą przychodzi język Python 3. Na minikomputerze Raspberry Pi należy zainstalować pakiet linux-sdk-python. Pakiet deweloperski Edge Impulse SDK (Software Development Kit) jest dostępny dla różnych środowisk i języków, w tym Python, Node.js czy C++. Poniższy odnośnik prowadzi do strony z dokumentacją biblioteki SDK dla języka Python (odnośnik: https://docs.edgeimpulse.com/docs/tools/edge-impulse-for-linux/linux-python-sdk).

Po zainstalowaniu pakietu przejdź do katalogu linux-sdk-python/examples/image i uruchom skrypt Pythona odpowiedzialny za rozpoznawanie obrazu. W katalogu z przykładami znajdują się trzy podkatalogi – odpowiednio dla danych dźwiękowych, obrazowych oraz danych niestandardowych. W folderze z obrazami dostępny jest również plik do klasyfikacji strumienia wideo. Z kolei katalog niestandardowy służy do pracy z innymi typami danych (jest to opcja przeznaczona wyłącznie dla zaawansowanych użytkowników).

```
$> python3 classify-image.py /home/bera/
downloads/model.eim
```

W ten sposób uruchamia się skrypt w Pythonie ze wskazaniem pobranego pliku model.eim. Program automatycznie wykryje moduł kamery (podłączony przez USB lub dedykowane złącze taśmowe kamery) i rozpocznie działanie. W lewym górnym rogu ekranu otworzy się małe okno podglądu z kamery o wymiarach 120 × 120 pikseli, a rozpoznane guziki zostaną oznaczone małym punktem. Zliczona liczba obiektów będzie wyświetlana w oknie terminala. Należy zadbać o odpowiednie oświetlenie oraz właściwe ustawienie ostrości obiektywu na guzikach. Jest to szczególnie istotne w przypadku tańszych modułów kamer. Z tego powodu uruchomienie modelu na smartfonie zapewnia znacznie lepszą jakość obrazu i szybsze zliczanie. Zapewnienie dobrego oświetlenia i ostrości pozwoli jednak uzyskać w pełni zadowalające rezultaty także na Raspberry Pi.

Dostosowanie programu do własnych potrzeb

Warto przyjrzeć się plikowi classify-image.py – to prosty skrypt w Pythonie, który przy podstawowej znajomości języka można łatwo dostosować do własnych wymagań. W prezentowanym kodzie dodano moduł espeak, dzięki czemu po wykryciu guzików urządzenie głosowo podaje ich liczbę. Zobaczmy fragment zmodyfikowanego kodu źródłowego (listing powyżej):

Narzędzie eSpeak to samodzielny syntezator mowy (text-to-speech) dla języka Python. Do działania nie wymaga połączenia z Internetem.

Uruchomienie zmodyfikowanego programu

Program w Pythonie został zmodyfikowany. Po jego uruchomieniu system zlokalizuje guziki (w lewym górnym rogu ekranu wyświetli się małe okno podglądu 120 × 120 pikseli), wyniki liczbowe pojawią się w oknie terminala, a podłączony głośnik odtworzy komunikat głosowy z liczbą znalezionych guzików (na przykład: „Found five buttons” lub „Found 2 buttons”). Jeżeli chcesz sterować przekaźnikiem lub zapalać diodę LED, wystarczy zaimportować bibliotekę do obsługi linii GPIO w Pythonie, a następnie ustawić odpowiedni stan logiczny na wybranym wyprowadzeniu GPIO. Pamiętaj jednak, że do sterowania cewką przekaźnika niezbędny jest tranzystor kluczujący, ponieważ port minikomputera nie jest w stanie dostarczyć prądu wymaganego do załączenia przekaźnika.

Wykaz elementów:

Podzespół	Liczba
Raspberry Pi Zero W/4	1
Moduł kamery do Raspberry Pi	1
Karta microSD 16 GB lub większa	1
Wyświetlacz HDMI	1

Podsumowanie

Platforma obliczeniowa Edge Impulse powstała w 2019 roku z myślą o umożliwieniu konstruktorom tworzenia inteligentnych urządzeń nowej generacji. Aplikacje i urządzenia wykorzystujące sztuczną inteligencję na krawędzi sieci (Edge AI) zaczęły pojawiać się na platformach takich jak ESP32, Jetson Nano, Raspberry Pi, Orange Pi, Maixduino, OpenMV, Nicla Vision i wielu innych. Trend ten w najbliższych latach będzie się dynamicznie rozwijać. Czasy, w których do zadań sztucznej inteligencji niezbędne były wyłącznie superkomputery lub potężne stacje robocze, odchodzą w przeszłość. Przyszłość należy do małych, modułowych urządzeń o niskim poborze mocy.

Somnath Bera

Materiał filmowy do artykułu:
https://youtu.be/kA1mVi8g55I

- Strona projektu:
  https://www.electronicsforu.com/electronics-projects/small-object-classification-and-counting

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

Ten artykuł był wcześniej opublikowany na łamach „Electronics For You”, luty 2024, dodatkowe informacje i ew. materiały dostępne są na stronie https://www.electronicsforu.com

eprasa.pl fb05997b40

ELEKTRONIKA dla wszystkich
nr 11/2026 (29)
JUNIOR



W gronie Juniorów witamy Piotra. Minęło zaledwie kilka spotkań, a tu już komponenty SMD na warsztacie, elegancko! Młodzi Entuzjaści Elektroniki, Szkoła Podstawowa nr 86, Wrocław

Wyobraź sobie, że masz za zadanie wskazać komuś drogę. Możesz oczywiście napisać wielkie „TĘDY!", narysować strzałkę albo stanąć i energicznie machać rękami. Ale co zrobić, żeby twój znak był widoczny również z daleka i od razu przyciągał uwagę? Elektronik ma na to całkiem niezły sposób: wystarczy odrobina światła. A najlepiej takiego, od którego trudno oderwać wzrok!

Na pewno zdarzyło ci się zobaczyć migające światła ostrzegawcze przy robotach drogowych, na pojazdach technicznych albo w miejscach wymagających szczególnej ostrożności. Nie świecą bez przerwy z jednakową jasnością. Zmieniają się, błyskają lub pulsują, dzięki czemu łatwiej je zauważyć. Nasz dzisiejszy projekt wykorzystuje właśnie tę właściwość światła, ale zamiast zwykłej lampki zbudujemy coś, co dodatkowo pokazuje kierunek.

Będzie to strzałka ułożona z czternastu żółtych diod LED. Nie zamierzamy jednak urządzać pokazu przypadkowych błysków. Wszystkie diody będą rozjaśniały się i przygasały razem, spokojnie i w jednakowym rytmie. Światło nie będzie po prostu włączane i wyłączane, lecz jego jasność będzie zmieniała się stopniowo. Powstanie efekt przypominający pulsowanie, który wygląda znacznie ciekawiej niż zwykłe, nieruchome punkty świetlne.

Najciekawsze jest jednak to, co znajdzie się po drugiej stronie płytki. Tym razem czeka nas spotkanie z elementami tak małymi, że lepiej przy nich nie chuchać, nie dmuchać, a już na pewno nie kichać! Jedno kichnięcie może bowiem oznaczać długie poszukiwania na podłodze. O ile w ogóle uda się tam znaleźć coś tak małego. Śmiem wątpić! Będziemy bowiem poznawać technikę montażu powierzchniowego, czyli SMT (ang. *Surface Mount Technology*), oraz elementy SMD (ang. *Surface Mount Device*), które lutuje się bezpośrednio do pól lutowniczych na powierzchni płytki drukowanej. Brzmi trochę poważnie? Spokojnie, każdy kiedyś lutował swój pierwszy rezystor SMD.

Jeżeli masz już za sobą montaż elementów przewlekanych THT, wiesz, że ich wyprowadzenia zwykle przechodzą przez otwory w płytce. W przypadku elementów SMD jest inaczej. Niektóre przypominają maleńkie prostokąty z metalowymi zakończeniami, inne mają krótkie wyprowadzenia lub pola lutownicze. Trzeba je starannie ustawić i przylutować w wyznaczonych miejscach. Wymaga to nieco innego sposobu pracy, ale daje też ogromną satysfakcję, zwłaszcza gdy pierwszy samodzielnie polutowany zestaw zacznie działać.

Nie musimy przy tym od razu rzucać się na głęboką wodę. Płytkę naszego zestawu zaprojektowano z myślą o nauce lutowania elementów SMD. Miejsca ich montażu są oznaczone, a poszczególne elementy różnią się wielkością i budową. Zaczniemy od niewielkich rezystorów i kondensatorów, a następnie zajmiemy się między innymi tranzystorem, diodą prostowniczą i układem scalonym. Będzie więc okazja poćwiczyć zarówno ustawianie drobnych elementów, jak i lutowanie wyprowadzeń umieszczonych blisko siebie.

Przy okazji poznamy interesujący sposób sterowania jasnością diod LED. W naszym urządzeniu nie ma mikrokontrolera ani programu, który trzeba wgrać do pamięci. Rytm pulsowania powstaje w obwodzie elektronicznym zbudowanym z wykorzystaniem dwóch wzmacniaczy operacyjnych znajdujących się w układzie LM358. Współpracują one z rezystorami i kondensatorami, tworząc generator. Jego sygnał steruje tranzystorem BC817, który reguluje prąd płynący przez diody LED. Wszystko odbywa się samoczynnie, bez przycisków i dodatkowego sterowania.

Jest tu również coś, co może cię zaskoczyć. Chociaż cały projekt służy między



Fotografia 1. Od lewej: Igor i Piotr podczas montażu zestawów AVTEDU800 „Pulsująca strzałka LED SMD". Młodzi Entuzjaści Elektroniki, Szkoła Podstawowa nr 86, Wrocław

eprasa.pl fb05997b40



Fotografia 2. Tu już nie ma żartów – komponenty SMD są malutkie, ale ambicje ogromne! Młodzi Entuzjaści Elektroniki, Szkoła Podstawowa nr 86 we Wrocławiu

Wykaz elementów:

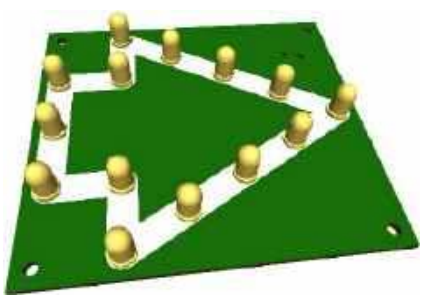
Rezystory:
RR1...R7: rezystor 390 Ω (SMD 1206, oznaczenie 391)
R15, R16: rezystor 10 kΩ (SMD 1206, oznaczenie 103)
R17: rezystor 220 Ω (SMD 1206, oznaczenie 221)
R18: rezystor 100 kΩ (SMD 1206, oznaczenie 104)
R19, R20: rezystor 47 kΩ (SMD 1206, oznaczenie 473)

Kondensatory:
C1, C2: kondensator 10 µF (SMD 1206)

Półprzewodniki:
T1: BC817 (SMD SOT-23)
US1: LM358 (SMD SO-08)
D15: 1N4007 (SMD DO-214AC)
D1...D14: żółta dioda LED 5 mm

Pozostałe:
X1: gniazdo zasilania typu FC681465S

innymi do nauki montażu powierzchniowego, czternaście diod LED ma tradycyjne wyprowadzenia przewlekane. Lutujemy je po przeciwnej stronie płytki niż elementy SMD. Dzięki temu podczas budowy jednego urządzenia możemy wykorzystać znaną już technikę THT i jednocześnie nauczyć się czegoś nowego. A na zakończenie zobaczymy, jak wszystkie te niewielkie elementy współpracują, tworząc jeden efekt świetlny.



Rysunek 1. Pulsująca strzałka LED SMD (kod AVTEDU800), zmontowany układ

Co dziś trafi pod lutownicę?

Tym razem zbudujemy zestaw **AVTEDU800 Pulsująca strzałka LED SMD**. Jego płytka ma wymiary 78×71 mm, a czternaście żółtych diod LED tworzy na niej wyraźny znak kierunkowy. Po uruchomieniu wszystkie diody będą rytmicznie zmieniały jasność, tworząc efekt pulsującego światła ostrzegawczego. Taka strzałka może posłużyć jako ciekawa demonstracja działania świetlnych wskaźników kierunku, ale dla nas najważniejsze będzie to, czego nauczymy się podczas jej budowy.

Na płytce zamontujemy rezystory i kondensatory SMD w rozmiarze 1206, tranzystor BC817 w obudowie SOT23, diodę prostowniczą 1N4007 w obudowie SMA oraz układ scalony LM358 w obudowie SO-8. Do tego dojdą gniazdo zasilania i diody LED o średnicy 5 mm. Gotowe urządzenie wymaga zasilania napięciem stałym 12 V ze źródła o wydajności prądowej co najmniej 200 mA. Zanim jednak zobaczymy pulsującą strzałkę, czeka nas trochę precyzyjnej pracy. Zmontowany układ pokazano na **rysunku 1**.

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, układów scalonych i innych podzespołów, ponieważ wszystkie komponenty są oznaczone takimi samymi desygnatorami na schemacie montażowym, liście elementów oraz schemacie ideowym.

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

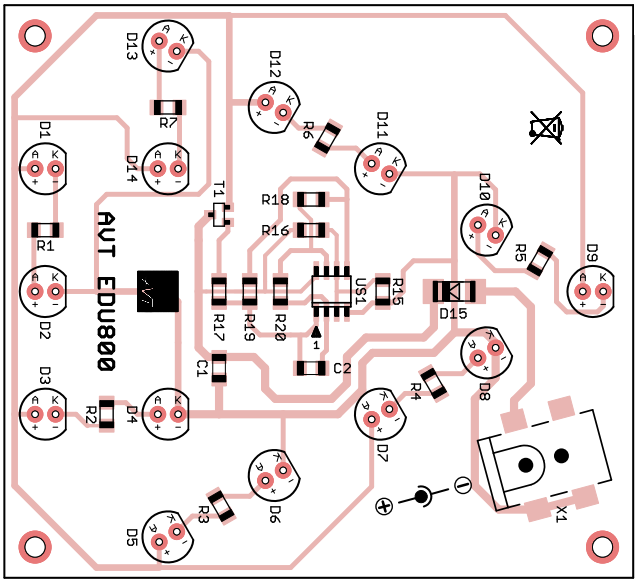
Montaż przyjazny naprawom + Przycinanie nadmiaru wyprowadzeń
https://elportal.pl/files/2026/02/15/3679-montaz-przyjazny-naprawom-przycinanie-nadmiaru-wyprowadzen.pdf

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 fb05997b40



Rysunek 2. Rozmieszczenie elementów na płytce drukowanej (strona montażu elementów SMD), a) schemat montażowy; b) wizualizacja 3D

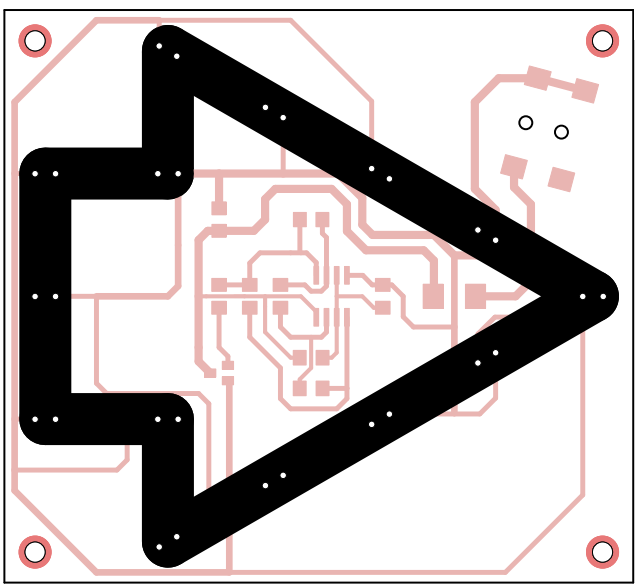
Ułatwia to bezbłędne i szybkie składanie układu, nawet osobom początkującym. Schemat montażowy pomaga również uniknąć pomyłek, takich jak wlutowanie elementu w niewłaściwe miejsce lub ustawienie go w niewłaściwej orientacji. Schemat montażowy, który dodatkowo pokazuje układ ścieżek i padów, bardzo pomaga 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 podgląd znacząco ułatwia wykrywanie błędów i zwiększa pewność, że układ został zmontowany prawidłowo. Schemat montażowy pokazano na **rysunku 2**.

Montaż układu scalonego

Dotychczas montaż elementów na płytce drukowanej rozpoczynaliśmy od rezystorów, ponieważ były one najniższymi komponentami. Teraz jednak wkraczamy w świat technologii montażu powierzchniowego, która pod wieloma względami rządzi się nieco innymi prawami. W przypadku elementów SMD o kolejności montażu decyduje już nie tylko ich wysokość, ale również wielkość i rozstaw wyprowadzeń oraz łatwość dostępu do pól lutowniczych.

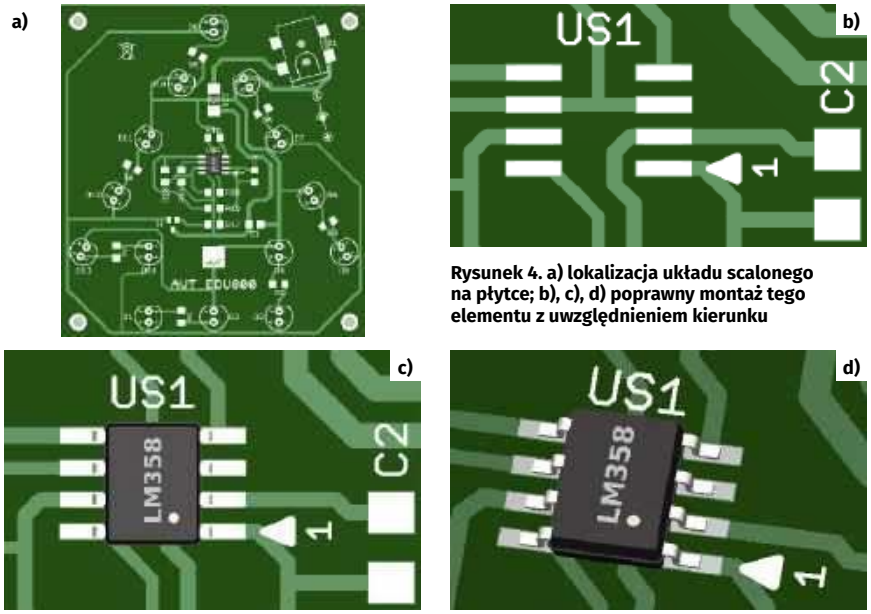
Dlatego tym razem montaż rozpoczniemy od układu scalonego US1 typu LM358 w obudowie SMD SO-8. Jego wyprowadzenia mają raster 1,27 mm, co oznacza, że odległość między osiami sąsiednich wyprowadzeń wynosi zaledwie 1,27 mm. Tak niewielkie odstępy wymagają precyzyjnego ustawienia układu i ostrożnego lutowania, aby uniknąć zwarć między wyprowadzeniami. Wykonanie tej czynności na początku, gdy pozostałe elementy nie ograniczają dostępu do układu, znacznie ułatwi pracę.

- Układ LM358 zawiera dwa wzmacniacze operacyjne. W tym konkretnym układzie umożliwia on wytworzenie przebiegu trójkątnego, który służy do płynnego rozjaśniania i wygaszania diod LED za pośrednictwem tranzystora T1.
- Obudowa SO-8 ma osiem wyprowadzeń, po cztery z każdej strony. W odróżnieniu od układów scalonych do montażu przewlekanego, montowanych w podstawkach, jest przeznaczona do bezpośredniego lutowania na powierzchni płytki drukowanej.
- Układ scalony ma określoną orientację montażową. Wyprowadzenie numer



Rysunek 3. Rozmieszczenie elementów na płytce drukowanej (strona montażu diod LED), a) schemat montażowy; b) wizualizacja 3D

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 4. a) lokalizacja układu scalonego na płytce; b), c), d) poprawny montaż tego elementu z uwzględnieniem kierunku

1 wskazuje znacznik na obudowie, a odpowiednie oznaczenie znajduje się również na płytce drukowanej. Przed lutowaniem sprawdź zgodność tych oznaczeń. Odwrócenie układu scalonego uniemożliwi prawidłową pracę urządzenia i może doprowadzić do jego uszkodzenia.

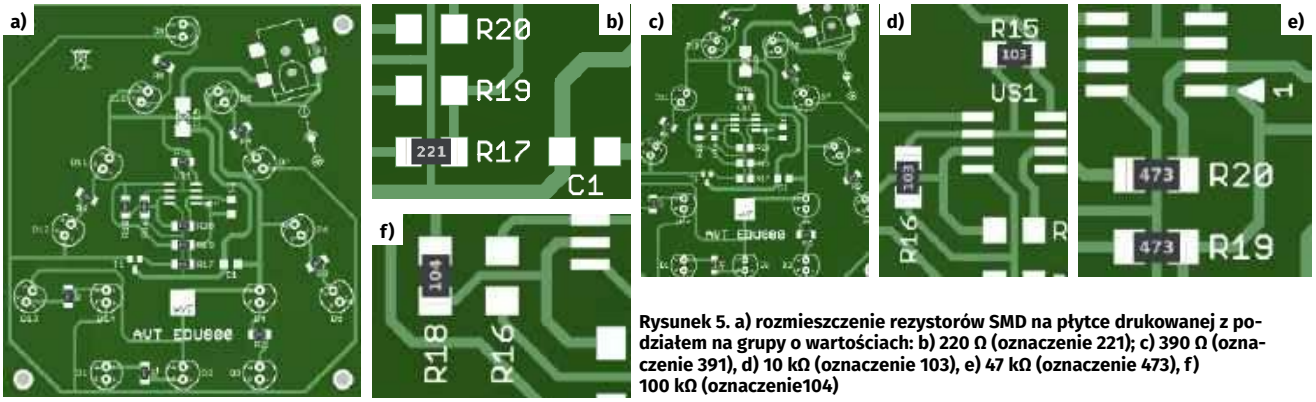
- Jeśli po raz pierwszy masz do czynienia z montażem powierzchniowym, koniecznie zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, zwłaszcza tym dotyczącym lutowania elementów SMD na płytce drukowanej, a także z zasadami BHP – patrz sekcja *Zanim przystąpisz do montażu…*
- Odszukaj na płytce miejsce oznaczone US1. Podgrzej grotem lutownicy jedno ze skrajnych pól lutowniczych i dodaj odrobinę cyny. Następnie chwyć układ pęsetą, ustaw go zgodnie ze znacznikiem pierwszego wyprowadzenia. Następnie ponownie podgrzej uprzednio przygotowane pole lutownicze, aby unieruchomić obudowę.
- Po ustaleniu położenia układu sprawdź, czy wszystkie osiem wyprowadzeń znajduje się nad odpowiednimi polami lutowniczymi. W razie potrzeby skoryguj ustawienie, ponownie podgrzewając pierwsze połączenie. Dopiero po sprawdzeniu położenia przylutuj pozostałe wyprowadzenia.
- Podczas lutowania używaj niewielkiej ilości cyny, ponieważ wyprowadzenia obudowy SO-8 znajdują się blisko siebie. Jeśli między sąsiednimi wyprowadzeniami powstanie mostek lutowniczy, usuń nadmiar cyny za pomocą plecionki lutowniczej, topnika w postaci pasty i odpowiednio dobranego grotu lutownicy.
- Po zakończeniu montażu obejrzyj wszystkie wyprowadzenia układu US1 przy dobrym oświetleniu, najlepiej z użyciem lupy. Sprawdź, czy nie występują zwarcia między sąsiednimi wyprowadzeniami i czy każde połączenie zostało prawidłowo wykonane.

Montaż rezystorów

W następnej kolejności przylutuj do płytki rezystory SMD w obudowach 1206. W zestawie znajduje się trzynaście rezystorów o pięciu różnych wartościach rezystancji: R1... R7 (390 Ω), R15 i R16 (10 kΩ), R17 (220 Ω), R18 (100 kΩ) oraz R19 i R20 (47 kΩ). Przed przystąpieniem do montażu 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 powodującą spadek napięcia podczas przepływu prądu. Energia elektryczna zamienia się w nim w ciepło, co jest naturalnym skutkiem przepływu prądu przez rezystancję.
- Rezystory nie mają biegunowości, dlatego kierunek ich montażu jest dowolny. Ważne jest natomiast, aby każdy rezystor znalazł się w miejscu przewidzianym dla jego wartości rezystancji.
- W przypadku rezystorów SMD należy również zwrócić uwagę na wielkość obudowy, która powinna być dopasowana do wymiarów pól lutowniczych na płytce. W przeciwnym razie montaż może być znacznie utrudniony, a nawet niemożliwy.
- Rezystory SMD w obudowach 1206 należą do najniższych elementów zestawu, dlatego należy przylutować je zaraz po układzie scalonym. Dzięki temu pozostałe komponenty nie będą utrudniały dostępu do pól lutowniczych.
- Spośród wszystkich komponentów znajdujących się w zestawie wyodrębnij trzynaście rezystorów SMD w obudowach 1206. Pozostałe elementy odłóż na bok. Rezystory najlepiej wyjmuj z taśmy pojedynczo, bezpośrednio przed montażem, aby uniknąć pomylenia wartości.
- Przed montażem sprawdź oznaczenia rezystorów i odpowiadające im desygnatory na płytce: kod 391 oznacza 390 Ω (R1...R7), kod 103 – 10 kΩ (R15, R16), kod 221 – 220 Ω (R17), kod 104 – 100 kΩ (R18), a kod 473 – 47 kΩ (R19, R20). W razie wątpliwości możesz sprawdzić wartość rezystancji multimetrem ustawionym w tryb omomierza.
- Jeśli pomiar rezystorów sprawia ci trudność, poproś o pomoc kolegę lub osobę prowadzącą zajęcia. Rezystory SMD mierzy się podobnie jak przewlekane, jednak końcówki sond trzeba przykładać bezpośrednio do metalowych zakończeń ich obudów. Ze względu na niewielkie wymiary elementów wymaga to większej precyzji. Nie można też pomóc sobie krokodylkami. Dodatkowe wskazówki znajdziesz w dokumencie „Pomiar wartości rezystorów za pomocą multimetru", dostępnym na stronie https://elportal.pl/do-pobrania jako materiał uzupełniający do EdW 11/2024.
- Jeśli po raz pierwszy masz do czynienia z montażem powierzchniowym, koniecznie zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, zwłaszcza tym dotyczącym lutowania elementów SMD na płytce drukowanej, a także z zasadami BHP – patrz sekcja *Zanim przystąpisz do montażu…*
- Odszukaj na płytce pola lutownicze oznaczone właściwym desygnatorem (**rysunek 5**). Na jedno z pól nanieś niewielką ilość cyny. Następnie chwyć rezystor pęsetą, ustaw go na obu polach i podgrzej wcześniej przygotowane połączenie, aby unieruchomić element.
- Zadbaj o to, aby rezystor leżał płasko na płytce, a jego metalizowane zakończenia znajdowały się na właściwych polach lutowniczych. Przed

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 5. a) rozmieszczenie rezystorów SMD na płytce drukowanej z podziałem na grupy o wartościach: b) 220 Ω (oznaczenie 221); c) 390 Ω (oznaczenie 391), d) 10 kΩ (oznaczenie 103), e) 47 kΩ (oznaczenie 473), f) 100 kΩ (oznaczenie104)

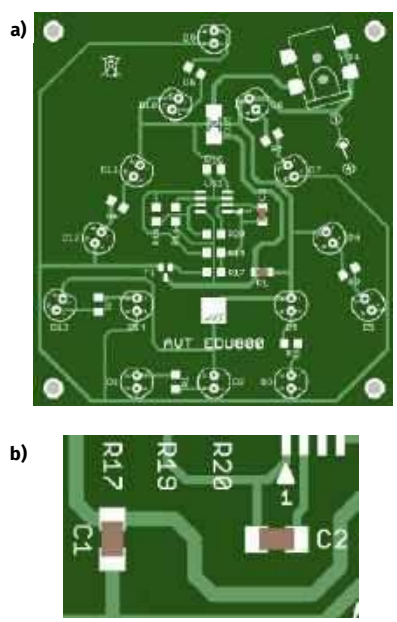
przylutowaniem drugiego zakończenia sprawdź ustawienie rezystora i w razie potrzeby skoryguj jego położenie, ponownie rozgrzewając wcześniej wykonane połączenie lutowane.

- Przylutuj drugie zakończenie rezystora, a następnie sprawdź jakość obu połączeń. Spoiwo powinno zwilżać zakończenie elementu i pole lutownicze, nie tworząc zwarcia z sąsiednimi ścieżkami ani polami.
- Po przylutowaniu wszystkich trzynastu rezystorów sprawdź poprawność ich rozmieszczenia na płytce oraz jakość wykonanych połączeń lutowanych.

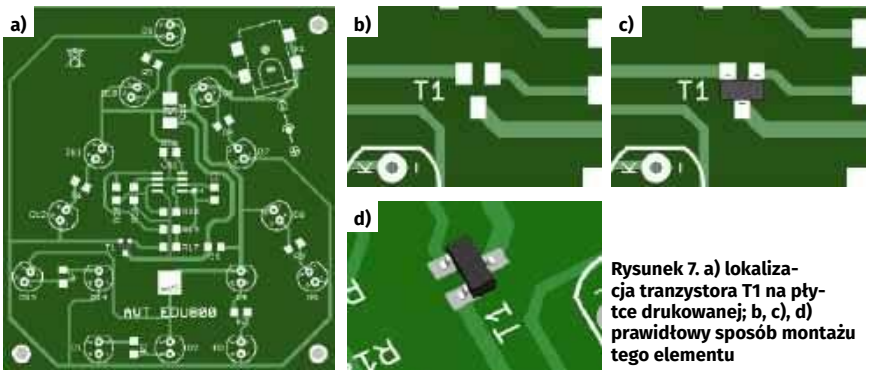
Montaż kondensatorów

Zgodnie z listą elementów przylutuj dwa kondensatory C1 i C2 o pojemności 10 µF, w obudowach SMD 1206. Są to niewielkie elementy przeznaczone do montażu powierzchniowego. Przed przystąpieniem do tej czynności zapoznaj się ze wskazówkami poniżej.

- Kondensator jest elementem elektronicznym służącym do magazynowania ładunku elektrycznego. W układach elektronicznych kondensatory wykorzystuje się między innymi do kształtowania przebiegów czasowych, filtrowania zakłóceń i stabilizowania napięcia.
- Do zestawu dołączono dwa niespolaryzowane kondensatory SMD w obudowach 1206, każdy o pojemności 10 µF. Przed montażem sprawdź zgodność elementów z wykazem oraz odszukaj oznaczenia C1 i C2 na płytce drukowanej. Ponieważ kondensatory te nie mają określonej biegunowości, można je zamontować w dowolnym kierunku.
- Kondensatory SMD są zazwyczaj nieco wyższe od rezystorów SMD o tym samym kodzie rozmiaru obudowy, dlatego przylutuj je po rezystorach, ale przed montażem tranzystora i większych komponentów. Dzięki temu zachowasz swobodny dostęp do pól lutowniczych podczas montażu.
- Jeśli po raz pierwszy masz do czynienia z montażem powierzchniowym, koniecznie zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, zwłaszcza tym dotyczącym lutowania elementów SMD na płytce drukowanej, a także z zasadami BHP – patrz sekcja *Zanim przystąpisz do montażu…*
- Odszukaj na płytce pola lutownicze oznaczone C1 i C2. Na jednym z pól przeznaczonych dla pierwszego kondensatora umieść niewielką ilość spoiwa lutowniczego. Chwyć kondensator pęsetą, ustaw go na obu polach i podgrzej przygotowane połączenie, aby unieruchomić element.
- Zadbaj o to, aby kondensator leżał płasko na płytce, a jego metalizowane zakończenia znajdowały się na właściwych polach lutowniczych. Przed przylutowaniem drugiego zakończenia sprawdź ustawienie kondensatora i w razie potrzeby skoryguj jego położenie, ponownie rozgrzewając wcześniej wykonane połączenie lutowane. W taki sam sposób zamontuj drugi kondensator. Ponieważ oba kondensatory mają taką samą pojemność i są niespolaryzowane, nie ma znaczenia, który z nich zamontujesz w miejscu C1, a który w miejscu C2, ani w jakim kierunku je ustawisz.
- Podczas lutowania nie używaj nadmiernej ilości spoiwa. Zadbaj o dobre zwilżenie zakończeń kondensatora i pól lutowniczych oraz unikaj długotrwałego nagrzewania elementu. Nie wywieraj nacisku



Rysunek 6. Lokalizacja kondensatorów C1, C2 na płytce drukowanej



Rysunek 7. a) lokalizacja tranzystora T1 na płytce drukowanej; b, c), d) prawidłowy sposób montażu tego elementu

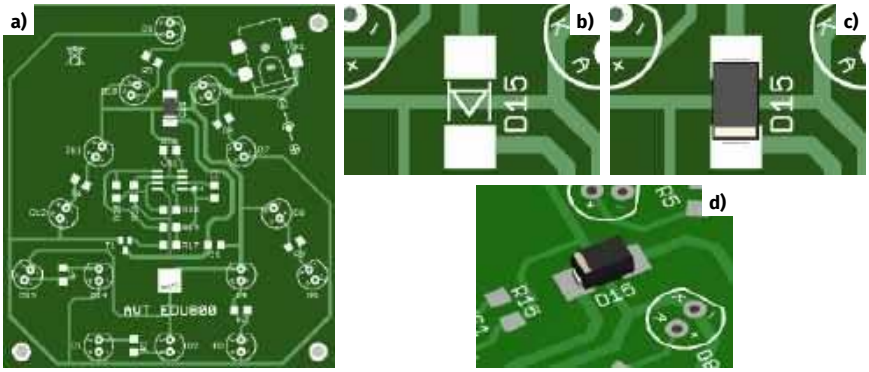
eprasa.pl fb05997b40

na obudowę, zwłaszcza podczas stygnięcia połączeń.
- Po zakończeniu montażu sprawdź oba kondensatory. Upewnij się, że są stabilnie przylutowane, a między sąsiednimi polami nie powstały zwarcia.

Montaż tranzystora

Zgodnie z listą elementów przylutuj tranzystor NPN BC817 oznaczony T1, w obudowie SMD SOT-23. Przed przystąpieniem do tej czynności zapoznaj się ze wskazówkami poniżej.

- Tranzystor bipolarny (BJT) to element elektroniczny umożliwiający sterowanie przepływem prądu. Może wzmacniać sygnały lub pracować jako klucz elektroniczny, służący do włączania i wyłączania takich elementów jak diody LED, przekaźniki czy brzęczyki.
- Istnieją dwa podstawowe rodzaje tranzystorów bipolarnych: NPN i PNP. Choć mogą występować w takich samych obudowach, nie są zamienne. W zestawie zastosowano tranzystor NPN BC817. Na obudowach tranzystorów SMD często nie umieszcza się pełnych oznaczeń typu, a jedynie krótkie kody, które trudno odczytać bez powiększenia. Dlatego przed montażem upewnij się, że korzystasz z tranzystora dostarczonego w zestawie.
- Tranzystor BC817 ma trzy wyprowadzenia: bazę, kolektor i emiter. Jest przeznaczony do montażu powierzchniowego i ma obudowę SOT-23, w której dwa wyprowadzenia znajdują się po jednej stronie, a trzecie po przeciwnej. Przed lutowaniem umieść tranzystor w miejscu oznaczonym T1, dopasowując jego wyprowadzenia do pól lutowniczych na płytce drukowanej.
- Tranzystor T1 zamontuj po rezystorach i kondensatorach SMD, ale przed większymi elementami, które mogłyby utrudnić dostęp do jego pól lutowniczych. Podczas lutowania posługuj się pęsetą, aby precyzyjnie ustawić niewielką obudowę SOT-23 na polach lutowniczych i w razie potrzeby skorygować jej położenie.
- Jeśli po raz pierwszy masz do czynienia z montażem powierzchniowym, koniecznie zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, zwłaszcza tym dotyczącym *lutowania elementów SMD na płytce drukowanej*, a także z zasadami BHP – patrz sekcja *Zanim przystąpisz do montażu…*



Rysunek 8. a) lokalizacja diody prostowniczej na płytce drukowanej; b), c), d) prawidłowy montaż diody z uwzględnieniem jej biegunowości (zwróć uwagę na pasek oznaczający katodę diody oraz trójkąt na warstwie opisowej płytki, którego wierzchołek wskazuje właściwe położenie paska)

- Na jedno z pól lutowniczych nanieś niewielką ilość spoiwa. Chwyć tranzystor pęsetą, ustaw go we właściwym położeniu i podgrzej przygotowane połączenie, aby unieruchomić element. Następnie przylutuj pozostałe dwa wyprowadzenia. Nie nagrzewaj tranzystora dłużej, niż jest to konieczne.
- Jeśli chcesz upewnić się, że lutowanie tranzystora SMD wykonujesz prawidłowo, skorzystaj z *poradnika montażu elementów SMD* dostępnego pod adresem https://serwis.avt.pl/manuals/AVTEDUSMD.pdf. Przed rozpoczęciem pracy zapoznaj się również z zasadami BHP dotyczącymi posługiwania się lutownicą.
- Po przylutowaniu tranzystora sprawdź wszystkie trzy połączenia. Upewnij się, że między sąsiednimi polami lutowniczymi nie powstały mostki ze spoiwa.

Montaż diody prostowniczej

Zgodnie z listą elementów przylutuj diodę prostowniczą D15 typu 1N4007, przeznaczoną do montażu powierzchniowego. Instrukcja zestawu wskazuje obudowę SMA (DO-214AC). Przed rozpoczęciem montażu zwróć szczególną uwagę na oznaczenie katody.

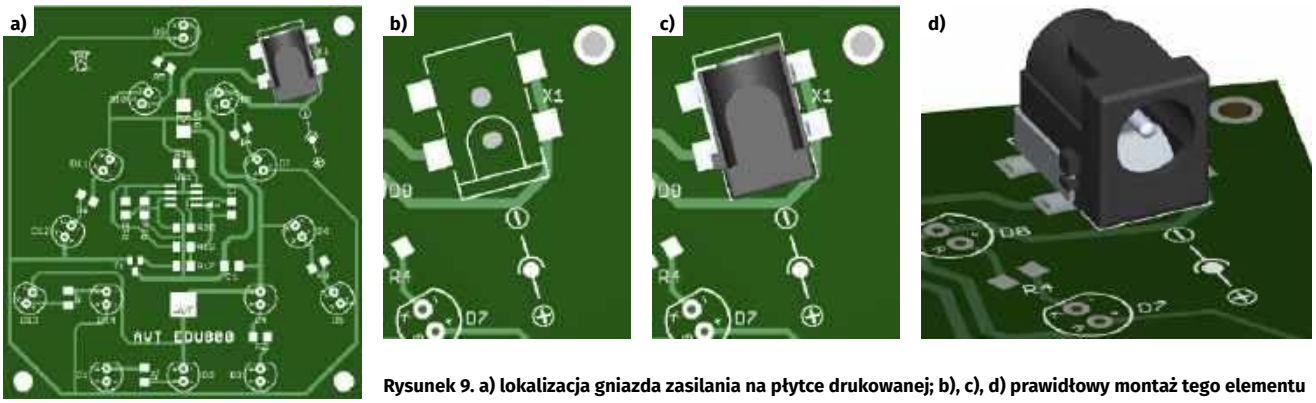
- Dioda prostownicza przewodzi prąd przede wszystkim w jednym kierunku. Ma dwa wyprowadzenia: anodę i katodę. W odróżnieniu od rezystora jej orientacja na płytce ma zasadnicze znaczenie dla prawidłowego działania układu.
- Katoda diody D15 jest oznaczona paskiem na obudowie. Na warstwie opisowej płytki drukowanej znajduje się trójkąt, którego wierzchołek wskazuje właściwe położenie tego paska. Przed lutowaniem ustaw diodę tak, aby pasek na jej obudowie znajdował się po stronie wskazywanej przez wierzchołek trójkąta.
- Jeśli po raz pierwszy masz do czynienia z montażem powierzchniowym, koniecznie zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, zwłaszcza tym dotyczącym lutowania elementów SMD na płytce drukowanej, a także z zasadami BHP – patrz sekcja *Zanim przystąpisz do montażu…*
- Na jedno z pól lutowniczych przeznaczonych dla D15 nanieś niewielką ilość cyny. Chwyć diodę pęsetą, ustaw ją zgodnie z oznaczeniem katody i podgrzej przygotowane połączenie. Po sprawdzeniu prawidłowego położenia przylutuj drugie zakończenie.
- Podczas lutowania nie nagrzewaj diody dłużej, niż jest to konieczne. Upewnij się, że oba zakończenia są prawidłowo połączone z polami lutowniczymi, a obudowa leży równo na płytce.
- Po przylutowaniu diody D15 ponownie sprawdź położenie oznaczenia katody. Nieprawidłowa orientacja diody może uniemożliwić działanie urządzenia. W przypadku wątpliwości porównaj jej ustawienie ze schematem ideowym i oznaczeniami na płytce drukowanej.

Montaż gniazda zasilania

Zgodnie z listą elementów przylutuj gniazdo zasilania X1. Jest to największy element przeznaczony do montażu powierzchniowego w tym zestawie, dlatego należy zamontować go po zakończeniu lutowania wszystkich pozostałych elementów SMD.

- Gniazdo X1 służy do podłączenia zewnętrznego źródła zasilania. Zestaw jest przeznaczony do zasilania napięciem stałym 12 V, a w instrukcji podano wymagany prąd zasilania 200 mA oraz wymiary złącza 2,1/5,5 mm.

eprasa.pl fb05997b40



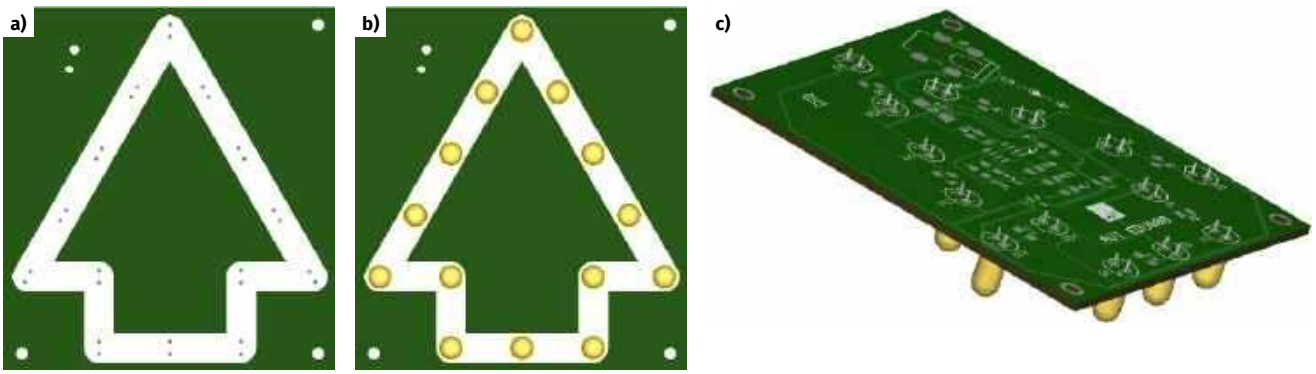
Rysunek 9. a) lokalizacja gniazda zasilania na płytce drukowanej; b), c), d) prawidłowy montaż tego elementu

- Przed montażem sprawdź rozmieszczenie pól lutowniczych i ustaw gniazdo zgodnie z obrysem na płytce. Wszystkie jego styki muszą znajdować się nad odpowiednimi polami, a korpus powinien być ustawiony równo względem powierzchni płytki.
- Gniazdo jest wyposażone w dwa piny pozycjonujące, dla których przewidziano otwory w płytce drukowanej. Ułatwiają one prawidłowe ustawienie gniazda i utrzymują je we właściwym położeniu podczas lutowania. Dodatkowo zwiększają odporność mocowania na obciążenia mechaniczne występujące podczas wkładania i wyjmowania wtyku zasilacza.
- Jeśli po raz pierwszy masz do czynienia z montażem powierzchniowym, koniecznie zapoznaj się z dostępnymi poradnikami, zwłaszcza tym dotyczącym *lutowania elementów SMD na płytce drukowanej*, a także z zasadami BHP – patrz sekcja *Zanim przystąpisz do montażu…*
- Unieruchom gniazdo, wykonując pierwsze połączenie lutowane. Następnie sprawdź położenie elementu i przylutuj pozostałe styki. Ponieważ gniazdo jest narażone na obciążenia mechaniczne podczas podłączania i odłączania wtyku zasilania, szczególnie ważna jest jakość wszystkich jego połączeń lutowanych.
- Podczas lutowania unikaj nadmiernego nagrzewania korpusu gniazda. Zadbaj o właściwe zwilżenie cyną pól lutowniczych i metalowych styków. Nie poruszaj gniazdem, dopóki spoiwo nie zastygnie.
- Po zakończeniu montażu sprawdź, czy gniazdo jest stabilnie przymocowane do płytki oraz czy pomiędzy jego stykami nie powstały zwarcia.

Montaż diod LED

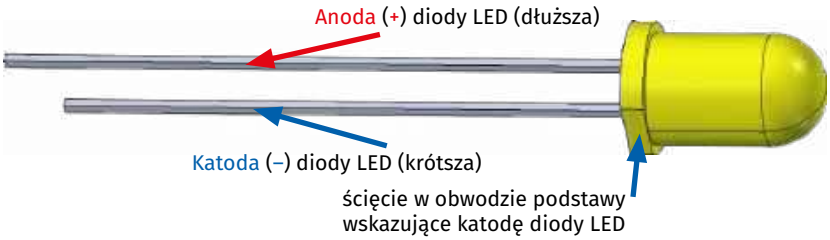
Zgodnie z listą elementów przylutuj czternaście żółtych diod LED o średnicy 5 mm, oznaczonych D1...D14. Diody tworzą na płytce strzałkę świetlną. W odróżnieniu od wcześniej montowanych elementów SMD diody te są przeznaczone do montażu przewlekanego i należy umieścić je po przeciwnej stronie płytki. Przystąp do ich montażu dopiero po zakończeniu lutowania wszystkich elementów SMD. Pamiętaj o konieczności zachowania właściwej polaryzacji diod LED.

- Dioda LED to element półprzewodnikowy emitujący światło podczas przepływu prądu w kierunku przewodzenia. W tym zestawie czternaście żółtych diod LED tworzy świetlny wskaźnik kierunku, którego jasność płynnie wzrasta i maleje w stałym rytmie.
- Diody LED mają określoną biegunowość, dlatego przed montażem należy rozpoznać anodę (A) i katodę (K). Katodę typowej diody LED 5 mm wskazuje krótsze wyprowadzenie oraz ścięcie na obrzeżu obudowy. Przed włożeniem diody do płytki sprawdź oznaczenie jej katody.
- Odszukaj na płytce miejsca oznaczone D1…D14. Każdą diodę umieść w odpowiednich otworach od strony przeznaczonej do montażu diod LED, czyli po przeciwnej stronie niż elementy SMD. Dopilnuj, aby anoda i katoda były skierowane zgodnie z oznaczeniami na płytce.
- Czternaście diod LED tworzy wspólnie kształt strzałki, dlatego szczególnie ważne jest ich równe ustawienie. Zadbaj o jednakową wysokość osadzenia wszystkich obudów i ustawienie diod prostopadle do powierzchni płytki. Pozwoli to uzyskać estetyczny wygląd gotowego wskaźnika.
- Po umieszczeniu diody LED w odpowiednich otworach możesz delikatnie



Rysunek 10. a) Płytka drukowana przed zamontowaniem diod LED; b), c) płytka po ich zamontowaniu. Zwróć uwagę, że wyprowadzenia diod LED są lutowane po tej samej stronie płytki co komponenty SMD, natomiast ich korpusy znajdują się po przeciwnej stronie. Pamiętaj, że dłuższe wyprowadzenia diod LED to anody, a krótsze – katody. Diody należy zamontować zgodnie z oznaczeniami biegunowości na warstwie opisowej płytki, umieszczonej w tym przypadku nietypowo – po stronie lutowania

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 11. Opis wyprowadzeń diody LED („plusowe" wyprowadzenie dłuższe, „minusowe" krótsze)

odchylić jej wyprowadzenia od strony lutowania, aby element nie wypadł podczas odwracania płytki. Przed przylutowaniem wyprostuj jednak wyprowadzenia, ustawiając je prostopadle do powierzchni płytki. Ułatwi to ewentualny demontaż diody LED w przyszłości.

- Jeśli masz wątpliwości dotyczące prawidłowego sposobu lutowania, przeczytaj sekcję *Zanim przystąpisz do montażu…* oraz zapoznaj się z dostępnymi poradnikami dotyczącymi lutowania, a w szczególności z zasadami bezpieczeństwa i higieny pracy (BHP).
- Najpierw przylutuj jedno wyprowadzenie diody, a następnie sprawdź ustawienie jej obudowy. W razie potrzeby skoryguj położenie, ostrożnie podgrzewając wykonane połączenie. Dopiero po uzyskaniu prawidłowego ustawienia przylutuj drugie wyprowadzenie.
- W taki sam sposób zamontuj pozostałe diody D1...D14. Podczas pracy regularnie kontroluj zgodność orientacji wszystkich diod z oznaczeniami na płytce. Nie zakładaj, że wszystkie obudowy można ustawić w jednakowym kierunku bez sprawdzenia rozmieszczenia anod i katod.
- 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.
- Sprawdź, czy wszystkie czternaście diod jest zamontowanych równo i zgodnie z oznaczeniami katod. Upewnij się również, że między sąsiednimi polami lutowniczymi nie powstały zwarcia oraz że żadne odcięte wyprowadzenie nie pozostało na płytce.

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.

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



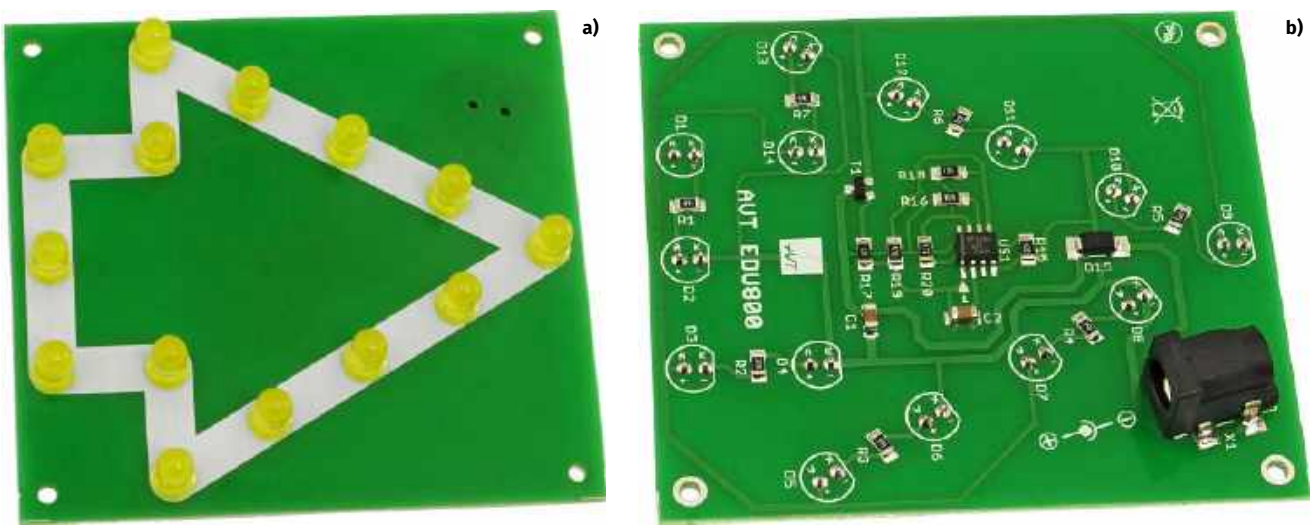
Fotografia 3. Sprawdzanie diody LED za pomocą multimetru ustawionego na funkcję testowania diod. Po przyłożeniu sondy czerwonej do anody, a czarnej do katody, sprawna dioda LED powinna się zaświecić. Jeśli dioda ma odpowiednio długie (jeszcze nie przycięte) wyprowadzenia można się wspomóc krokodylkami

Poprawnie zmontowaną płytkę pokazano na zdjęciach poniżej.

Pierwsze podłączenie zasilania do płytki

Po zakończeniu montażu wszystkich elementów można przystąpić do pierwszego uruchomienia zestawu AVTEDU800 Pulsująca strzałka LED SMD.

W dotychczasowych ćwiczeniach, zgodnie z dobrymi praktykami, przed pierwszym podłączeniem zasilania do nowo zmontowanego układu sprawdzaliśmy poprawność napięcia zasilającego na odpowiednich stykach podstawki pod układ scalony. Tym razem odstąpimy od tej procedury, ponieważ na płytce nie ma podstawki, a układ scalony został przylutowany już na początku montażu, gdy dostęp do jego wyprowadzeń był najłatwiejszy.



Fotografia 4. Poprawnie zmontowany układ; a) widok od strony montażu diod LED; b) widok od strony lutowania

eprasa.pl fb05997b40

Zamiast tego przeprowadź dokładne oględziny obu stron płytki drukowanej. Sprawdź jakość wszystkich połączeń lutowanych, zwracając szczególną uwagę na ewentualne mostki lutownicze, nieprzylutowane wyprowadzenia i uszkodzone ścieżki. W razie wątpliwości skorzystaj z multimetru z funkcją sprawdzania ciągłości obwodu. Sprawdź przede wszystkim, czy między dodatnią i ujemną linią zasilania nie występuje zwarcie, a także czy sąsiednie wyprowadzenia układu scalonego i innych elementów nie zostały przypadkowo połączone spoiwem lutowniczym. Pamiętaj jednak, że niektóre wyprowadzenia mogą być celowo połączone ścieżkami na płytce. W razie wątpliwości posłuż się rysunkiem montażowym (rysunek 2), na którym przedstawiono przebieg ścieżek miedzianych. Pozwoli ci to odróżnić połączenia zamierzone od przypadkowych zwarć. Warto również sprawdzić ciągłość podejrzanych połączeń między ich punktami końcowymi. Wszystkie te pomiary wykonuj przy odłączonym zasilaniu.

Jeżeli nie stwierdzisz żadnych nieprawidłowości, możesz przystąpić do pierwszego uruchomienia. Przy prawidłowym montażu układ powinien zadziałać od razu. Po podłączeniu zasilania sprawdź multimetrem napięcie na stykach gniazda X1 oraz między obydwoma zakończeniami kondensatora C1, zachowując właściwą biegunowość sond. Na kondensatorze C1 powinno występować napięcie zbliżone do napięcia zasilacza, pomniejszone o spadek napięcia na diodzie prostowniczej D15, wynoszący około 0,6 V podczas przewodzenia. Przy zasilaniu napięciem 12 V można zatem oczekiwać bliskiego 11,4 V. Jeżeli zmierzone napięcie znacznie odbiega od oczekiwanego, odłącz zasilanie i ponownie sprawdź połączenia.

Przed podłączeniem zasilania koniecznie zapoznaj się z dokumentem *Zagadnienia BHP związane z uruchamianiem zmontowanego układu*.

- Przed pierwszym uruchomieniem dokładnie obejrzyj obie strony płytki. Sprawdź rozmieszczenie rezystorów, kondensatorów, tranzystora T1, układu scalonego US1, diody prostowniczej D15 oraz czternastu diod LED D1...D14. Szczególną uwagę zwróć na elementy wymagające zachowania określonej orientacji: tranzystor, układ scalony i diody.
- Sprawdź jakość połączeń lutowanych oraz upewnij się, że nie ma zwarć pomiędzy sąsiednimi polami i wyprowadzeniami. Usuń ewentualne pozostałości odciętych wyprowadzeń i inne metalowe zanieczyszczenia.
- Do zasilania zestawu użyj źródła napięcia stałego 12 V, mogącego dostarczyć prąd co najmniej 200 mA, wyposażonego we wtyk o wymiarach 2,1/5,5 mm, pasujący do gniazda X1. Przed podłączeniem sprawdź biegunowość napięcia na wtyku zasilacza. Zgodnie z oznaczeniem na warstwie opisowej płytki, w pobliżu gniazda X1, dodatni biegun zasilania (+) powinien znajdować się na wewnętrznym styku wtyku, a ujemny (–) na jego zewnętrznej powierzchni stykowej. Choć taki układ biegunów jest powszechnie stosowany, nie stanowi uniwersalnego standardu, dlatego zawsze zweryfikuj go na oznaczeniach zasilacza lub za pomocą multimetru. Nie podłączaj zasilania, dopóki nie upewnisz się, że jego biegunowość jest prawidłowa.
- Jeżeli korzystasz z zasilacza laboratoryjnego wyposażonego w ograniczenie prądu, przed pierwszym uruchomieniem ustaw napięcie 12 V i odpowiednie ograniczenie prądowe, uwzględniając podane w instrukcji wymagania zasilania. Nie przekraczaj napięcia znamionowego zestawu.
- Po upewnieniu się, że montaż wykonano prawidłowo, podłącz zasilanie do gniazda X1. Przy poprawnie zmontowanym układzie czternaście żółtych diod LED tworzących strzałkę powinno zacząć pulsować w stałym rytmie. Ich jasność będzie stopniowo wzrastała, a następnie malała.
- Jeżeli diody LED nie świecą, świecą nieprawidłowo albo nie występuje oczekiwany efekt pulsowania, odłącz zasilanie. Sprawdź ponownie orientację diod D1...D14 i D15, ustawienie tranzystora T1 oraz układu scalonego US1. Skontroluj również wartości rezystorów, poprawność połączeń lutowanych i brak zwarć.
- Nie poprawiaj lutów ani nie przemieszczaj elementów przy podłączonym zasilaniu. Wszystkie czynności związane z usuwaniem usterek wykonuj po odłączeniu źródła zasilania i upewnieniu się, że elementy nie są gorące.
- Prawidłowe, rytmiczne rozjaśnianie i wygaszanie czternastu żółtych diod LED oznacza, że zestaw działa zgodnie z oczekiwaniami. Po zakończeniu sprawdzania odłącz zasilanie od gniazda X1.

Ale właściwie... dlaczego to działa?

Schemat ideowy układu przedstawiono na **rysunku 12**.

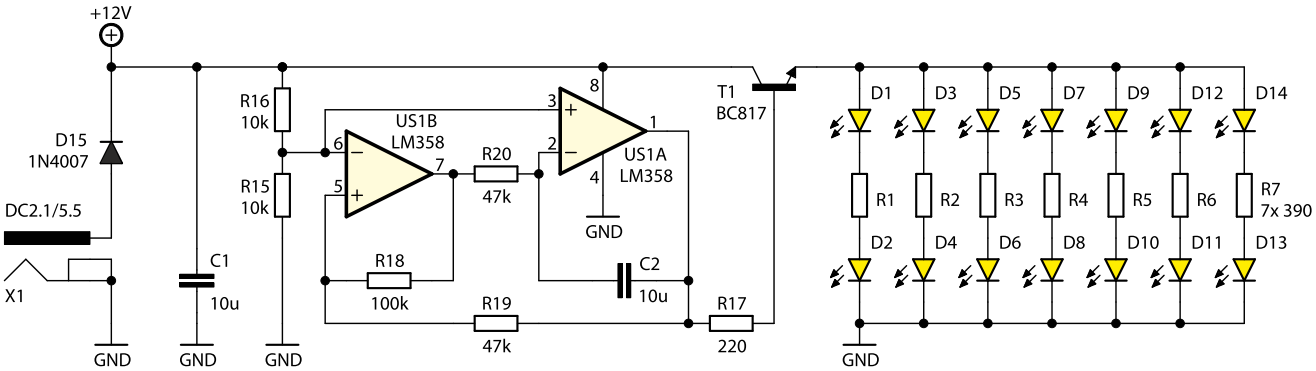
Pulsująca strzałka LED SMD składa się z 14 żółtych diod LED, które wspólnie tworzą świetlny znak wskazujący kierunek. Po podłączeniu zasilania strzałka zaczyna rytmicznie rozjaśniać się i przygasać. Wszystkie diody zmieniają jasność jednocześnie, dlatego cała strzałka wygląda tak, jakby powoli pulsowała. Co ciekawe, do uzyskania tego efektu nie potrzeba ani mikrokontrolera, ani programu komputerowego. Wystarczy kilka odpowiednio połączonych elementów elektronicznych.

Układ jest zasilany napięciem stałym 12 V, doprowadzanym przez gniazdo X1. Dioda prostownicza D15 typu 1N4007 zabezpiecza go przed skutkami podłączenia zasilania o niewłaściwej biegunowości. Kondensator C1 o pojemności 10 µF filtruje napięcie zasilające, ograniczając jego krótkotrwałe wahania i zakłócenia. Napięcie to zasila zarówno obwód sterujący, jak i diody LED. Nie świecą one jednak stale z jednakową jasnością, ponieważ o przepływie prądu przez nie decyduje generator zbudowany z układu LM358 i kilku elementów pasywnych.

W niewielkiej obudowie układu LM358 znajdują się dwa wzmacniacze operacyjne. W pulsującej strzałce współpracują one jako generator przebiegu trójkątnego. Pierwszy wzmacniacz (US1B) pełni funkcję komparatora, który przełącza się między dwoma stanami napięcia wyjściowego. Drugi (US1A) pracuje jako układ całkujący, przekształcający te skokowe zmiany w napięcie stopniowo narastające i opadające. Oba wzmacniacze są połączone w taki sposób, że proces ten powtarza się samoczynnie, wywołując kolejne cykle rozjaśniania i przygasania diod LED.

Co oznacza nazwa „przebieg trójkątny”? Wyobraź sobie napięcie, które stopniowo wzrasta, następnie maleje i ponownie zaczyna wzrastać. Gdybyśmy przedstawili te zmiany na wykresie, zobaczylibyśmy charakterystyczne wznoszące się i opadające odcinki przypominające boki trójkątów. Właśnie taki sygnał wytwarza generator zbudowany z użyciem US1. Rezystory R15 i R16 tworzą dzielnik napięcia, który ustala poziom odniesienia dla obu wzmacniaczy. Rezystor R18 zapewnia dodatnie sprzężenie zwrotne komparatora US1B, natomiast R19 doprowadza do niego napięcie z wyjścia układu całkującego US1A. Wspólnie rezystory

eprasa.pl fb05997b40



Rysunek 12. Schemat ideowy układu

te określają warunki przełączania komparatora. Z kolei rezystor R20 i kondensator C2 decydują o szybkości narastania i opadania napięcia wyjściowego US1A. Dzięki takiej współpracy elementów generator samoczynnie wytwarza powtarzający się przebieg trójkątny.

Sygnał wytwarzany przez generator steruje tranzystorem T1 typu BC817, pracującym w układzie wtórnika emiterowego. Jego baza otrzymuje sygnał z wyjścia US1A przez rezystor R17 o wartości 220 Ω, a emiter zasila diody LED. W takim układzie napięcie emitera podąża za zmianami napięcia bazy, pozostając od niego nieco niższe. Dzięki temu, gdy napięcie na wyjściu generatora wzrasta, zwiększa się prąd płynący przez diody LED, które stopniowo świecą coraz jaśniej. Gdy napięcie maleje, diody przygasają. Tranzystor odciąża przy tym wyjście wzmacniacza operacyjnego, umożliwiając sterowanie większym prądem, niż mógłby on dostarczyć bezpośrednio.

Czternaście diod D1...D14 podzielono na siedem gałęzi. W każdej znajdują się dwie diody LED oraz jeden rezystor ograniczający prąd. Są to rezystory R1...R7 o wartości 390 Ω. Dzięki nim prąd płynący przez poszczególne pary diod nie wzrasta nadmiernie. Wszystkie siedem gałęzi jest sterowanych wspólnie, dlatego cała strzałka rozjaśnia się i przygasa w tym samym rytmie. Po zakończeniu jednego cyklu generator rozpoczyna następny i efekt powtarza się automatycznie. Strzałka nie ma żadnych ruchomych części, a wrażenie pulsowania powstaje wyłącznie dzięki płynnym zmianom jasności diod LED.

Podsumowanie

I proszę bardzo! Czternaście żółtych diod LED tworzy strzałkę, która rytmicznie rozjaśnia się i przygasa. Jeszcze niedawno mieliśmy przed sobą płytkę i garść niewielkich elementów, a teraz możemy podziwiać gotowy, działający układ. Szczególną satysfakcję daje świadomość, że wszystkie te maleńkie części znalazły się na swoich miejscach dzięki naszej pracy.

Tym razem największym wyzwaniem nie była liczba elementów, lecz ich rozmiary. Poznaliśmy technikę montażu powierzchniowego SMT i przekonaliśmy się, czym różni się lutowanie elementów SMD od dobrze już znanego montażu przewlekanego THT. Ćwiczyliśmy rozpoznawanie oznaczeń rezystorów, ustawianie drobnych elementów na polach lutowniczych oraz lutowanie tranzystora w obudowie SOT-23 i układu scalonego w obudowie SO-8. Trzeba było również zwrócić uwagę na właściwe ustawienie elementów wymagających określonej orientacji podczas montażu.

Praca z elementami SMD uczy czegoś jeszcze: cierpliwości. Niewielki rezystor nie zawsze chce pozostać dokładnie tam, gdzie go położymy, a zbyt duża ilość spoiwa lutowniczego potrafi utrudnić wykonanie poprawnego połączenia. Warto więc pracować spokojnie, kontrolować ułożenie elementów i sprawdzać wykonane luty. Taka dokładność przydaje się nie tylko podczas składania zestawów edukacyjnych, lecz także przy budowie bardziej rozbudowanych urządzeń elektronicznych.

Poznaliśmy również ciekawy przykład elektroniki, która potrafi samodzielnie wytwarzać powtarzający się sygnał. Dwa wzmacniacze operacyjne zawarte w układzie LM358 tworzą generator przebiegu trójkątnego. Jego sygnał steruje tranzystorem BC817, a ten wpływa na prąd płynący przez siedem gałęzi diod LED. W rezultacie wszystkie diody zmieniają jasność wspólnie, w stałym rytmie. Nie potrzeba do tego ani mikrokontrolera, ani programu komputerowego.

Warto teraz przyjrzeć się działającej strzałce. Zauważ, że diody nie zapalają się kolejno, jedna po drugiej. Zamiast tego cała strzałka stopniowo rozjaśnia się, a następnie przygasa. Spróbuj zaobserwować moment, w którym świeci najjaśniej, i ten, w którym rozpoczyna kolejny cykl. To prosty sposób, aby zobaczyć, jak zmieniający się sygnał elektryczny może wpływać na jasność światła.

Możesz też pokazać gotowy układ komuś, kto jeszcze nie miał okazji lutować elementów SMD. Najpierw niech obejrzy świecącą strzałkę, a potem drugą stronę płytki. Niewykluczone, że bardziej niż samo pulsowanie zaskoczą go rozmiary elementów, które odpowiadają za ten efekt. To dobra okazja, żeby wyjaśnić, że nawet niewielki układ elektroniczny może wykonywać całkiem interesujące zadanie.

A jeśli podczas montażu zdarzyło ci się pomyśleć, że niektóre elementy są stanowczo za małe, by dało się je wygodnie przylutować, spójrz jeszcze raz na gotową płytkę. Każdy poprawnie wykonany lut to zdobyte doświadczenie. Przy następnym spotkaniu z elementami SMD ich rozmiary mogą już nie robić tak wielkiego wrażenia. I właśnie to jest chyba najlepszy rezultat dzisiejszych zajęć: oprócz pulsującej strzałki zyskujemy nowe umiejętności, które zostaną z nami na dłużej.

Na dziś odkładamy lutownice. Ale kto wie, jakie jeszcze elektroniczne maleństwa trafią pod nie w kolejnych odcinkach Juniora? ■

Mariusz Ciszewski

Lutowanie komponentów SMD do płytki drukowanej:

https://serwis.avt.pl/manuals/AVTEDUSMD.pdf

eprasa.pl fb05997b40



Procesor Dźwięku z Efektem 3D

Prezentowany projekt to procesor dźwięku 3D, który odtwarza trójwymiarowe brzmienie w głośnikach stereo. Cechuje się szerokim zakresem napięcia zasilania, dużą dynamiką oraz niskim poziomem szumów wyjściowych, co czyni go odpowiednim do wszelkich zastosowań audio. Ten niewielki moduł pozwala wzbogacić Twój kolejny projekt o efekty dźwięku 3D. W skrócie – ten miniaturowy, niedrogi moduł bazuje na układzie PT2387 i przekształca sygnał audio stereo w dźwięk z efektem 3D. Układ jest wyposażony w specjalnie zaprojektowany filtr PTC HRTF i dzięki obwodowi poszerzającemu przestrzeń zapewnia doskonałą jakość oraz wydajność dźwięku.



Bezprzewodowy monitor natężenia światła – nadajnik

Projekt ten umożliwia użytkownikom bezprzewodowe monitorowanie natężenia światła na kompaktowym wyświetlaczu OLED o przekątnej 0,96 cala. Pomiar natężenia światła odbywa się za pomocą fotoczujnika OPT101, który generuje napięcie wyjściowe proporcjonalne do ilości padającego światła, które jest odczytywane przez przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC) mikrokontrolera ATMEGA328. Mikrokontroler przetwarza dane i przesyła je bezprzewodowo za pośrednictwem modułu radiowego RF 433 MHz. Dane są odbierane i wyświetlane na ekranie OLED w postaci wartości procentowej w zakresie od 0 do 100%. Ten innowacyjny system pozwala na zdalne śledzenie zmian natężenia światła, co czyni go użytecznym narzędziem w różnorodnych zastosowaniach.

Niektóre projekty aktualnie dostępne tylko dla prenumeratorów EdW w rubryce DIY PLUS na www.elportal.pl:

1. Sterownik grzałki PWM
2. Liniowy sterownik LED z opcją ściemniania
3. 3-przewodowy przedwzmacniacz mikrofonu elektretowego
4. Nakładka Sound to Light Color Shield dla OLEDUINO v2
5. Mini Power Monitor Shield dla OLEDUINO v2 z układem INA219
6. Uniwersalna nakładka sterownika silników (Motor Driver Shield) dla OLEDUINO v2
7. Płytka sterująca silnikami elektromagnetycznymi i prądu stałego do OLEDUINO v2
8. Moduł elektronicznej wagi do OLEDUINO v2
9. Wszechstronny odbiornik światłowodowy Versatile Link
10. Wszechstronny nadajnik światłowodowy Versatile Link
11. Bezprzewodowy kontroler samochodu-robota Bluetooth
12. Kontroler ramienia robotycznego wykorzystujący bezprzewodowego pada z konsoli PS3
13. 7-segmentowy mini zegar wykorzystujący PIC16F628A i DS1307 RTC
14. Światło LED oparte na czujniku zbliżeniowym
15. OLEDUINO – wyświetlacz OLED kompatybilny z Arduino
16. Inteligentny regulator lutownicy – precyzyjny regulator grzałki
17. Wskaźnik poziomu paliwa z wyświetlaczem OLED
18. Bezprzewodowy odbiornik wilgotności i temperatury
19. Przerwania zewnętrzne (sprzętowe) i przerwania zegara w MicroPython
20. Laserowy czujnik odległości z wyświetlaczem OLED i RP2040
21. Inklinometr z 17-segmentowym wyświetlaczem słupkowym
22. Izolowany repeater USB – USB 2.0
23. Knight Rider Light – 16 diod LED dużej mocy (kompatybilny z Arduino)
24. Dźwięk do kolorowych efektów świetlnych (kompatybilny z Arduino)
25. Nowy i ulepszony licznik Geigera – teraz z Wi-Fi!
26. Detektor zalania
27. Lampa nastrojowa LED o dużej mocy
28. Kontroler dzwonów kościelnych
29. Arduino Nano – włączanie/wyłączanie urządzeń za pomocą pilota na podczerwień (dwa kanały)
30. Lampa sufitowa LED z czujnikiem ruchu PIR – kompatybilna z Arduino
31. Inteligentny ściemniacz LED z Bluetooth – 4-kanałowy włącznik/wyłącznik Bluetooth
32. Czterokanałowy izolator cyfrowy, wzmocniony, szybki, o niskim poborze mocy
33. Sterowanie prędkością, kierunkiem i zatrzymaniem silnika DC z modułem RF NRF24L01
34. Nadajnik zdalnego sterowania z pojedynczym joystickiem wykorzystujący NRF24L01
35. 8-kanałowy zdalny nadajnik RF z protokołami: Holtek i szeregowym
36. 8-kanałowy zdalny odbiornik RF z protokołami: Holtek i szeregowym
37. Pojemnościowy czujnik wilgotności do konwertera wyjścia analogowego
38. Mostek H dla wysokiej mocy szczotkowego silnika prądu stałego z czujnikiem prądu
39. Przetwornica DC-DC buck 12...75 V na 10 V na wyjściu
40. Czujnik prądu low-side 10 µA...10 mA
41. Kontroler ramienia robota z bezprzewodowym pilotem PS3
42. Termiczny czujnik masowego przepływu powietrza – anemometr stałotemperaturowy
43. Precyzyjny wzmacniacz transimpedancyjny z przełączanym integratorem
44. 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:
AVT-Korporacja 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 fb05997b40

KURS PRAKTYCZNY AI

Praktyczne podejście. Zero marketingowej mgły!







Zyskaj **15%** rabatu

W prenumeracie tylko

~~116,00 zł~~

98,60 zł

prenumerata drukowana 4 kolejnych wydań

(zima 2026, wiosna, lato, jesień 2027)

Zamów na www.UlubionyKiosk.pl

lub zeskanuj kod QR i zaprenumeruj w 1 minutę

Wydania archiwalne (wiosna, lato, jesień 2026)
są dostępne na www.UlubionyKiosk.pl

eprasa.pl fb05997b40