Edukacja w EdW dla szkół i uczelni:
Wykład 32 – wyładowania elektrostatyczne

JUNIOR

strona 77

ELEKTRONIKA dla wszystkich

nr 8/2025 (355) • sierpień • www.elportal.pl

DIY PLUS tylko dla prenumeratorów

PROJEKTY dla elektroników

- Prosty inwerter/podwajacz napięcia
- Wielostopniowa ładowarka akumulatorów z przetwornicą Buck-Boost
- Jak zbudowałem trzydziestomilimetrową cewkę Tesli z iskiernikiem

DIY dla wszystkich

- Twój własny superkomputer
- E-papierowy zegar z mikrokontrolerem ESP32

TUTORIALE

- Rekonstrukcja nadajnika radiowego Sputnika, część 2
- Audio OUT: Transformatory w audio, część 3
- Ekscytacje Maxa: Migające diody LED i śliniący się inżynierowie, część 23

Dwukanałowy zasilacz do płytek stykowych

Wielostopniowa ładowarka akumulatorów z przetwornicą

ISSN 1425-1698 Indeks 33362X
9 771425 169252 08
18,90 zł (w tym 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 7d549de06

KOCHAM SZACHY

Niezwykłe kompendium dla miłośników szachów Dzieło 10 lat publikacji charyzmatycznego Autora dr. inż. Jana Sobótki w kultowej rubryce „Młodego Technika”

przejrzyj i kup na
https://ulubionykiosk.pl/promocje/16925-kocham-szachy

–20%
NA START
181,40 zł

–30%
po pierwszym roku prenumeraty
158,80 zł

–40%
po drugim roku prenumeraty
136,10 zł

–50%
po trzecim roku nieprzerwanej prenumeraty
113,40 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 20%** 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 126,90 zł.

Dodatkowa oferta dla prenumeratorów wersji drukowanej: jeśli już subskrybujesz wersję papierową, możesz dokupić równoległe e-wydania w cenie 36,20 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

Sierpień 2025 • 8 (355)

8

23

18

70

31

74

Projekty dla elektroników:

Dwukanałowy zasilacz do płytek stykowych, część 1 8

Podwajacz i generator napięcia ujemnego z układem 555 18

Jak zbudowałem trzydziestomilimetrową cewkę Tesli z iskiernikiem 23

Wielostopniowa ładowarka akumulatorów z przetwornicą Buck-Boost 31

Tutoriale:

Rekonstrukcja nadajnika radiowego Sputnika, część 2 41

Edukacja w EdW dla szkół i uczelni:

Wykład 32 – Wyładowania elektrostatyczne (ESD) 53

Audio OUT: Transformatory w elektroakustyce, część 3 60

Ekscytacje Maxa: Migające diody LED i śliniący się inżynierowie (23) 65

DIY dla wszystkich:

Twój własny superkomputer 70

E-papierowy zegar z mikrokontrolerem ESP32 74

Elektronika dla Wszystkich – Junior:

Czternaste spotkanie z najmłodszymi pasjonatami elektroniki 77

Na zdjęciu na okładce Karol. Młodzi Entuzjaści Elektroniki, Szkoła Podstawowa nr 86, Wrocław

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

Knight Rider Light – 16 diod LED dużej mocy (kompatybilny z Arduino) 90

Dźwięk do kolorowych efektów świetlnych (kompatybilny z Arduino) 90

Rubryki stałe:

Prenumerata 3

Od redakcji 5

Poczta 6

eprasa.pl 7d549de066

Sierpień – miesiąc słońca i burz!

Sierpień to miesiąc pełen słońca, ale też… napięcia wiszącego w powietrzu, zanim spadnie ulewny deszcz. W przyrodzie lato osiąga swoje apogeum – promienie słońca rozgrzewają asfalt do granic wytrzymałości, powietrze drży od energii, a burze przetaczające się nad krajem zostawiają po sobie nie tylko ściany deszczu, lecz także widowiskowe wyładowania atmosferyczne. Trudno o lepszy czas, by zająć się tematem, który – choć w skali laboratoryjnej – równie skutecznie budzi respekt i fascynację: cewką Tesli.

Otwierający ten numer artykuł to relacja z budowy klasycznej, niewielkiej cewki Tesli z iskrownikiem, toroidem i zasilaniem z transformatora neonowego. Choć całość mieści się na biurku, generowane wyładowania mają moc, której nie sposób zignorować – zarówno pod względem wizualnym, jak i inżynierskim. To nie gotowa instrukcja krok po kroku, ale opowieść o pasji, determinacji i naukowym rzemiośle. Zresztą, jak przystało na konstrukcję wysokiego napięcia, wszystko tu iskrzy: od transformatora, przez rezonans, po końcowy efekt świetlny. W sierpniu – miesiącu pełnym energii – taka iskra inspiracji pasuje idealnie.

Skoro mowa o iskrach, warto wspomnieć również o tych, których nie widać – a które bywają na co dzień znacznie groźniejsze. Wyładowania elektrostatyczne (ESD) to mikroskopijne błyskawice o potencjale destrukcyjnym większym, niż mogłoby się wydawać. W wykładzie poświęconym ESD omawiamy nie tylko przyczyny i skutki tych wyładowań, lecz także metody ochrony, testowania i projektowania odpornych układów. To wiedza praktyczna, która przyda się każdemu, kto projektuje, naprawia lub po prostu eksperymentuje z układami elektronicznymi.

Eksperymenty to zresztą słowo-klucz tego wydania. Wśród projektów znajdziesz dwukanałowy zasilacz do płytek stykowych – wygodny, zgrabny i funkcjonalny, idealny do prototypowania. Dla tych, którzy chcą z prostych elementów uzyskać więcej, mamy przetwornicę z układem 555, potrafiącą podwoić napięcie, lub wygenerować ujemne. Jeszcze więcej możliwości otwiera inteligentna ładowarka oparta na przetwornicy Buck-Boost, z pełną kontrolą parametrów ładowania i wyświetlaczem OLED.

Zupełnie inny wymiar eksperymentu przynosi rekonstrukcja nadajnika Sputnika – druga część tej fascynującej relacji przenosi nas nie tylko w czasie, ale i w przestrzeni: z powrotem na orbitę, jak w 1957 roku. To szczegółowy opis budowy repliki historycznego modułu D-200, odtworzonego na podstawie dokumentacji ZSRR i zrealizowanego z użyciem lamp, cewek oraz innych autentycznych komponentów z epoki.

Jeśli bliższe są Ci zagadnienia audio, nie możesz przegapić trzeciej części serii o transformatorach audio. Autor pokazuje, jak sekcjonowanie, ekranowanie i impregnacja wpływają na parametry pracy toru audio – to wiedza bezcenna dla konstruktorów lampowych wzmacniaczy, a także wszelkich układów audio wysokiej jakości.

Dla miłośników światła mamy migoczące LED-y w stylu retro – projekt oparty na macierzy WS2812B i Arduino, przypominający klimatem lata 70. A dla tych, którzy chcą połączyć elektronikę z programowaniem – domowy superkomputer z Raspberry Pi, chłodzony cieczą i korzystający z obliczeń równoległych.

Na spokojniejsze zakończenie – zegar na e-papierze z ESP32, energooszczędny, wyraźny i efektowny. Idealny do zasilania z paneli słonecznych i montażu na zewnątrz – np. na przystankach, ulicach lub w parkach. I oczywiście, coś dla młodszych konstruktorów: TermoEmotek – prosty, edukacyjny układ, który pokazuje, że temperatura, i zimą, i latem, również może przekładać się na emocje.

Przed tobą prawdziwa burza pomysłów i eksperymentów. Zapraszamy do lektury!

Mariusz Ciszewski

A za miesiąc we wrześniowym EdW

Monofoniczny wzmacniacz klasy D o mocy ponad 1 kW, część 1
Potężny i zaskakująco kompaktowy – ten wzmacniacz klasy D to idealna propozycja dla tych, którzy potrzebują dużej mocy przy rozsądnych kosztach. Na bazie gotowego modułu IRAUDAMP9 od International Rectifier oraz sześciu zasilaczy impulsowych uzyskano ponad 1 kW mocy przy sprawności sięgającej 97%! Świetna baza pod systemy przeznaczone do nagłaśniania przestrzeni publicznych, aktywne subwoofery czy wzmacniacze do instrumentów muzycznych. Wszystko mieści się w... metalowej skrzynce narzędziowej!

Dwukanałowy zasilacz do płytek stykowych, część 2
W tej części omówiony zostanie wyświetlacz do kompaktowego zasilacza do płytek stykowych, który zapewnia podgląd napięcia, prądu oraz mocy strat dla obu kanałów. Moduł LCD 20×4 mieści się dokładnie nad zasilaczem, nie zajmując dodatkowego miejsca na stole. Oprócz podstawowych parametrów, prezentuje też dane z czterech niezależnych kanałów pomiarowych oraz dwóch dodatkowych kanałów do pomiaru prądu w obwodach zewnętrznych. Dzięki alarmom dźwiękowym i wskaźnikom LED, od razu wiadomo, gdy coś idzie nie tak.

Aktywny układ miękkiego startu, część 1
Skuteczne zabezpieczenie przed udarami prądowymi przy włączaniu dużych transformatorów i zasilaczy. Zamiast termistora NTC zastosowano przekaźnik z układem opóźnionego załączenia, co zwiększa trwałość i niezawodność. Rozwiązanie idealne do elektronarzędzi, wzmacniaczy i sprzętu warsztatowego. Prosty montaż i łatwa adaptacja do różnych zastosowań.

Idealny mostek prostowniczy – bez strat i bez kompromisów
Tradycyjne diody prostownicze mają swoje ograniczenia – spadki napięcia, grzanie się i straty mocy. Ten projekt pokazuje, jak zbudować mostek Graetza oparty na tranzystorach MOSFET sterowanych aktywnie, który eliminuje te problemy. Efekt? Szybka reakcja, niskie straty i znacznie lepsza wydajność, szczególnie przy niskim napięciu wejściowym. Idealne rozwiązanie dla nowoczesnych zasilaczy.

Wartościowe Tutoriale
Projekty DIY
Juniorzy EdW złożą kolejny zestaw z serii AVTEDU

W kioskach od 28 sierpnia

eprasa.pl 7d549de066

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.

Chciałem, to mam – egzamin poprawkowy

Piszę do Was trochę z głupawki, bo jeszcze niedawno myślałem, że wszystko ogarnę na czas i „na luzie". Wiecie, cały rok powtarzałem sobie: „spokojnie, jeszcze mam czas", „jakoś to będzie", „przecież i tak wszystko zaliczę". No i... nie zaliczyłem jednego przedmiotu. Nie piszę jakiego, bo wstyd. Jak do tego doszło? Nie wiem – jak w tej krindżowej piosence. I teraz się odzywam, sam nie wiem, czy bardziej po to, żeby samemu sobie dać z liścia, czy może po to by powiedzieć innym, że to naprawdę się może zdarzyć.

Cały czas myślałem, że w razie czego „przycisnę" pod koniec roku. Ale kiedy przyszedł koniec, to „przyciskałem", ale przyciski w padzie grając w niby ulubioną grę na konsoli. Nie ważne jaką. Nie wiem, czy bardziej jestem wściekły na siebie, czy na tę grę. Może na jedno i drugie. Za każdym razem wmawiałem sobie, że zasłużyłem na chwilę odpoczynku… Mocno z tym „odpoczywaniem" przesadzając. I mam co mam.

I nie, nie piszę tego, żeby się żalić. Chociaż może trochę. Serio – można się zagrać na samo dno. Wystarczy tylko raz odłożyć naukę „na potem", potem drugi, potem tydzień… i nagle jest lipiec, a ty masz zaległości po uszy, zero planu, zero motywacji i tylko jakiś głupi zapis gry z 300 godzinami na liczniku. Super, nie?

Nie piszę też, żeby jakoś przestrzegać, bo i tak nikt nie posłucha. Ja też bym nie posłuchał. No i teraz przypał. W każdym razie słuchanie myśli typu „jeszcze jedna rundka", mądre jednak nie było.

Także ten, tego.... Wyjścia nie ma i czekają mnie pracowite wakacje.

A jakbyście, nie wiem, znali jakieś rady na szybką naukę (ale nie takie z TikToka, że woda z cytryną i się uczysz szybciej), to serio skorzystam. Chociaż szczerze – nie wierzę w żadne magiczne metody. Ale pytam, bo może...

Dobra, nie przedłużam. Trzymajcie się i życzę dobrego. Serio.

I życzcie mi szczęścia. Przyda się.

Autor anonimowy

Red. Drogi Czytelniku,

dzięki za szczerą i odważną korespondencję. Nie będziemy grali roli kolejnego „opiekuna", który da Ci najlepsze rady, które prawdopodobnie znasz już na pamięć – a z których z takich czy innych powodów trudno Ci było skorzystać. Nie Ty pierwszy i nie ostatni, który uwierzył, że zdąży – a potem nie wyszło. Dalecy jesteśmy od moralizowania czy oceniania.

Skoro wspomniałeś o grze i padzie w ręku, mamy dla Ciebie coś, co może w miarę płynnie połączyć Twoją słabość do klikania z nauką – i to w taki sposób, że nie trzeba będzie od razu odcinać się od komputera, tylko przekierować energię gdzie indziej.

Zgłębiliśmy nieco temat i wygląda na to, że istnieją świetne, darmowe serwisy online do robienia własnych testów i quizów, które możesz tworzyć samodzielnie – np. na podstawie rozdziałów z podręcznika, tematów do poprawki albo notatek z zeszytu:

- Wayground – https://wayground.com/?lng=pl – działa jak gra. Robisz własne quizy albo korzystasz z gotowych, zdobywasz punkty, widzisz statystyki. Wszystko w lekkim, kolorowym stylu. Jest też wersja mobilna.
- Wordwall – https://wordwall.net/pl – prosta obsługa i różne typy zadań: testy ABCD, dopasowania, uzupełnianki. Sprawdza się przy nauce definicji, pojęć, dat czy słówek.
- Kahoot! – https://kahoot.com/pl/ świetny do wspólnej nauki z kolegą czy koleżanką. Możesz grać sam, ale też urządzić coś w rodzaju quizowej rozgrywki – nawet zdalnie.

Nie wiemy, czy w tak krótkim czasie te narzędzia pomogą rozwiązać problem, ale mogą być świetną alternatywą na przyszłość. Zamiast 300 godzin w grze, do której sam zaczynasz mieć wątpliwości, może warto mieć 300 godzin spędzonych na rozwiązywaniu quizów – własnych, opartych o podręcznik, ćwiczenia, pytania z lekcji.

Co więcej, taki quiz możesz potem udostępnić znajomym, pomóc komuś innemu w powtórce. A może nawet założysz bloga, na którym będziesz zbierać własne testy? Przy okazji sprawdzisz, czy taka metoda działa – czy może jednak potrzebujesz czegoś zupełnie offline, z dala od ekranu.

Te narzędzia wydają się być świetną alternatywą dla klasycznego grania – bo dalej klikasz i zdobywasz punkty, ale uczysz się efektywnie. Nawet jeśli jesteś w kryzysie przed sprawdzianem, kartkówką, egzaminem, zacznij od jednego krótkiego quizu dziennie. A na przyszłość – miej bazę testów, a nie sejwy gier, które już Cię nie kręcą.

Szczęście się przyda – ale jeszcze bardziej przyda się plan, choćby prosty.

Powodzenia. Sprawdź, co zadziała najlepiej.

Trzymamy kciuki.

Redakcja

Z kamerą na łowy

Droga Redakcjo,

coraz częściej łapię się na tym, że nie mam już ochoty składać projektów „do szuflady". Zamiast tego chętnie zabrałabym się za budowę urządzeń, które naprawdę się przydają – nie tylko działają, ale też zostają na dłużej i są w codziennym użyciu.

Marzy mi się na przykład elektroniczna zabawka dla papugi albo podajnik karmy dla kota. Można by w ten sposób połączyć przyjemne z pożytecznym – i dla zwierzaków, i dla samej konstruktorki.

Kiedyś rozważałam też budowę karmnika z automatycznym podajnikiem ziarna i fotopułapką o dobrej rozdzielczości, która dokumentowałaby wizyty skrzydlatych gości.

Fantastycznie byłoby również samodzielnie zbudować obrożę z GPS-em i malowaniem trasy w mapach Google – a może nawet z miniaturową kamerą – by rejestrować trasy moich dwóch kotów. Ciekawa jestem, którędy wędrują, gdy nie ma ich w domu.

Czy w przeszłości w czasopismach wydawnictwa AVT pojawiały się jakieś projekty związane ze zwierzętami? Z przyjemnością zajrzałabym do archiwum – albo spróbowała zrealizować coś nowego, jeśli pojawi się ciekawa inspiracja.

Z serdecznymi pozdrowieniami

Paulina

Red. Szanowna Pani Paulino,

bardzo dziękujemy za list – podzielamy Pani spojrzenie na sens konstruowania urządzeń, które mają zastosowanie w codziennym życiu. Radość z działania gotowego projektu i możliwość praktycznego wykorzystania to dla wielu osób największa motywacja do sięgnięcia po lutownicę.

Tematyka projektów dla zwierząt rzeczywiście nie pojawia się często, ale warto przypomnieć ciekawy przykład z archiwum siostrzanej „Elektroniki Praktycznej". W numerze 5/2017 ukazał się artykuł „Kot z dostępem do Internetu" (https://ep.com.pl/files//11941.pdf).

Autor z przymrużeniem oka opisał, jak za pomocą Raspberry Pi, modułu GSM i usług chmurowych stworzyć urządzenie pozwalające lokalizować kota i rozmawiać z nim przez telefon. Mimo żartobliwego tonu projekt zawiera praktyczne elementy: obsługę MQTT, Node.js i integrację z Amazon AWS – wszystko przedstawione przystępnie, także dla początkujących.

Niewykluczone, że podobne projekty z przeznaczeniem dla czworonożnych i futrzastych przyjaciół trafią na nasze łamy. Prosimy śledzić kolejne wydania.

Pani pomysły – karmnik z fotopułapką czy obroża z GPS-em i kamerą – znakomicie wpisują się w aktualne możliwości technologiczne i trend DIY. Zachęcamy do ich realizacji i być może… opisania własnych doświadczeń w formie artykułu. Chętnie pokażemy innym Czytelnikom, że pasja do elektroniki może mieć bardzo osobisty i „futrzasty" wymiar.

Redakcja

eprasa.pl 7d549de066

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%**

Kod ważny do 30.09.2025

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

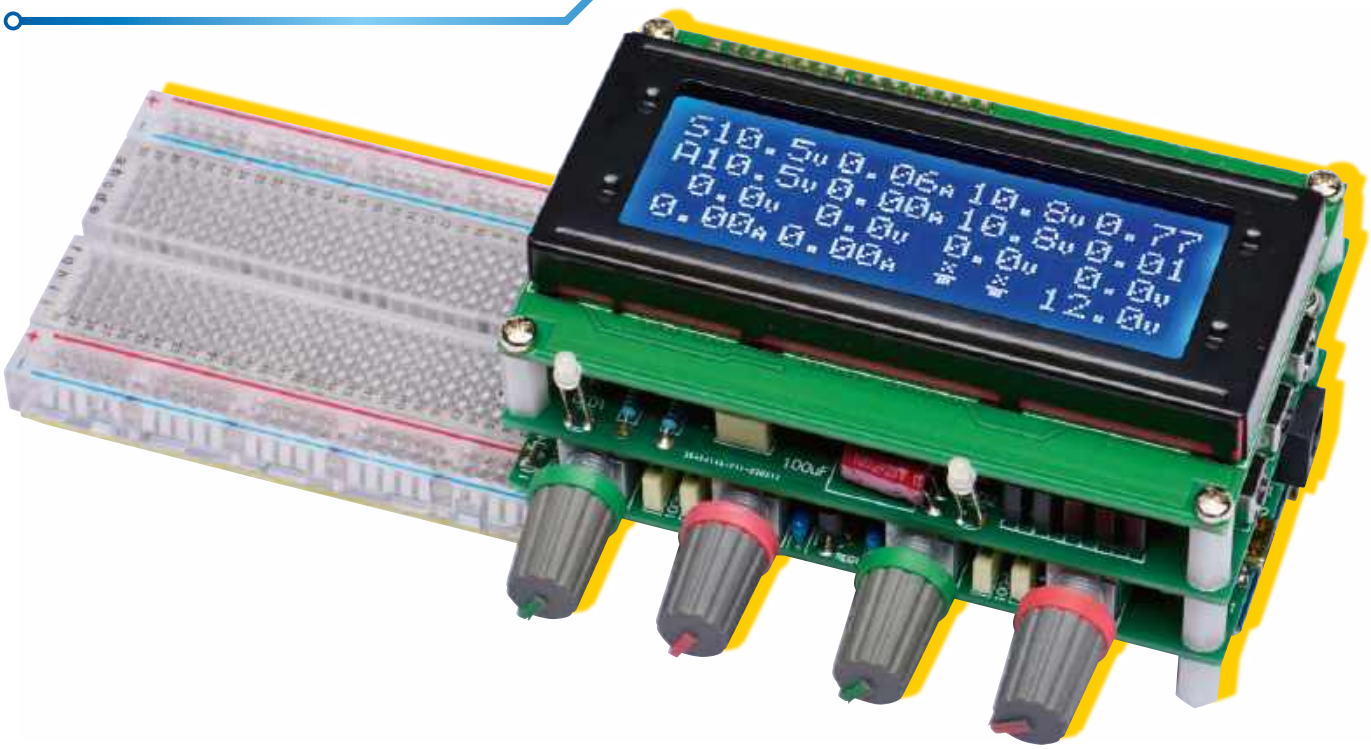
TRZECIARĘKA ZD-11M-3
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk – uchwyt z lupą i podświetleniem LED ZD-11M-3

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 7d549de066



Dwukanałowy zasilacz do płytek stykowych, część 1

Podczas budowy prototypu na płytce stykowej (breadboard) łatwo o nieład, a pomyłka przy podłączaniu zasilania może prowadzić do poważnych konsekwencji. Warto więc sięgnąć po opisany w artykule dwukanałowy zasilacz, zaprojektowany z myślą o pracy z płytkami stykowymi. Urządzenie to montuje się bezpośrednio na szynach zasilających. Oferuje dwa niezależne wyjścia o regulowanym napięciu i ograniczonym prądzie, a do tego może być zasilane z różnych źródeł. Już od dawna jest nieodzownym elementem naszego stanowiska warsztatowego.

Wiele prototypów wykonujemy na płytkach stykowych, ponieważ jest to najprostszy sposób testowania rozwiązań, zwłaszcza gdy konieczne są poprawki lub modyfikacje w układzie. Dzięki przewodom połączeniowym montaż przebiega szybko, a zmiany można wprowadzać wielokrotnie – bez konieczności lutowania.

Choć dostępne są niewielkie moduły zasilające, które po bezpośrednim umieszczeniu na płytce stykowej dostarczają napięcia 5 V i 3,3 V na szyny zasilające (na przykład modele oznaczone jako Jaycar XC4606 lub Altronics Z6355), mają one swoje ograniczenia. Najpoważniejsze z nich to możliwość pracy tylko z jednym napięciem oraz brak elastyczności i funkcji ograniczania prądu, które oferują typowe zasilacze laboratoryjne.

Postanowiliśmy więc zaprojektować niedrogie i łatwe w budowie urządzenie, które będzie pełnowartościowym zamiennikiem zasilacza laboratoryjnego, oferującym jego najważniejsze funkcje.

Efektem naszej pracy jest dwukanałowy zasilacz do płytek stykowych – prosty w konstrukcji, a zarazem niezwykle wszechstronny. Montuje się go bezpośrednio na końcu szyn zasilających płytki prototypowej, podobnie jak w przypadku prostszych modułów zasilających. W przeciwieństwie do nich oferuje jednak dwa niezależne wyjścia, co znacznie zwiększa jego możliwości.

Podobny projekt, zatytułowany „Zasilacz oparty na Arduino – kompaktowe rozwiązanie dla domowego warsztatu", został opisany na łamach czasopisma Silicon Chip (luty 2021, siliconchip.au/Article/14741 oraz w EdW 1/2024). Podobnie jak nasz zasilacz do płytek stykowych, umożliwia on uzyskanie napięcia

Cechy i specyfikacja:
- dwa niezależne kanały,
- każdy kanał dostarcza 0 V...14 V/0 A...1 A (w zależności od zasilania wejściowego i obciążenia),
- zasilanie 7 V...15 V DC lub USB 5 V DC,
- podłączany bezpośrednio do szyn zasilania płytki prototypowej,
- regulacja parametrów za pomocą czterech potencjometrów,
- opcjonalny moduł pomiarowy,
- wahania napięcia wyjściowego przy skokach obciążenia: <80 mV DC + 350 mV AC, 0 A...1 A,
- czas stanu nieustalonego: 300 µs, 0 A...1 A.

eprasa.pl 7d549de066

wyjściowego do 14 V przy prądzie do 1 A, jednak dysponuje tylko jednym wyjściem.

Ponieważ zasilacz ten jest sterowany za pośrednictwem komputera, można umieścić go w dowolnym, dogodnym miejscu. Elementy regulacyjne oraz wyświetlacz prezentowane są na ekranie monitora, dzięki czemu urządzenie nie zajmuje miejsca na stanowisku pracy. Całość oparto na płytce Arduino, która pełni rolę układu sterującego.

Nie ma jednak nic bardziej intuicyjnego niż możliwość ustawienia napięcia i prądu za pomocą zwykłych pokręteł. To szczególnie wygodne podczas pracy nad prototypem – właśnie w taki sposób działa nasz dwukanałowy zasilacz do płytek stykowych. Gdy testujesz układ bezpośrednio na płytce prototypowej, łatwy dostęp do elementów regulacyjnych ma duże znaczenie. Co więcej, zasilacz ten nie zwiększa istotnie rozmiaru całego zestawu.

Dwa niezależne kanały wyjściowe

Większość płytek stykowych ma co najmniej dwa zestawy szyn zasilających – po jednej parze z każdej strony. Uwzględniając ten fakt oraz to, że wiele układów wymaga dwóch różnych napięć (na przykład 3,3 V i 5 V albo 5 V i 12 V), uznaliśmy, że dodanie drugiego kanału zasilania będzie doskonałym rozwiązaniem.

Nawet gdy oba wyjścia pracują z tym samym napięciem, możliwość ich niezależnego wykorzystania – z osobnym ograniczeniem prądu – okazuje się przydatna podczas testowania i weryfikacji działania poszczególnych fragmentów układu.

Pomimo zdublowania wielu elementów układu, udało się zachować niewielkie rozmiary całego urządzenia. W podstawowej wersji zasilacz nie ma nawet wyświetlacza – jego obsługa sprowadza się do czterech pokręteł, którymi ustawia się napięcie oraz ograniczenie prądu dla każdego z dwóch kanałów.

Choć zasilacz jest w pełni funkcjonalny w tej postaci, możliwość obserwowania napięć i prądów wyjściowych podczas pracy nad prototypem stanowi istotną zaletę, zwłaszcza w trakcie testów i strojenia układu.

Działanie układu

Oba kanały zasilacza do płytek stykowych mają w dużej mierze identyczne układy, które pracują niezależnie od siebie. Uzupełniają je wspólne obwody zasilające, co zostało przedstawione na **rysunku 1** – zawiera on pełny schemat elektryczny całego urządzenia.

Można zauważyć, że w głównej części schematu, w lewym dolnym rogu, nie zastosowano scalonych stabilizatorów napięcia. Zamiast nich, podobnie jak we wspomnianym wcześniej zasilaczu opartym na płytce Arduino, stabilizacja napięcia na obu wyjściach realizowana jest za pomocą wzmacniaczy operacyjnych sterujących tranzystorami NPN w konfiguracji wtórników emiterowych (Q1 i Q3). Wzmacniacze te wykorzystują ujemne sprzężenie zwrotne, aby ustabilizować napięcie na bazach tranzystorów i tym samym utrzymać zadane napięcia wyjściowe.

Taki sposób stabilizacji wymaga starannego zaprojektowania, ponieważ musi zapewnić szybką reakcję na zmiany obciążenia przy jednoczesnym zachowaniu stabilności pracy, by uniknąć niepożądanych oscylacji. Na szczęście, dzięki zastosowaniu tranzystorów NPN w roli wtórników emiterowych, znacznie zmniejsza się przesunięcie fazowe, a układ zyskuje silne lokalne sprzężenie zwrotne. W efekcie wzmacniacze operacyjne muszą jedynie wprowadzać niewielkie korekty. Więcej informacji na temat tego rodzaju sprzężenia zostanie przedstawione w dalszej części artykułu.

Ponieważ nasze urządzenie ma być uniwersalne, przewidziano dwa różne sposoby jego zasilania. W dalszej części artykułu jako napięcie zasilania przyjmujemy wartość 15 V, choć dopuszczalne maksimum wynosi 16 V. Jest to najwyższe napięcie, jakie mogą bezpiecznie wytrzymać wszystkie elementy układu. Dokładna wartość tego napięcia nie jest jednak krytyczna – zakładamy, że większość użytkowników będzie korzystać z typowych zasilaczy stałonapięciowych o napięciu w zakresie 12...15 V, ponieważ są one łatwo dostępne.

Ponieważ maksymalne napięcie wyjściowe jest tylko o około 2 V niższe od napięcia zasilania, do uzyskania około 5 V na wyjściu wystarczy nawet zwykła bateria 9 V. Jest to szczególnie przydatne, gdy pracujemy z układami opartymi na mikrokontrolerach.

Przewidziano również osobną szynę 5 V dla elementów, które nie tolerują napięcia 15 V. Zworki JP1 i JP2 pozwalają skonfigurować źródła zasilania odpowiednio dla szyn 15 V i 5 V. Napięcia te mogą pochodzić z gniazda baryłkowego (CON1) lub z gniazda USB (CON2).

Napięcie stałe doprowadzone do złącza CON1 przechodzi przez diodę D1, która chroni układ przed odwrotną polaryzacją, a następnie trafia na jedno z wyprowadzeń zworki JP1. Umożliwia to bezpośrednie wykorzystanie tego napięcia do zasilania szyny 15 V.

To samo napięcie zasila również stabilizator liniowy 78L05 (REG1), współpracujący

Podobne moduły zasilające do płytek prototypowych są dostępne w ofercie firm Jaycar i Altronics. To niedrogie i wygodne rozwiązania, które umożliwiają wybór napięcia 5 V lub 3,3 V za pomocą przełącznika. Trzeba jednak pamiętać, że zapewniają one tylko jedno napięcie wyjściowe naraz i nie oferują możliwości jego regulacji ani ustawienia ograniczenia prądowego

z kondensatorem filtrującym na wejściu. Układ ten wytwarza napięcie 5 V, które przekazywane jest na jedno z wyprowadzeń zworki JP2.

Gdy zworki JP1 i JP2 ustawione są odpowiednio w pozycjach „REG" oraz „JACK", napięcie doprowadzone do złącza CON1 zasila obie szyny zasilające całego zasilacza do płytek stykowych.

Gdy zworki JP1 i JP2 zostaną ustawione w alternatywnych pozycjach „BST" i „USB", szyna 15 V zasilana jest z modułu MOD1, czyli przetwornicy podwyższającej napięcie (MT3608), zasilanej napięciem 5 V z gniazda USB. Przetwornica ta ma regulowane napięcie wyjściowe, które nie może być ustawione powyżej 16 V, aby nie przekroczyć dopuszczalnych parametrów układu.

Wspólne dla obu kanałów zasilacza są również inne elementy, takie jak dzielnik rezystorowy 51 kΩ/10 kΩ, który dostarcza przeskalowane napięcie z szyny 15 V do wyprowadzenia na złączu szpilkowym CON5 – umożliwia to zewnętrzne monitorowanie napięcia.

Oba kanały korzystają także z tego samego czterokanałowego układu monitorującego prąd bocznikowy INA4180 A1 (IC1), który współpracuje z kondensatorem filtrującym 100 nF. Układ ten, zasilany z szyny 5 V, służy do pomiaru prądu wyjściowego każdego z kanałów, a opcjonalnie także dwóch dodatkowych prądów przepływających przez wybrane punkty na płytce stykowej.

Dwa niezależne stabilizatory

Pozostała część układu jest niezależnie przypisana do jednego z dwóch kanałów i identyczna w obu przypadkach. Dlatego opiszemy działanie jednego kanału, używając oznaczeń w nawiasach do wskazania odpowiadających elementów w drugim.

Potencjometry 10 kΩ – VR1 (VR2) i VR3 (VR4) są podłączone do szyny 5 V i służą

eprasa.pl 7d549de066

odpowiednio do ustawiania napięcia wyjściowego oraz ograniczenia prądu.

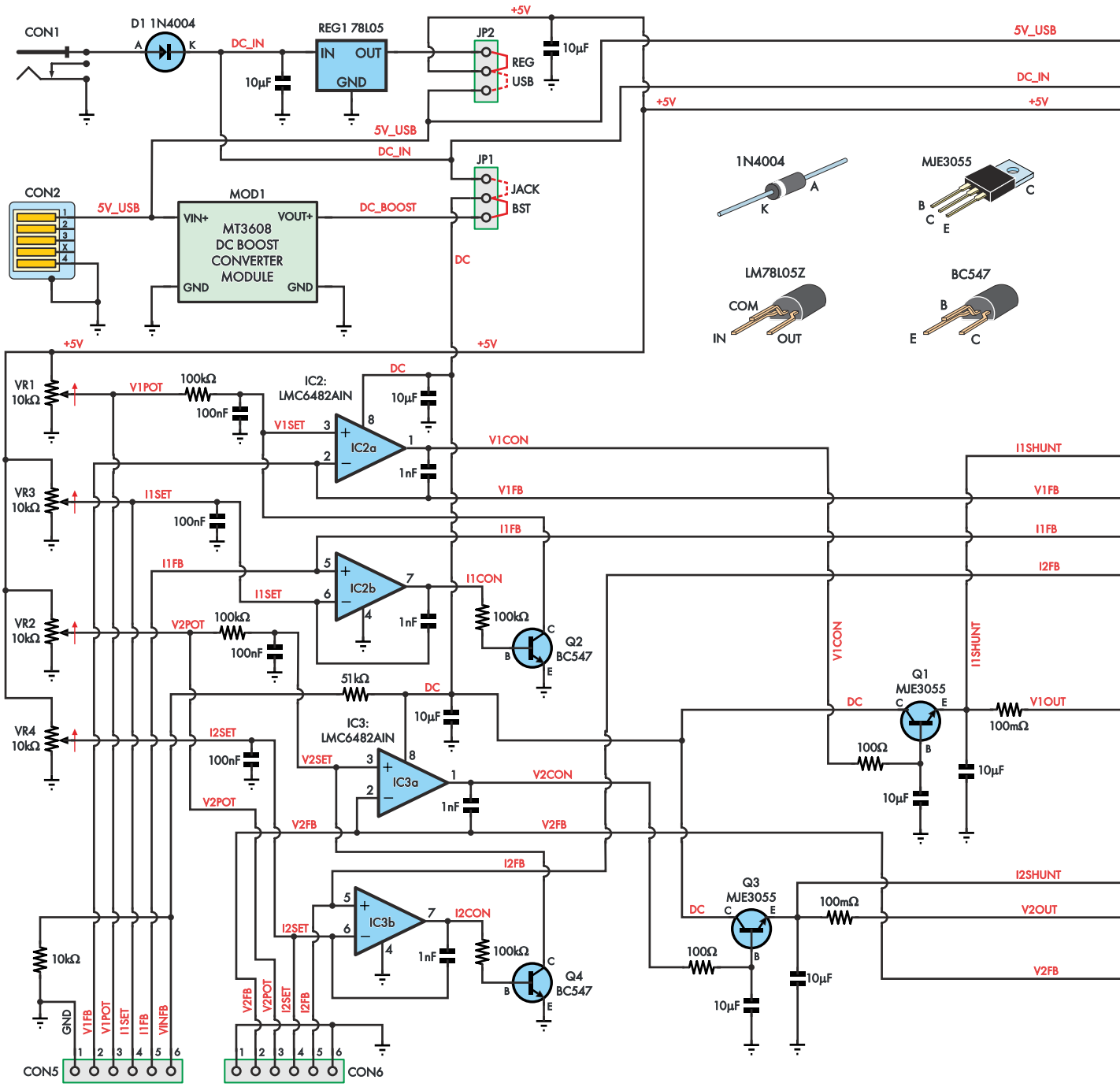
Napięcie sterujące z VR1 (VR2) przechodzi przez rezystor 100 kΩ i jest filtrowane przez kondensator 100 nF w celu eliminacji zakłóceń, natomiast napięcie regulujące prąd trafia bezpośrednio do własnego kondensatora 100 nF. Oba sygnały podawane są odpowiednio na wyprowadzenia 3 i 6 podwójnego wzmacniacza operacyjnego typu rail-to-rail IC2 (IC3).

Limit napięcia zasilającego 16 V, wynikający z dopuszczalnych parametrów wzmacniaczy operacyjnych, wyznacza maksymalne napięcie, jakie może obsłużyć cały układ.

Układ scalony IC2 (IC3) ma kondensator 10 μF dołączony między wyprowadzeniami zasilania 4 i 8, ponieważ można się spodziewać, że jego wyjścia będą musiały dostarczać stosunkowo duży prąd, zależnie od obciążenia zasilacza. Wzmacniacz jest zasilany z szyny 15 V oraz masy układu.

Napięcie doprowadzone do wejścia nieodwracającego (nóżka 3) jest porównywane z napięciem z wejścia odwracającego (nóżka 2), które pochodzi z dzielnika 51 kΩ/10 kΩ umieszczonego przy wyjściu CON3 (CON4). Napięcie na złączu CON3 (CON4) pochodzi z emitera tranzystora mocy NPN MJE3055 Q1 (Q3), po przejściu przez rezystor pomiarowy 100 mΩ.

Baza tranzystora Q1 (Q3) jest sterowana sygnałem z wyjścia wzmacniacza IC2 (IC3), z nóżki 1, przez rezystor 100 Ω, a następnie filtrowana przez kondensator 10 μF względem masy. Tworzy to filtr dolnoprzepustowy, który zapobiega powstawaniu ewentualnych oscylacji. Kolektor tranzystora Q1 (Q3) jest bezpośrednio połączony z szyną 15 V.



eprasa.pl 7d549de066

Gdy napięcie na bazie tranzystora Q1 (Q3) jest utrzymywane na stałym poziomie przez kondensator 10 μF, a napięcie wyjściowe na emiterze zaczyna spadać, napięcie baza–emiter automatycznie rośnie. Powoduje to zwiększenie prądu przewodzenia, a tym samym „podtrzymanie" napięcia wyjściowego. Analogicznie, jeśli napięcie na wyjściu wzrasta, napięcie baza–emiter maleje, co ogranicza przewodzenie tranzystora i powoduje spadek napięcia wyjściowego.

Takie lokalne sprzężenie zwrotne zapewnia szybką reakcję układu na nagłe zmiany obciążenia, stabilizując napięcie wyjściowe w krótkim czasie. Z kolei wolniejsze korekty napięcia bazy, wprowadzane przez wzmacniacz operacyjny, pozwalają na dokładniejsze dostrojenie w dłuższej skali czasowej, co dodatkowo poprawia stabilność pracy zasilacza.

Układ IC2a (IC3a) nieustannie dąży do wyrównania napięć na swoich wejściach – nieodwracającym (nóżka 3) i odwracającym (nóżka 2) – regulując napięcie wyjściowe na wyprowadzeniu 1. Napięcie obecne na złączu CON3 (CON4) jest więc przeskalowaną wersją napięcia na wejściu nieodwracającym układu IC2a (IC3a), a dzięki niskiej impedancji wyjściowej stanowi ono część obwodu odpowiedzialnego za regulację napięcia.

W typowych warunkach napięcie wyjściowe jest proporcjonalne – zgodnie z dzielnikiem rezystorowym 51 kΩ/10 kΩ – do wartości ustawionej przez potencjometr VR1 (VR2). W pewnych sytuacjach może się jednak od tej proporcji nieco różnić, co omówimy w dalszej części.

Kondensator 100 nF dołączony równolegle do rezystora sprzężenia zwrotnego 51 kΩ ułatwia szybką reakcję układu na zmiany obciążenia. Powoduje on, że początkowo do wejścia odwracającego (nóżka 2) układu IC2a (IC3a) trafia pełna zmiana napięcia wyjściowego, a nie jego przeskalowana wersja z dzielnika rezystorowego. Dzięki temu wzmacniacz może szybciej reagować na dynamiczne zmiany.

Z kolei kondensator 1 nF, włączony między wyprowadzenia 1 i 2 wzmacniacza IC2a (IC3a), tłumi ewentualne oscylacje, zwiększając skuteczność ujemnego sprzężenia zwrotnego przy wyższych częstotliwościach.

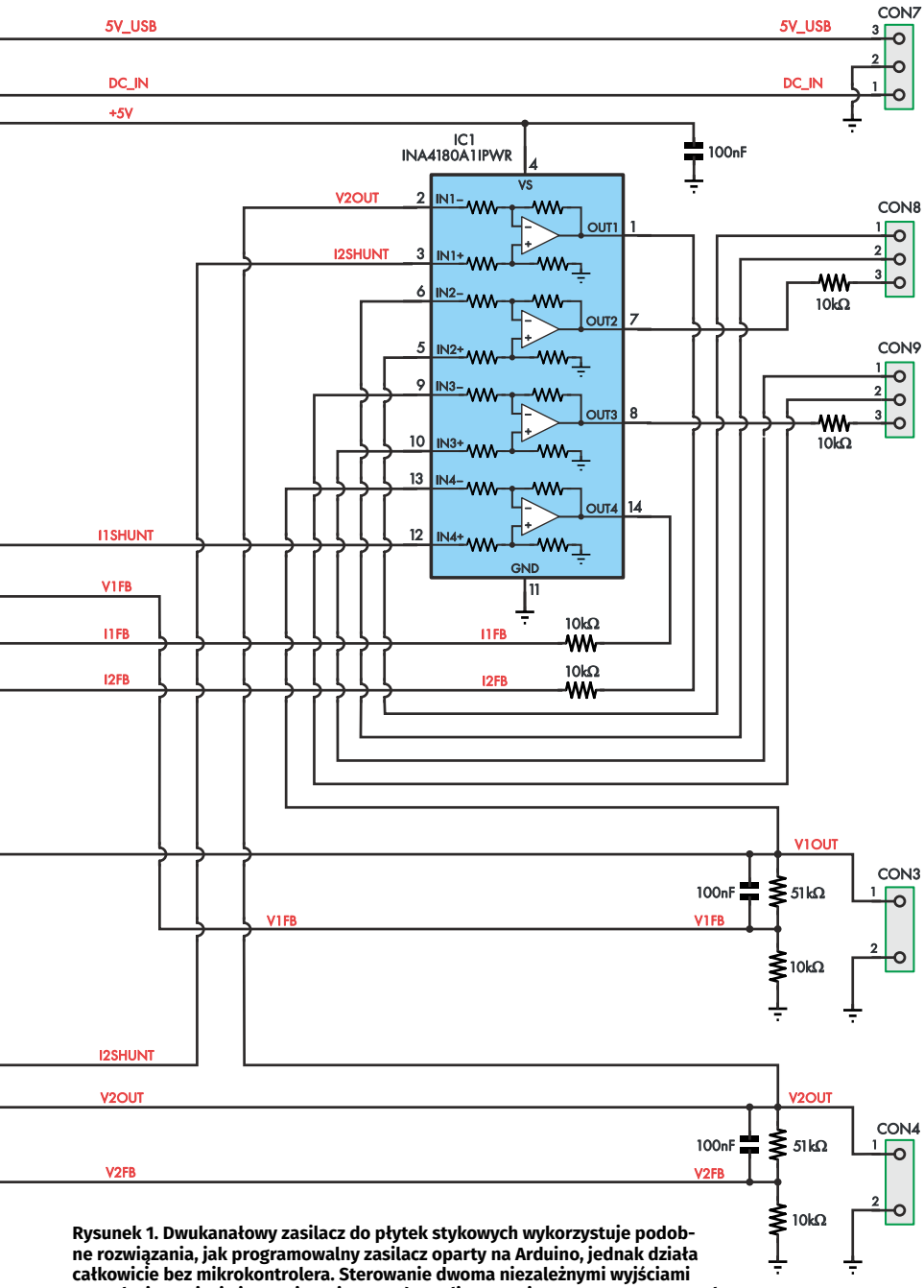
Wspomniany wcześniej rezystor bocznikowy 100 mΩ jest podłączony do wejść pomiarowych 12 i 13 (2 i 3) układu IC1 – czterokanałowego wzmacniacza różnicowego do pomiaru prądu. Układ ten generuje napięcie na swoim wyjściu (pin 14 lub 1), które jest 20-krotnie większe od różnicy napięć pomiędzy jego wejściami. To wzmocnione napięcie trafia następnie przez rezystor 10 kΩ do wejścia nieodwracającego (nóżka 5) wzmacniacza IC2b (IC3b).

Rezystor bocznikowy powoduje spadek napięcia 100 mV przy prądzie 1 A, co po 20-krotnym wzmocnieniu przez układ IC1 daje współczynnik przetwarzania 2 V/A na jego wyjściu.

Napięcie ustawiające wartość prądu, pochodzące z potencjometru VR3 (VR4), jest doprowadzone bezpośrednio do wejścia odwracającego (pin 6) wzmacniacza IC2b (IC3b). Wyjście tego wzmacniacza (pin 7) steruje bazą tranzystora NPN Q2 (Q4) przez rezystor 100 kΩ.

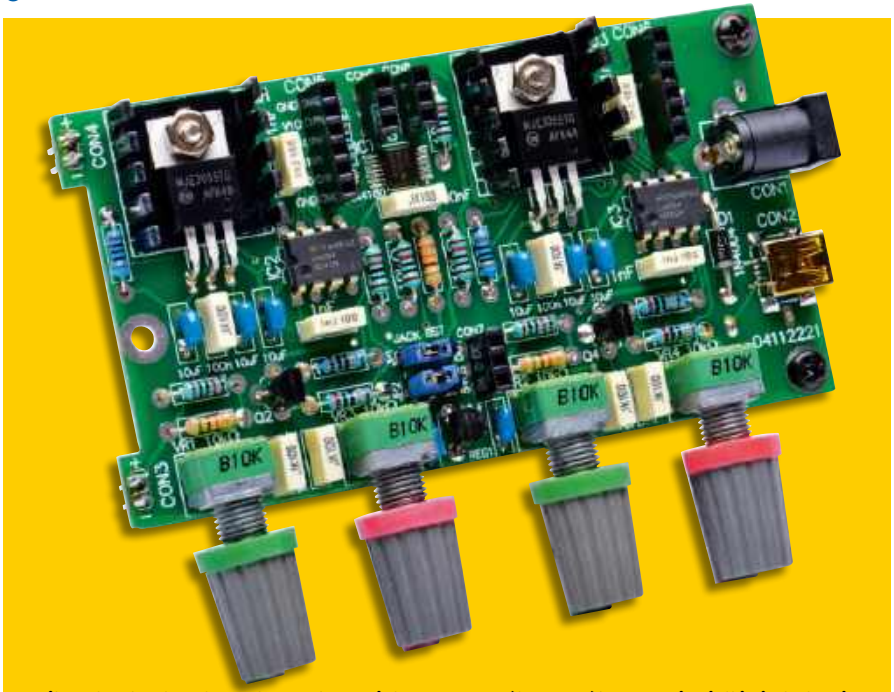
Emiter tranzystora Q2 (Q4) jest połączony z masą, natomiast jego kolektor łączy się z wejściem nieodwracającym (pin 3) układu IC2 (IC3), czyli z punktem ustalania napięcia wyjściowego.

Gdy prąd wyjściowy przekracza ustalony limit, napięcie na wejściu nieodwracającym (pin 5) układu IC2 (IC3) staje się wyższe niż napięcie na wejściu odwracającym (pin 6). Powoduje to wzrost napięcia na wyjściu (pin 7) wzmacniacza IC2b (IC3b), co włącza tranzystor Q2 (Q4). W efekcie napięcie



Rysunek 1. Dwukanałowy zasilacz do płytek stykowych wykorzystuje podobne rozwiązania, jak programowalny zasilacz oparty na Arduino, jednak działa całkowicie bez mikrokontrolera. Sterowanie dwoma niezależnymi wyjściami z regulacją napięcia i ograniczeniem prądu realizowane jest za pomocą czterech potencjometrów

eprasa.pl 7d549de066



Zasilacz do płytek stykowych został zaprojektowany z myślą o współpracy z niewielkimi płytkami prototypowymi z podłużnymi szynami zasilającymi, takimi jak Jaycar Cat PB8820. Jeden jego koniec opiera się na pinach złączy płytki prototypowej, a drugi wsparty jest na plastikowych tulejach dystansowych z gwintem

odniesienia jest obniżane, aż prąd przestanie przekraczać ustalony próg.

Dodatkowy kondensator 1 nF, umieszczony między wyprowadzeniami 6 i 7 układu IC2 (IC3), tłumi oscylacje w pętli sprzężenia zwrotnego odpowiedzialnej za regulację prądu – podobnie jak to ma miejsce w pętli regulacji napięcia.

Teoretycznie domyślna konfiguracja układu odpowiada ustawieniu pełnej skali napięcia rzędu 30,5 V przy użyciu potencjometru VR1 (VR2) oraz maksymalnego prądu około 2,5 A dla potencjometru VR3 (VR4). W praktyce nie zakładamy jednak osiągania tych wartości. Dzielniki napięcia dobrano przede wszystkim w taki sposób, aby napięcia w pętlach sprzężenia zwrotnego i sterowania nie przekraczały 3,3 V. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie zewnętrznego układu monitorującego z zakresem wejściowym 0...3,3 V.

Gdyby układ REG1 został zastąpiony zgodnym pod względem wyprowadzeń stabilizatorem 3,3 V (zdolnym do pracy przy napięciu wejściowym co najmniej 16 V), wówczas maksymalne ustawienia napięcia i prądu wynosiłyby odpowiednio 20 V i 1,65 A. Takie rozwiązanie miałoby dodatkową zaletę – elementy regulacyjne byłyby mniej czułe, co ułatwiłoby precyzyjne ustawienie parametrów zasilania.

Opcje zasilania

Najlepsze parametry pracy uzyskuje się przy zasilaniu przez złącze CON1 napięciem stałym w zakresie 12...15 V, ponieważ stabilizator 5 V (REG1) będzie wówczas pracował z większym zapasem i zapewni lepszą stabilność napięcia niż typowe napięcie 5 V pochodzące z zasilacza USB. Zasilanie przez USB może być natomiast wygodne, choć zastosowany moduł przetwornicy podwyższającej może wymuszać duży pobór prądu z portu USB, co przy przeciążeniu może prowadzić do zakłóceń lub niestabilnej pracy.

Jeśli planujemy zasilać urządzenie wyłącznie przez złącze CON1, można pominąć zarówno gniazdo USB, jak i moduł MOD1, a zworki ustawić na stałe w odpowiednich pozycjach.

Pozostałe złącza, oznaczone jako CON5...CON9, nie są wykorzystywane podczas pracy zasilacza w trybie samodzielnym. Mogą jednak posłużyć do połączenia z płytą główną wyświetlacza, jeśli zdecydujemy się rozszerzyć funkcjonalność urządzenia.

Jeśli zdecydujemy się na montaż tych złączy, należy zastosować złącza szpilkowe. Pasują one nie tylko do gniazd znajdujących się na płytce wyświetlacza, ale także umożliwiają wygodne podłączenie standardowych przewodów połączeniowych, co ułatwia integrację tych sygnałów z układem na płytce stykowej.

W przypadku chęci wykorzystania tych złączy do innych celów, warto wiedzieć, że CON5 i CON6 są połączone z większością sygnałów niskonapięciowych omawianych wcześniej. Złącze CON7 przekazuje napięcie zasilające doprowadzone do CON1 i CON2, natomiast CON8 i CON9 zapewniają dostęp do dwóch rezerwowych kanałów pomiarowych w układzie monitorującym prąd (IC1).

Wydajność

Ponieważ zasilacz do płytek stykowych oparto w dużej mierze na sprawdzonym wcześniej układzie zasilacza wykorzystującego płytkę Arduino, mieliśmy podstawy sądzić, że będzie działał poprawnie. Niemniej, w celu lepszego zilustrowania zasady jego działania, przygotowaliśmy kilka zrzutów ekranu z oscyloskopu, które pokazują, jak układ reaguje w rzeczywistych warunkach pracy.

Reakcja na przekroczenie dopuszczalnego prądu ma kluczowe znaczenie dla skuteczności działania każdego zasilacza laboratoryjnego. Na **oscylogramie 1** przedstawiono odpowiedź zasilacza do płytek stykowych na nagłą zmianę obciążenia, uzyskaną za pomocą naszego programowalnego obciążenia zbudowanego w oparciu o płytkę Arduino (Silikon Chip, czerwiec 2022, siliconchip.au/Article/15341). Obciążenie zostało gwałtownie przełączone z obwodu otwartego na 23,5 Ω, przy napięciu początkowym 12 V.

Przebieg niebieski przedstawia napięcie wyjściowe, natomiast czerwony – prąd, który osiąga wartość szczytową około 500 mA. Jak widać, zasilacz reaguje niemal natychmiast i osiąga stan ustalony po upływie około 150 µs.

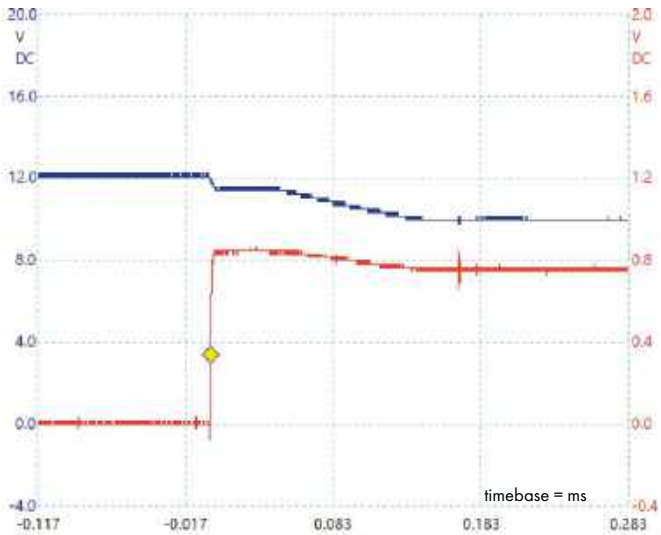
Warto zauważyć, że stała czasowa wynikająca z pojemności kondensatora wyjściowego 10 µF przy obciążeniu 23,5 Ω jest zbliżona do czasu zaobserwowanego na oscylogramie, co oznacza, że większość opóźnienia wynika z rozładowywania się tej pojemności, a nie z działania samego układu regulacji.

Na **oscylogramie 2** przedstawiono reakcję zasilacza na skokową zmianę ustawionego napięcia z 12 V do 0 V, uzyskaną przez zwarcie suwaka potencjometru VR1 do masy. W tym przypadku napięcie wyjściowe opada w ciągu około pół sekundy, ponieważ kondensator 10 µF może się rozładowywać jedynie przez dzielnik rezystorowy 51 kΩ/10 kΩ.

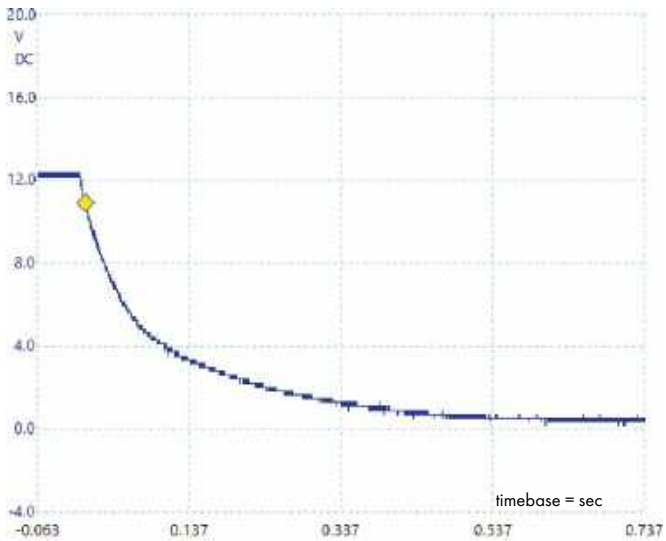
Oczywiście, każda impedancja obciążenia przyspieszy proces rozładowania kondensatora – z pewnością szybciej, niż byłbyś w stanie obrócić potencjometr.

Odpowiedź przejściowa to istotny parametr stabilizatora, ponieważ pokazuje, w jakim stopniu napięcie wyjściowe ulega zmianie w odpowiedzi na nagłe wahania obciążenia. Na **oscylogramie 3** przedstawiono reakcję zasilacza na kolejne zmiany prądu obciążenia:

eprasa.pl 7d549de066



Oscylogram 1. Reakcja na skokową zmianę obciążenia, która powoduje zadziałanie ograniczenia prądu, jest tak szybka, jak pozwala na to pojemność kondensatora wyjściowego. Obciążenie o mocy 23,5 W obniża napięcie z 12 V do około 10 V przy prądzie rzędu 400 mA



Oscylogram 2. Najwolniejsza odpowiedź zasilacza występuje wtedy, gdy napięcie wyjściowe zostaje natychmiast ustawione na 0 V przy braku obciążenia. Szybkość spadku napięcia jest wówczas ograniczona przez rozładowywanie kondensatora wyjściowego przez rezystorowy dzielnik napięcia

od 250 mA do 500 mA, następnie od 750 mA do 1 A, a potem powrót do 250 mA.

Jak widać, zmiany napięcia wyjściowego są niewielkie – zdecydowanie poniżej 100 mV przy obciążeniu 1 A – co oznacza, że zasilacz dobrze kompensuje nagłe wahania obciążenia.

Na **oscylogramie 4** przedstawiono w powiększeniu fragment przejścia obciążenia z 250 mA do 500 mA, które wcześniej zaprezentowano na oscylogramie 3. Widoczne są krótkotrwałe skoki napięcia o amplitudzie +300/–375 mV, jednak po upływie około 300 µs napięcie szybko stabilizuje się na nowym, stałym poziomie.

Budowa

Zasilacz do płytek stykowych został zmontowany na dwustronnej płytce drukowanej oznaczonej kodem 04112221, o wymiarach 99 mm × 54 mm, co przedstawiono na **rysunku 2**.

Z wyjątkiem gniazda USB (CON2) oraz rezystorów bocznikowych, zastosowano elementy do montażu przewlekanego. Obudowę urządzenia można by dodatkowo zmniejszyć, gdyby większą liczbę stanowiły elementy do montażu powierzchniowego, jednak i tak należałoby pozostawić miejsce na potencjometry oraz radiatory dla tranzystorów mocy.

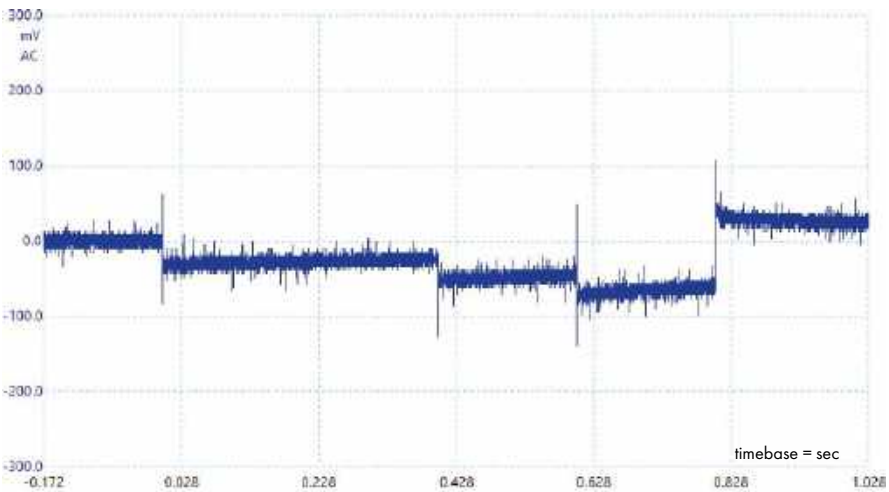
Choć projekt powstał z myślą o zastosowaniach amatorskich, wymaga on pewnych umiejętności w zakresie lutowania. Wynika to z faktu, że większość dostępnych układów do pomiaru prądu występuje wyłącznie w wersji do montażu powierzchniowego, a zastosowany w projekcie układ IC1 – czterokanałowy monitor prądu – ma stosunkowo gęsto rozmieszczone wyprowadzenia. Mimo to, przy użyciu odpowiednich narzędzi i zachowaniu ostrożności, jego przylutowanie nie powinno sprawiać większych trudności.

Płytkę drukowaną zaprojektowaliśmy w taki sposób, aby możliwe było zastosowanie zarówno kondensatorów przewlekanych, jak i przeznaczonych do montażu powierzchniowego. Jeśli więc dysponujesz odpowiednimi kondensatorami SMD, warto zamontować je razem z pozostałymi elementami w wersji do montażu powierzchniowego.

Na rysunku 2 przedstawiono kondensatory w wersji do montażu powierzchniowego (SMD), jednak na zdjęciach widać, że prototyp został zmontowany z użyciem kondensatorów przewlekanych. Warto pamiętać, że ceramiczne kondensatory SMD są zazwyczaj tańsze od ich przewlekanych odpowiedników.

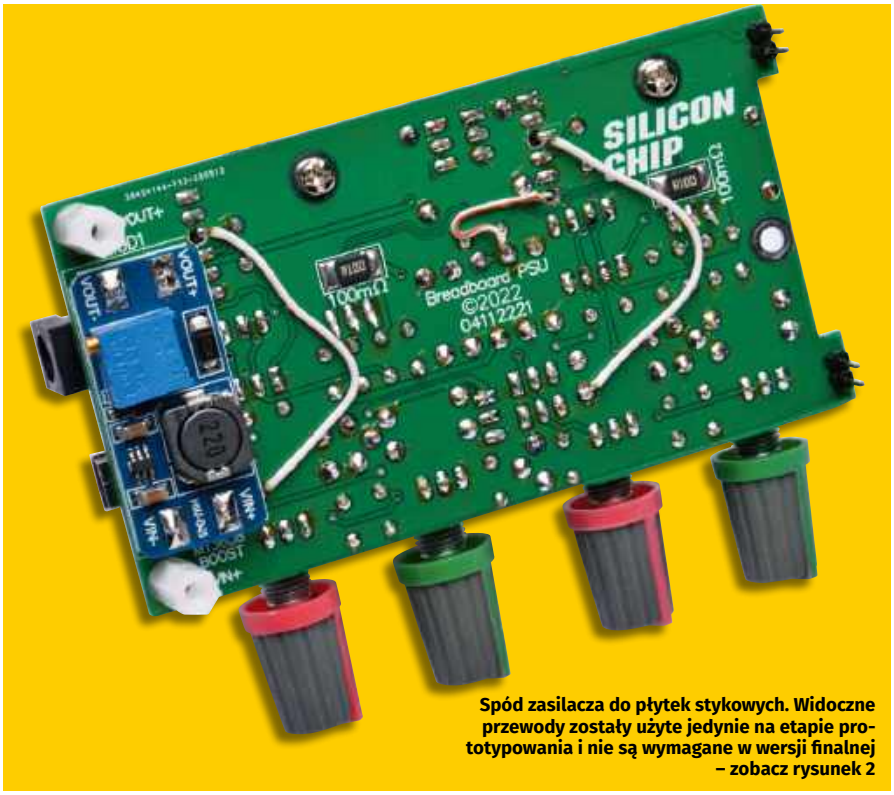
Aby ułatwić montaż, poszerzyliśmy pola lutownicze dla mniejszych elementów SMD. Do przylutowania tych podzespołów można z powodzeniem użyć lutownicy z cienkim grotem, choć z pewnością pomocne będą również topnik i plecionka lutownicza.

Montaż najlepiej rozpocząć od układu IC1, który ma najdrobniejsze wyprowadzenia spośród wszystkich elementów SMD zastosowanych w projekcie. Należy najpierw nałożyć topnik na pola lutownicze, następnie starannie ustawić układ, upewniając się, że znacznik pinu 1 pokrywa się z oznaczeniem na płytce. Po unieruchomieniu układu



Oscylogram 3. Seria zmian obciążenia: z 250 mA do 500 mA, następnie do 750 mA i 1 A, a na końcu powrót do 250 mA. Największe odchylenie napięcia wyniosło mniej niż 100 mV. Pomiary wykonano bezpośrednio na wyjściu zasilacza. W warunkach rzeczywistych, przy korzystaniu z płytki stykowej, odchylenia te są około trzykrotnie większe z powodu rezystancji połączeń w płytce

eprasa.pl 7d549de066

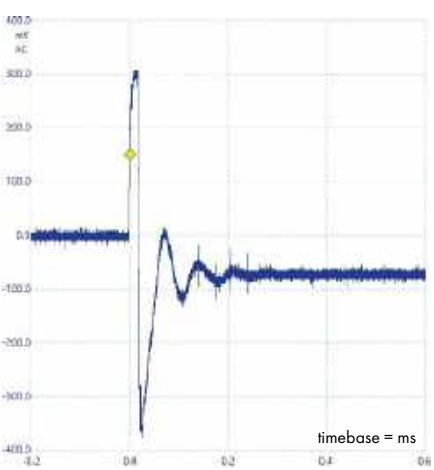


Spód zasilacza do płytek stykowych. Widoczne przewody zostały użyte jedynie na etapie prototypowania i nie są wymagane w wersji finalnej – zobacz rysunek 2

warto przylutować jedną z nóżek, a następnie ostrożnie przylutować pozostałe. Dobrze jest skontrolować poprawność pozycjonowania elementu za pomocą lupy.

Jeśli dysponujesz odpowiednią ilością cyny i topnika, lutowanie powinno przebiegać bez problemu. W przypadku nadmiaru cyny, który może tworzyć mostki pomiędzy wyprowadzeniami, użyj plecionki lutowniczej, aby je usunąć.

CON2 to gniazdo USB do montażu powierzchniowego, które ustawia się za pomocą pinów pozycjonujących umieszczonych na spodzie. Po nałożeniu topnika ostrożnie przylutuj dwa dłuższe pady zasilające, a następnie przylutuj większe piny pozycjonujące po bokach gniazda.



Oscylogram 4. Powiększenie przejścia z 250 mA do 500 mA, pokazane wcześniej na oscylogramie 3. Widoczne jest niewielkie, niemal symetryczne przeregulowanie

Dwa rezystory bocznikowe do pomiaru prądu znajdują się na spodzie płytki drukowanej. Umieść je dokładnie w wyznaczonych polach i przylutuj najpierw jedną z końcówek. Upewnij się, że element jest prawidłowo ustawiony względem oznaczeń na warstwie opisowej. Następnie przylutuj drugą końcówkę i – jeśli to konieczne – popraw lutowanie pierwszej.

Zamontuj teraz kondensatory, jeśli korzystasz z elementów do montażu powierzchniowego (SMD). Na płytce przewidziano miejsce dla trzech różnych wartości pojemności, rozmieszczonych w różnych miejscach. Aby uniknąć pomyłek, montuj kolejno kondensatory jednej wartości, zanim przejdziesz do następnych.

Na tym etapie usuń nadmiar topnika przy użyciu odpowiedniego rozpuszczalnika. Pamiętaj, aby po czyszczeniu dokładnie osuszyć płytkę – niektóre środki czyszczące są łatwopalne, a ich resztki mogą wpływać na działanie układu.

Pozostałe elementy najlepiej montować zaczynając od tych o najniższym profilu. Na początku zamontuj rezystory, ponieważ wszystkie leżą płasko na powierzchni płytki drukowanej. Jest ich łącznie 16. Przed lutowaniem sprawdź ich wartości – możesz posłużyć się oznaczeniami na płytce i kodem paskowym na obudowach, ale dla pewności warto zmierzyć je multimetrem, ponieważ kolory bywają trudne do odczytania.

Następnie zamontuj diodę D1, umieszczoną w pobliżu gniazda USB. Zwróć uwagę na jej orientację – pasek oznaczający katodę powinien znajdować się od strony gniazda.

Jeśli korzystasz z kondensatorów przewlekanych, przylutuj je w dalszej kolejności, zachowując zgodność z oznaczeniami na płytce.

Po kondensatorach zamontuj dwa wzmacniacze operacyjne. Zwróć uwagę na oznaczenie pinu 1 – powinno być zgodne z oznaczeniem na PCB i skierowane w lewo względem płytki. Możesz zastosować podstawki, choć w przypadku układu IC2 warto wcześniej sprawdzić, czy nie będą kolidować z radiatorem tranzystora Q1. W razie wątpliwości dopasuj radiator przed przylutowaniem gniazda.

Lutowanie wzmacniaczy operacyjnych bezpośrednio do płytki jest w dopuszczalne – ich wymiana będzie konieczna jedynie w przypadku uszkodzenia, co w praktyce zdarza się bardzo rzadko.

Trzy elementy zastosowane w projekcie mają obudowy typu TO-92: dwa mniejsze tranzystory Q2 i Q4 oraz stabilizator napięcia REG1. Przylutuj je teraz, upewniając się, że są prawidłowo ustawione i nie zostały pomylone.

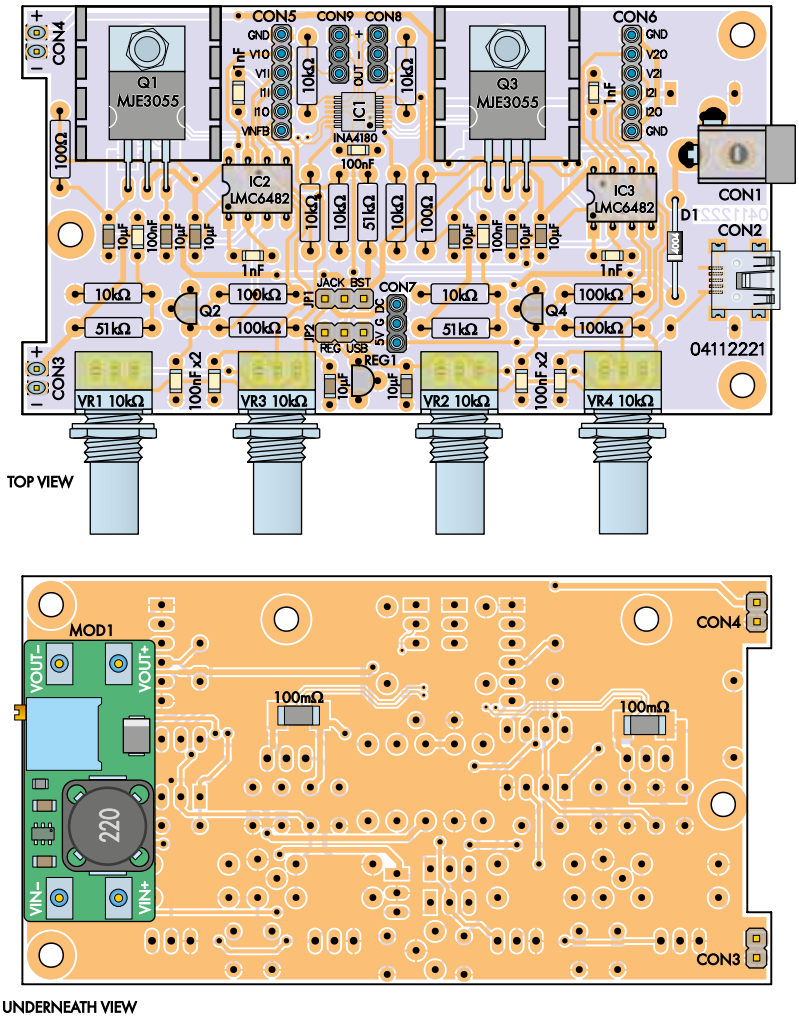
Następnie zamontuj pozostałe złącza i zworki, pozostawiając jednak złącza CON3 i CON4 na sam koniec, ponieważ należy je zamontować od spodu płytki. Ich dokładne położenie znajdziesz na rysunku 2 oraz na dołączonych zdjęciach prototypu.

Na pozycjach JP1 i JP2 należy przylutować 3-pinowe listwy szpilkowe, które posłużą później do zakładania zworek konfiguracyjnych. Ustaw listwę na miejscu, przylutuj najpierw jeden pin i sprawdź, czy całość ustawiona jest prostopadle do powierzchni płytki. Jeśli wszystko się zgadza, przylutuj pozostałe. Do czasu zakończenia testów nie zakładaj jeszcze zworek – pozostaw połączenia otwarte.

Złącza CON5...CON9, widoczne na rysunku przy górnej krawędzi płytki drukowanej, to gniazda typu SIL. W ich przypadku szczególnie ważne jest, aby zostały przylutowane dokładnie prostopadle do powierzchni PCB, ponieważ służą do połączenia z drugą płytką drukowaną, montowaną nad główną płytką zasilacza.

Dwa większe tranzystory – Q1 i Q3 – wymagają zastosowania radiatorów. Ich wyprowadzenia należy zagiąć w odległości około 7 mm od obudowy, a następnie włożyć je w odpowiednie otwory na płytce. Radiatory

eprasa.pl 7d549de066



Rysunek 2. Zasilacz do płytek stykowych został zaprojektowany jako konstrukcja kompaktowa, dlatego płytka drukowana cechuje się dużym zagęszczeniem elementów. Złącza CON3 i CON4 zostały umieszczone od spodu, aby umożliwić bezpośrednie wpięcie do szyn zasilających płytki stykowej. Na spodzie płytki znajdują się również dwa rezystory pomiarowe oraz przetwornica podwyższająca MOD1. Złącza CON5...CON9 służą głównie do podłączenia opcjonalnego modułu wyświetlacza. Jeśli planujesz zasilać układ wyłącznie przez gniazdo baryłkowe (CON1), możesz zrezygnować z montażu modułu MOD1 oraz gniazda USB CON2

należy wsunąć od strony tylnych ścianek tranzystorów i przymocować całość do płytki za pomocą śrub M3 o długości 8 mm – po jednej dla każdego zestawu tranzystor–radiator.

Opcjonalnie, na spodniej stronie powierzchni montażowej tranzystora można nałożyć cienką warstwę pasty termoprzewodzącej, co poprawi odprowadzanie ciepła. Po ustawieniu tranzystora i radiatora załóż podkładkę i dokręć nakrętkę, upewniając się, że tylna powierzchnia tranzystora dobrze przylega do płytki drukowanej, a sam radiator jest stabilny. Dopiero wtedy przylutuj wyprowadzenia i przytnij ich nadmiar.

Pozostałe większe elementy w górnej części płytki drukowanej nie powinny sprawić trudności przy montażu.

Złącze CON1 znajduje się obok gniazda USB CON2, natomiast cztery potencjometry są rozmieszczone wzdłuż jednej z krawędzi płytki.

Na tym etapie można zamontować pokrętła. W przypadku potencjometrów z wałkiem wielowypustowym należy najpierw ustawić każdy z nich w pozycji środkowej – szczelina w wałku powinna być wtedy ustawiona poziomo. Następnie należy wcisnąć pokrętło tak, aby jego znacznik wskazywał dokładnie pionowo do góry, również odpowiadając pozycji środkowej.

Na koniec obróć pokrętło w lewo (przeciwnie do ruchu wskazówek zegara) do pozycji minimalnej, co pozwoli bezpiecznie rozpocząć testowanie układu.

Użyliśmy czerwonych pokręteł do potencjometrów ograniczających prąd (VR3 i VR4) oraz zielonych do ustawiania napięcia (VR1 i VR2).

Zamontuj teraz gwintowane elementy dystansowe – pełnią one rolę nóżek z jednej strony zasilacza do płytek stykowych i pozwolą ocenić, ile miejsca pozostaje na montaż przetwornicy MOD1.

MOD1 należy zamontować od spodu płytki drukowanej, w pobliżu złączy CON1 i CON2. Przed jego instalacją upewnij się, że wszystkie elementy w tym obszarze zostały już zamontowane – MOD1 zasłoni bowiem pola lutownicze niektórych komponentów po stronie wierzchniej. Przytnij wszystkie wyprowadzenia w tym rejonie, aby zapewnić odpowiedni odstęp między płytką a przetwornicą.

Zorientuj moduł zgodnie z oznaczeniami VIN i VOUT nadrukowanymi na płytce drukowanej. Sprawdź również polaryzację – spotkaliśmy się z różnymi wersjami modułów MT3608, w których wyprowadzenia wejścia i wyjścia były zamienione miejscami.

Następnie przylutuj moduł do płytki, używając krótko przyciętych wyprowadzeń przewleczonych przez otwory w obu płytkach. Upewnij się, że po przylutowaniu moduł nie wystaje poniżej poziomu elementów dystansowych – w przeciwnym razie po ustawieniu zasilacza na podłożu jego ciężar będzie opierał się na samym module, co może doprowadzić do jego uszkodzenia.

Upewnij się także, że spód modułu nie dotyka żadnych ścieżek ani punktów lutowniczych, które mogłyby spowodować zwarcie. Następnie przytnij wystające końce przewodów, którymi przymocowałeś moduł do płytki.

Na koniec zamontuj złącza CON3 i CON4. Najłatwiej to zrobić, wkładając ich piny bezpośrednio w szyny zasilające płytki stykowej – dodatni pin w czerwony rząd, a ujemny w niebieski. Następnie połóż płytkę zasilacza tak, aby złącza weszły w przygotowane otwory. Dzięki temu ich pozycja będzie od razu prawidłowa. Delikatnie dociśnij płytkę i przylutuj piny CON3 i CON4 od strony górnej warstwy PCB.

Testowanie

Po zakończeniu montażu układu możesz łatwo sprawdzić jego działanie, wykonując kilka prostych pomiarów. Potrzebny będzie do tego multimetr, którym zmierzysz napięcia w różnych punktach układu. Wszystkie pomiary wykonuj względem masy – dobrym miejscem do podłączenia przewodu pomiarowego jest metalowa obudowa gniazda USB (CON2) lub pin 4 układów scalonych IC2 albo IC3.

Kolejne trzy akapity dotyczą tylko sytuacji, gdy moduł przetwornicy (MOD1) został zamontowany. Jeśli go pominąłeś, możesz je zignorować.

eprasa.pl 7d549de066

Wykaz elementów:
Mechaniczne i złącza:
1 dwustronna płytka PCB oznaczona kodem 04112221, 99 mm × 54 mm
1 gniazdo baryłkowe o średnicy wewnętrznej 2,1 mm do montażu na płytce drukowanej (CON1)
1 gniazdo SMD mini-USB (CON2)
2 2-drożne złącza szpilkowe o rastrze 2,54 mm (CON3, CON4)
2 6-stykowe gniazda żeńskie (CON5, CON6)
3 3-drożne gniazda żeńskie (CON7...CON9)
2 3-stykowe złącza ze zworkami (JP1, JP2)
2 tuleje dystansowe M3 o długości 12 mm
4 śruby maszynowe M3 × 8 mm
2 nakrętki sześciokątne M3
2 podkładki przeciwwstrząsowe M3
2 małe radiatory żebrowane TO-220 (nie większe niż 20 mm × 20 mm × 10 mm)
1 moduł przetwornicy podwyższającej MT3608 (MOD1) [SC4437]
4 potencjometry liniowe 10 kΩ 9 mm i odpowiednie pokrętła (VR1...VR4) [Jaycar RP8510 & HK773x]
4 krótkie odcinki przewodów lub kawałki drutu (do montażu MOD1)

Półprzewodniki:
1 INA4180 A1IPWR – poczwórny bocznik prądowy, TSSOP-14 (IC1)
2 LMC6482 – podwójne wzmacniacze operacyjne CMOS typu rail-to-rail, DIP-8 (IC2, IC3)
1 dioda 1N4004 – 400 V, 1 A (D1)
2 tranzystory NPN MJE3055 – 60 V, 10 A, TO-220 (Q1, Q3) [Jaycar ZT2280]
2 tranzystory NPN BC547 – 45 V, 100 mA, TO-92 (Q2, Q4) [Jaycar ZT2152]
1 stabilizator 78L05 – 5 V, 100 mA, TO-92 (REG1) [Jaycar ZV1539]

Kondensatory: (wszystkie SMD M3216/1206 X5R/X7R lub MKT/ceramiczne radialne)
8 × 10 µF 16 V 7 × 100 nF 50 V 4 × 1 nF 50 V

Rezystory: (wszystkie 1/4 W osiowe, 1% metalizowane, o ile nie podano inaczej)
4 × 100 kΩ 3 × 51 kΩ 7 × 10 kΩ 2 × 100 Ω
2 × 100 mΩ – M6432/2512, 1 W, SMD

Na początek pozostaw zworki JP1 i JP2 otwarte (niezałożone) i podłącz zasilanie z portu USB do gniazda CON2. Powinieneś zaobserwować 5 V na prawym pinie złącza JP2 oznaczonego jako „USB" oraz napięcie wyjściowe przetwornicy podwyższającej na prawym pinie JP1 („BST").

Za pomocą śruby regulacyjnej w module przetwornicy ustaw jego napięcie wyjściowe na wartość nie większą niż 15 V. Jeśli znasz planowane maksymalne napięcie pracy układu, ustaw przetwornicę na wartość o około 2 V wyższą. Niższe napięcie wejściowe pozwala zmniejszyć straty mocy wydzielane na tranzystorach mocy.

Jeśli nie widzisz oczekiwanych napięć, zacznij od sprawdzenia okolic gniazda USB (CON2) oraz modułu przetwornicy (MOD1).

Następnie odłącz zasilanie USB i podłącz zewnętrzny zasilacz do gniazda CON1. Może to być dowolne napięcie stałe w zakresie od 7 V do 15 V. Gniazdo CON1 zostało przystosowane do typowej konfiguracji z dodatnim biegunem na środku wtyku (plus w środku, minus na zewnątrz).

W wyniku spadku napięcia na diodzie D1, na lewym pinie JP1 (oznaczonym „JACK") napięcie będzie nieco niższe niż bezpośrednio na wejściu CON1. Jeśli w tym miejscu nie pojawia się napięcie, możliwe, że zasilacz ma odwrotną polaryzację lub dioda została uszkodzona.

Na lewym pinie JP2 (oznaczonym „REG") powinieneś zmierzyć około 5 V. Brak napięcia w tym miejscu sugeruje problem z układem stabilizatora napięcia REG1.

Jeśli wszystko działa poprawnie, możesz wybrać źródło zasilania, zakładając zworki JP1 i JP2 zgodnie z potrzebą. Gdy chcesz korzystać z zasilania z gniazda baryłkowego (CON1), ustaw obie zworki w taki sposób, aby łączyły lewy pin ze środkowym. Natomiast jeśli planujesz używać zasilania z portu USB, zworki powinny łączyć prawy pin ze środkowym.

Na naszych zdjęciach zworki są ustawione w konfiguracji odpowiadającej zasilaniu z gniazda baryłkowego (CON1).

Teraz można przystąpić do pomiaru napięć wyjściowych za pomocą multimetru. Dwa potencjometry znajdujące się po lewej stronie regulują napięcie na złączu CON3, umieszczonym tuż obok nich. Pozostałe dwa potencjometry odpowiadają za regulację napięcia na wyjściu CON4.

Ustaw potencjometry VR2 i VR4 (regulacja prądu) nieco powyżej ich minimalnego położenia – w przeciwnym razie układ zablokuje napięcie wyjściowe. Następnie zacznij powoli zwiększać ustawienia VR1 i VR3 (regulacja napięcia), obserwując zmiany napięcia na wyjściach. Maksymalne napięcie zostanie osiągnięte znacznie wcześniej niż w skrajnym położeniu zgodnym z ruchem wskazówek zegara i będzie o około 1 V niższe od napięcia zasilania wybranego za pomocą zworki JP1.

Korzystanie z zasilacza

Aby korzystać z dwukanałowego zasilacza do płytek stykowych, wystarczy wpiąć go w szyny zasilające płytki. Potencjometry umożliwiają regulację napięcia oraz ustawienie ograniczenia prądowego – w razie potrzeby należy je odpowiednio wyregulować.

Zasilacz opiera się na pinach złączy CON3 i CON4, znajdujących się na jednym końcu płytki prototypowej, natomiast od strony CON1 i CON2 wsparty jest na gwintowanych elementach dystansowych. Układ został zaprojektowany do pracy bez dodatkowej obudowy.

Jeśli nie planujesz podłączenia wyświetlacza, warto rozważyć zamocowanie nad elektroniką arkusza tektury lub tworzywa sztucznego, który zabezpieczy ją przed przypadkowym dotknięciem.

Tranzystory pracują w trybie liniowym, co oznacza, że będą się nagrzewać i rozpraszać znaczną ilość mocy – zależnie od napięcia zasilającego oraz ustawionego ograniczenia prądu. W przypadku zwarcia na wyjściu, gdy prąd jest ograniczany, straty mocy będą największe.

Proponowane radiatory dobrze sprawdzają się przy mocach strat nieprzekraczających kilku watów. Przy napięciu zasilania 15 V bezpiecznym poziomem ograniczenia prądu będzie około 200 mA – wówczas nie ma ryzyka przegrzania tranzystorów. Nawet przy większym rozpraszaniu ciepła układ powinien działać poprawnie, o ile kontrolujesz pobór prądu i wyłączysz zasilanie, jeśli przekroczy on zakładane wartości.

W przypadku większych prądów – szczególnie wtedy, gdy potrzebne są niskie napięcia wyjściowe – warto rozważyć zastosowanie niższego napięcia zasilającego. Pozwoli to zmniejszyć straty mocy w tranzystorach i ograniczyć ich nagrzewanie.

Jak wspomniano wcześniej, zaprojektowaliśmy również dodatkowy moduł z wyświetlaczem (widoczny na głównym zdjęciu), który umożliwia odczyt ustawionych i rzeczywistych wartości napięcia oraz prądu.

Moduł ten potrafi także oszacować moc rozpraszaną przez tranzystory, na podstawie zmierzonych parametrów. Dzięki temu łatwiej uniknąć przeciążenia i przegrzania elementów mocy. ■

Tim Blythman's

Materiały dodatkowe dostępne są na stronie Silicon Chip:
https://www.siliconchip.com.au/Shop/8/6569

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 7d549de066

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
Kod ważny do 30.09.2025

-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

Podwajacz i generator napięcia ujemnego z układem 555

Niewielki i niedrogi układ, który może na wyjściu wytwarzać napięcie blisko dwukrotnie wyższe od napięcia wejściowego (stałego), a także napięcie równe co do wartości napięciu wejściowemu, lecz o przeciwnym (ujemnym) znaku. Urządzenie znajduje zastosowanie w wielu sytuacjach, na przykład do zasilania wzmacniaczy operacyjnych z baterii lub innych źródeł prądu stałego, zasilania bramek tranzystorów typu MOSFET albo poszerzenia zakresu napięcia wyjściowego w przypadku regulowanych stabilizatorów.

Jeśli budujesz układ, w którym napięcie zasilające okazuje się niewystarczające do zasilania niektórych elementów, albo potrzebujesz uzyskać napięcie ujemne z dodatniego źródła, przedstawiony poniżej projekt może stanowić rozwiązanie takiego problemu. Wykorzystano w nim układ czasowy 555 oraz kilka diod, rezystorów i kondensatorów. Całość zmontowano na niewielkiej płytce drukowanej.

W zależności od sposobu montażu, układ może pracować jako inwerter napięcia lub jako prosty podwajacz, którego napięcie wyjściowe jest nieco niższe od dwukrotnej wartości napięcia wejściowego. Może on dostarczyć na wyjściu prąd o natężeniu sięgającym kilkudziesięciu miliamperów.

Inwerter napięcia znajduje zastosowanie w wielu układach. Przykładowo, podczas przetwarzania sygnałów dźwiękowych za pomocą wzmacniacza operacyjnego, zastosowanie zasilania symetrycznego – obejmującego również napięcie ujemne – pozwala uprościć schemat i zmniejszyć liczbę elementów. Dzięki temu sygnał audio może być bezpośrednio odniesiony do masy. W przeciwnym razie konieczne byłoby jego podniesienie do połowy napięcia dodatniego i zastosowanie kondensatorów sprzęgających.

W pewnych zastosowaniach zasilanie symetryczne okazuje się niewystarczające do zapewnienia odpowiedniego marginesu napięcia dla poprawnego przetwarzania sygnału. W takich sytuacjach obecność napięcia ujemnego pozwala niemal podwoić zakres pracy wzmacniacza operacyjnego.

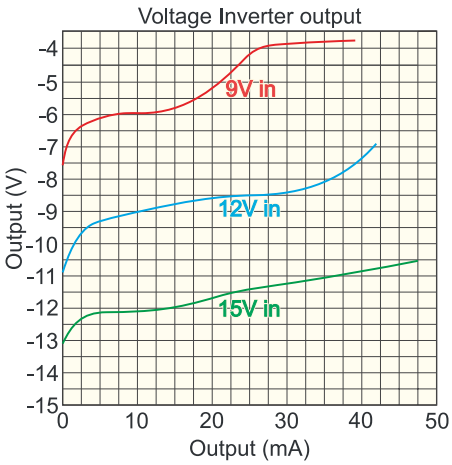
Podwajacz napięcia może być przydatny w wielu sytuacjach – na przykład wtedy, gdy konieczne jest spolaryzowanie bramki tranzystora MOSFET typu N powyżej napięcia zasilającego, aby zastosować go jako przełącznik po stronie dodatniego napięcia, lub gdy zachodzi potrzeba zasilenia niewielkiego przekaźnika 24 V z dostępnego źródła 12 V.

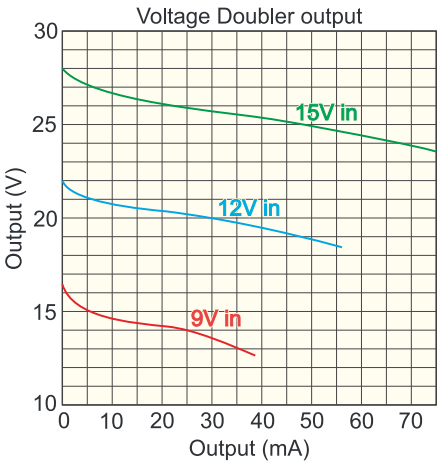
Należy pamiętać, że w tym układzie występują pewne straty napięcia. W rezultacie, gdy działa on jako podwajacz, rzeczywiste napięcie wyjściowe będzie o około 3...3,5 V niższe od dwukrotnej wartości napięcia wejściowego. Podobnie, przy pracy jako inwerter, uzyskiwane napięcie ujemne jest o kilka woltów mniejsze od dodatniego napięcia zasilającego.

Większość tych strat wynika z charakterystyki układu scalonego 555 – jego wyjście, pracując pod obciążeniem, nie osiąga pełnego napięcia zasilania. Dodatkowe spadki występują również na diodach prostowniczych. Jeśli jednak jesteśmy gotowi zaakceptować te ograniczenia, opisywany układ może być bardzo użyteczny. Prąd wyjściowy sięga około 30 mA, choć przy wyższych

Cechy i specyfikacja:

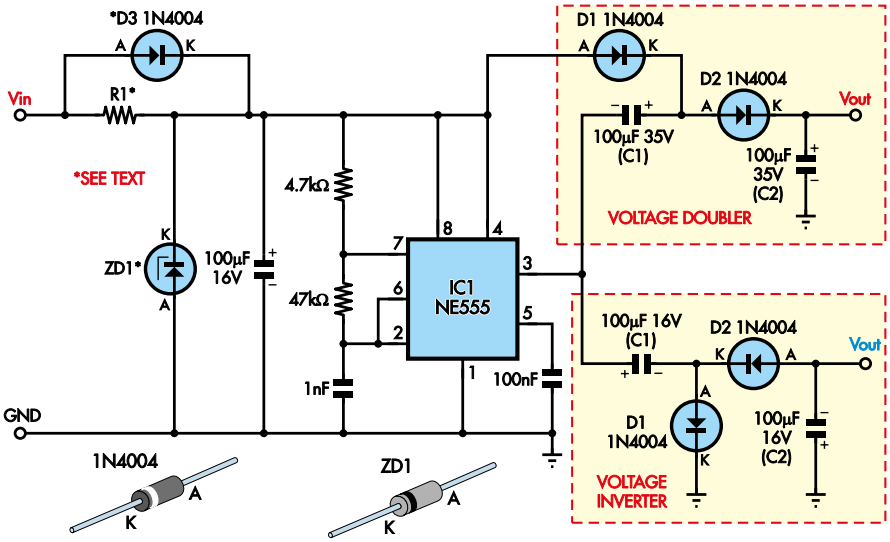
- zakres napięć wejściowych: 9 V...15 V DC (Vin),
- generuje napięcie wyjściowe: „podwojone" lub „odwrócone" względem wejściowego,
- „odwrócone" napięcie wyjściowe wynosi około –(Vin – 3 V) (rysunek 1),
- „podwojone" napięcie wyjściowe wynosi około Vin × 2 – 3,5 V (rysunek 2),
- maksymalny prąd wyjściowy: do około 30 mA (zależnie od konfiguracji; rysunki 1 i 2),
- niewielka płytka drukowana: 37 mm × 42,5 mm,
- prosta i tania konstrukcja z niewielkiej liczby elementów (timer 555, kilka diod, kondensatorów i rezystorów).





Rysunki 1 i 2. Wykresy prądu i napięcia wyjściowego w funkcji napięcia wejściowego dla inwertera napięcia (po lewej) i podwajacza napięcia (po prawej)

eprasa.pl 7d549de066



Rysunek 3. Schemat układu inwertera i podwajacza napięcia. Dioda D3 (opcjonalna) chroni przed skutkami odwrócenia polaryzacji zasilania, natomiast rezystor R1 należy zastosować tylko wtedy, gdy dioda D3 nie jest zainstalowana

napięciach wejściowych możliwe jest uzyskanie nieco większej wartości.

Wydajność

Na **rysunkach 1** i **2** przedstawiono zależność prądu oraz napięcia wyjściowego od napięcia wejściowego. Wykresy te powinny pomóc w ocenie, czy układ spełni wymagania konkretnego zastosowania. Zestawiono jedynie przebiegi prądu w funkcji napięcia wyjściowego Vout dla trzech wartości napięcia wejściowego: 9 V, 12 V i 15 V. Przy napięciu niższym niż 9 V napięcie wyjściowe prawdopodobnie okaże się zbyt niskie, by było praktycznie użyteczne.

Należy przy tym pamiętać, że napięcie wejściowe odnosi się do napięcia zasilającego układ scalony 555 i może różnić się od napięcia doprowadzanego do zacisku Vin.

Jeśli potrzebujesz podwajacza napięcia lub inwertera działającego w zakresie 1,5 V...5,5 V, zapoznaj się z sekcją „Alternatywy". Znajdziesz tam układy scalone odpowiednie do takich zastosowań.

Prezentowany układ został zaprojektowany, ponieważ potrzebowaliśmy napięcia ujemnego do przetestowania naszego laboratoryjnego zasilacza 30 V/2 A, opisanego pierwotnie w numerach „Silicon Chip" z października i listopada 2022 roku oraz w numerach EdW z czerwca i lipca 2025. Projekt uległ zmianie, ponieważ używany wcześniej transformator sieciowy jest już niedostępny, a nowy nie posiada odczepu umożliwiającego uzyskanie napięcia –8 V, jak miało to miejsce w pierwotnej wersji.

Z tego powodu zastosowaliśmy opisany tu układ jako inwerter, przekształcający napięcie z szyny +12 V na wymagane –8 V. Rozwiązanie to okazało się idealne, ponieważ potrzebujemy jedynie około 13 mA przy napięciu z zakresu –9 V...–8 V – a takie parametry układ jest w stanie zapewnić.

Układ został zaprojektowany jako rozwiązanie proste, oparte na łatwo dostępnych elementach. Dzięki tej prostocie można go łatwo skonfigurować do pracy jako inwerter napięcia lub podwajacz.

Szczegóły schematu

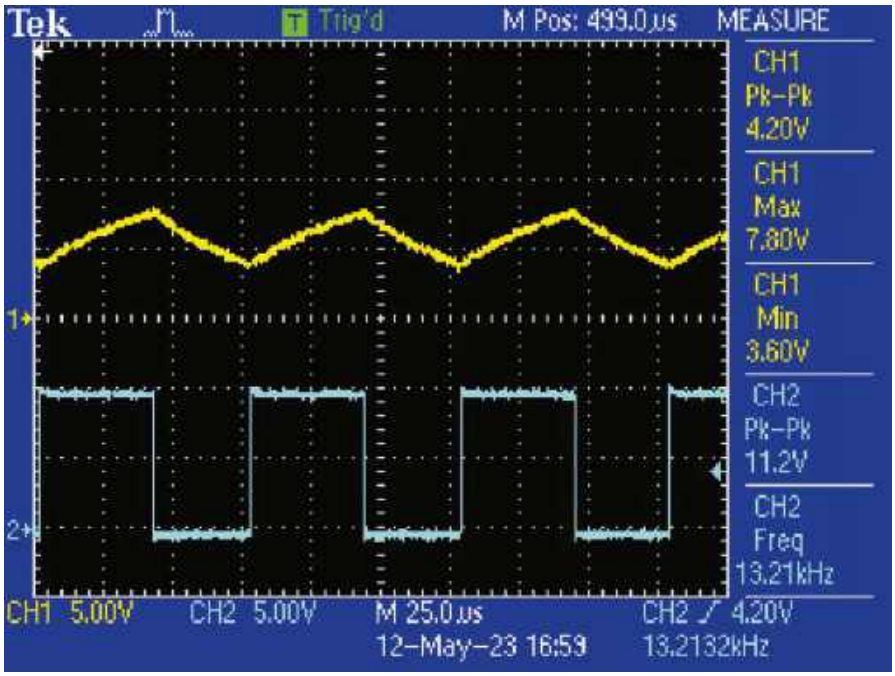
Schemat inwertera/podwajacza napięcia przedstawiono na **rysunku 3**. Uwzględniono w nim dwa warianty wyjścia – umożliwiające realizację funkcji podwajania lub odwracania napięcia. Znaczna część układu jest wspólna dla obu wersji, w tym układ czasowy 555 oraz współpracujące z nim elementy ustalające poszczególne opóźnienia.

Zasilanie doprowadzane jest do zacisków Vin i GND. Od strony zacisku Vin napięcie zasilające przechodzi przez diodę D3 lub alternatywnie, przez rezystor R1. Dioda D3 zabezpiecza układ przed uszkodzeniem w przypadku odwrotnego podłączenia napięcia. Jeżeli układ inwertera/podwajacza napięcia ma być trwale podłączony do określonego źródła zasilania, diodę D3 można zastąpić przewodem, co pozwoli zmniejszyć straty i uzyskać wyższe napięcie na wyjściu Vout.

W przypadku zastosowania diody D3 lub połączenia przewodowego dioda Zenera ZD1 i rezystor R1 nie są montowane.

Zasilanie układu czasowego 555 (IC1) nie może przekraczać 16 V. Jeżeli napięcie zasilające może być wyższe albo chcesz ustawić napięcie wyjściowe Vout na określonym poziomie, należy zamiast D3 lub połączenia przewodowego zastosować R1 i ZD1.

Dioda Zenera ZD1 wraz z rezystorem R1 ograniczają napięcie zasilające inwerter/podwajacz napięcia. ZD1 odpowiada za ograniczenie samego napięcia, natomiast R1 ogranicza prąd płynący przez diodę do bezpiecznej wartości. Dobór tych elementów zależy od konkretnego zastosowania – przykłady zostaną przedstawione w dalszej części artykułu.



Oscylogram 1. Przebieg napięcia na pinach 2 i 6 układu IC1 (555) pokazano kolorem żółtym, natomiast przebieg napięcia na wyjściu (pin 3) – kolorem niebieskim. Częstotliwość wynosi około 13,2 kHz

eprasa.pl 7d549de066

Generator

Układ IC1 został skonfigurowany jako generator wytwarzający przebieg o wypełnieniu zbliżonym do 50%. Pin 3 generuje prostokątny sygnał wyjściowy. Kondensator 1 nF oraz rezystory 47 kΩ i 4,7 kΩ ustalają częstotliwość i wypełnienie sygnału na pinach 2 i 6.

Kondensator 1 nF ładowany jest przez rezystory 4,7 kΩ i 47 kΩ z dodatniego napięcia zasilającego. W czasie ładowania wyjście układu (pin 3) pozostaje w stanie wysokim (bliskim napięciu zasilania). Gdy napięcie na kondensatorze osiągnie 2/3 napięcia zasilającego (co wykrywa wejście progowe – pin 6), pin 7 (wyjście rozładowania) przechodzi w stan niski, podobnie jak wyjście na pinie 3.

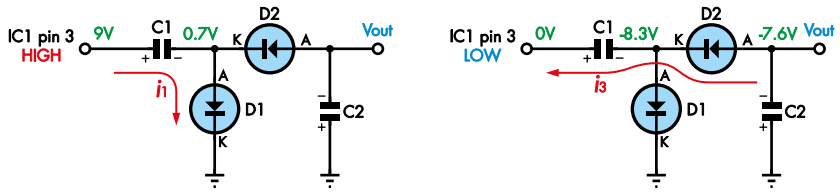
Gdy pin 7 znajduje się w stanie niskim, kondensator rozładowuje się przez rezystor 47 kΩ, aż jego napięcie spadnie do 1/3 napięcia zasilającego. Moment ten jest wykrywany przez wejście wyzwalające na pinie 2. Wówczas wyjście na pinie 3 ponownie przechodzi w stan wysoki, a pin 7 przełącza się w stan wysokiej impedancji, umożliwiając ponowne ładowanie kondensatora. Proces ten powtarza się cyklicznie.

Ponieważ kondensator jest ładowany przez rezystory 47 kΩ i 4,7 kΩ (łącznie 51,7 kΩ) oraz rozładowywany przez rezystor 47 kΩ, można oczekiwać, że napięcie wyjściowe pozostaje w stanie wysokim nieco dłużej niż w stanie niskim. W przypadku tego układu różnica ta jest jednak na tyle niewielka, że przebieg można uznać za wystarczająco zbliżony do 50-procentowego wypełnienia.

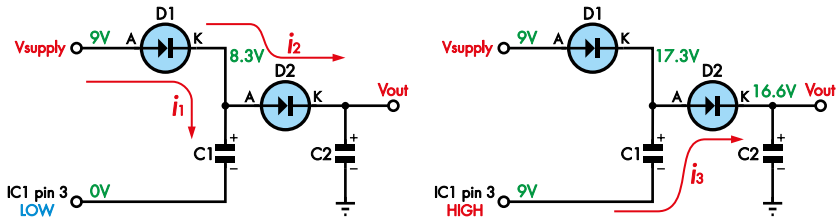
Częstotliwość generowanego sygnału wynosi 14 kHz i wynika ze wzoru:

$$\frac{1{,}44}{(4{,}7k\Omega+2\cdot 47k\Omega)\cdot 1nF}$$

Przebieg sygnału można zobaczyć na **oscylogramie 1**. Górna, żółta krzywa przedstawia napięcie na kondensatorze, natomiast dolna, cyjanowa – sygnał z wyjścia układu 555 (pin 3). Pomiary wykonano przy nieobciążonym wyjściu (Vout).



Rysunek 4. Dwie fazy działania pompy ładunkowej w konfiguracji inwertera napięcia



Rysunek 5. Dwie fazy działania pompy ładunkowej w konfiguracji podwajacza napięcia

Wyjście układu IC1 (pin 3) steruje pracą podwajacza napięcia lub inwertera. Na **rysunku 4** przedstawiono zasadę działania sekcji inwertera, natomiast na **rysunku 5** wyjaśniono sposób działania podwajacza napięcia. Dla uproszczenia przyjęto, że spadek napięcia na diodach wynosi 0,7 V, a spadek napięcia na pinie 3 układu IC1 został pominięty.

Działanie inwertera napięcia

Gdy pin 3 układu IC1 znajduje się w stanie wysokim, kondensator C1 ładuje się przez diodę D1 do napięcia niższego od napięcia zasilającego o 0,7 V (rysunek 4 – lewa strona). Gdy pin 3 przechodzi w stan niski, dodatnia strona kondensatora C1 zostaje przyłączona do potencjału 0 V, natomiast jego druga strona przyjmuje wartość ujemną. Warto zauważyć, że napięcie zgromadzone na kondensatorze C1 nie zmienia się pomiędzy obiema fazami działania układu.

Kondensator C1 ładuje kondensator C2 przez diodę D2 do napięcia ujemnego, zbliżonego wartością do napięcia dodatniego zasilania pomniejszonego o 1,4 V – sumaryczny spadek napięcia na dwóch diodach. W tym przypadku wynosi ono około –7,6 V (−1×[9 V−1,4 V]).

Działanie podwajacza napięcia

W przypadku pracy układu jako podwajacz napięcia, dioda D1 ładuje kondensator C1 do napięcia zasilającego pomniejszonego o 0,7 V, gdy wyjście układu IC1 (pin 3) znajduje się w stanie niskim (rysunek 5 – lewa strona). Jeśli sytuacja ta występuje tuż po włączeniu zasilania, początkowo rozładowany kondensator C2 zostaje naładowany do napięcia o około 1,4 V niższego niż napięcie zasilające – przez szeregowo połączone diody D1 i D2, co zilustrowano jako prąd i_2.

Gdy pin 3 układu IC1 przechodzi w stan wysoki (prawa strona rysunku 5), ujemna strona kondensatora C1 zostaje podniesiona do potencjału dodatniego zasilania, co sprawia, że jego dodatnia strona osiąga napięcie zbliżone do dwukrotnej wartości zasilania (9,0 V×2–0,7 V). Należy zauważyć, że napięcie zgromadzone na C1 pozostaje takie samo jak wcześniej (8,3 V). Dioda D2 zostaje spolaryzowana w kierunku przewodzenia i umożliwia przepływ ładunku z C1 do C2, co powoduje dodatkowy spadek o 0,7 V.

Po jednym lub dwóch cyklach napięcie na kondensatorze C2 osiąga wartość zbliżoną do dwukrotności napięcia zasilającego, pomniejszoną o sumaryczny spadek napięcia na diodach D1 i D2, czyli o około 1,4 V.

Ponieważ układ IC1 może być zasilany napięciem do 15 V (zalecane maksimum), do realizacji funkcji podwajania napięcia zastosowano kondensatory C1 i C2 o napięciu znamionowym 35 V, aby zapewnić odpowiedni margines bezpieczeństwa.

Wykaz elementów:
Elementy podstawowe: (wspólne dla obu wersji)
1 dwustronna płytka drukowana, kod 04107222, 37 mm × 42,5 mm
1 układ scalony NE555P lub odpowiednik, obudowa DIP-8 (IC1)
2 diody prostownicze 1N4004, 400 V/1 A (D1, D2)
1 dioda prostownicza 1N4004, 400 V/1 A (D3, opcjonalna – patrz tekst)
1 dioda Zenera 1 W (ZD1, opcjonalna – patrz tekst; 12 V dla wersji zasilacza laboratoryjnego)
1 kondensator elektrolityczny, radialny, 100 µF/16 V
1 kondensator poliestrowy (MKT) 100 nF/100 V
1 kondensator poliestrowy (MKT) 1 nF/100 V
1 rezystor 47 kΩ/0,25 W, 1%, osiowy, metalizowany
1 rezystor 4,7 kΩ/0,25 W, 1%, osiowy, metalizowany
1 rezystor 220 Ω/1 W, osiowy (R1, opcjonalny – patrz tekst)

Elementy zależne od wersji układu:
Dla podwajacza napięcia:
2 kondensatory elektrolityczne, radialne, 100 µF/35 V (C1, C2)

Dla inwertera napięcia:
2 kondensatory elektrolityczne, radialne, 100 µF/16 V (C1, C2)

eprasa.pl 7d549de066

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

Praktyka

Jak wspomniano wcześniej, wyjście układu IC1 (pin 3) nie przełącza się w pełni ani do dodatniej szyny zasilającej, ani do masy (0 V), gdy pracuje pod obciążeniem. W stanie wysokim występuje na nim spadek napięcia rzędu 2 V, co powoduje, że napięcie na wyjściu (Vout) nie osiąga oczekiwanej wartości. Straty te oznaczają również, że do uzyskania użytecznego napięcia wyjściowego konieczne jest zastosowanie zasilania o napięciu co najmniej 9 V.

Jeśli układ nie zapewnia wystarczającego napięcia dla danego zastosowania, zamiast diod D1, D2 i D3 (jeśli D3 jest używana) można zastosować diody Schottky'ego typu 1N5819. Umożliwią one uzyskanie nieco wyższego napięcia wyjściowego dzięki niższemu napięciu przewodzenia.

Zastosowanie wersji CMOS układu 555, takiej jak 7555 lub LMC555, nie poprawia parametrów napięcia wyjściowego. Chociaż przy bardzo małych prądach obciążenia (poniżej 0,8 mA) napięcia wyjściowe mogą być zbliżone do poziomów zasilania, to po podłączeniu obciążenia ulegają one znacznemu obniżeniu. Pracę wyjścia (pinu 3) układu 7555 można zasymulować, przyjmując szeregowy rezystor 875 Ω w stanie wysokim oraz 62,5 Ω w stanie niskim.

Symulację działania inwertera przeprowadzono w programie LTspice – plik symulacyjny można pobrać ze strony internetowej czasopisma Silicon Chip. Aby przetestować funkcję podwajania napięcia, wystarczy zmienić konfigurację elementów: C1, C2, D1 i D2.

Należy jednak pamiętać, że głównym ograniczeniem symulacji jest brak odwzorowania rzeczywistego spadku napięcia wyjściu (pinie 3) układu 555 w stanie wysokim pod obciążeniem.

Alternatywy

Jeśli potrzebujesz podwajacza napięcia o wyższym prądzie wyjściowym, warto zapoznać się z projektem opublikowanym w dziale Circuit Notebook pod tytułem „High-Current Voltage Doubler", autorstwa Dayle'a Edwardsa (Silicon Chip, wrzesień 2009; siliconchip.au/Article/1564). Układ ten umożliwia podwojenie napięcia zasilającego 5 V, 6 V, 9 V lub 12 V, zapewniając prąd wyjściowy do 1,5 A.

Dostępne są również wyspecjalizowane układy scalone, chociaż zwykle oferują one nieco ograniczony zakres napięć wejściowych. Przykładowo, układy ICL7660 (1,5 V...10 V), ICL7660A (1,5 V...12 V) oraz ICL7662 (4,5 V...20 V) firmy Intersil mogą pracować zarówno jako podwajacze, jak i inwertery napięcia. Wszystkie są nadal dostępne, choć model 7662 jest obecnie produkowany wyłącznie przez firmę AD/Maxim.

W przypadku energooszczędnego inwertera napięcia, pracującego w zakresie 1,5 V...5,5 V i dostarczającego prąd do 25 mA, warto rozważyć układ ADM8828 firmy Analog Devices – szczególnie przy odwracaniu napięcia pochodzącego z portu USB. Podobne właściwości oferuje układ LM2662, który może pełnić funkcję zarówno inwertera, jak i podwajacza, obsługując prąd wyjściowy do 200 mA w tym samym zakresie napięć zasilania. Na rynku dostępnych jest również wiele innych, podobnych układów, których nie sposób tutaj wszystkich wymienić.

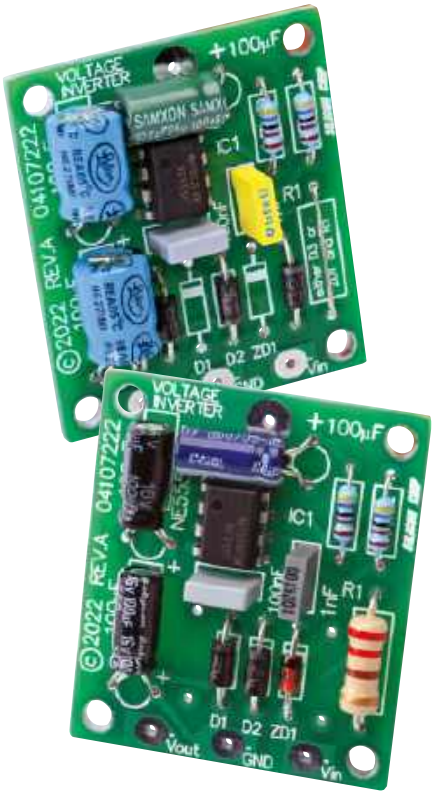
Dioda D3 vs dioda Zenera ZD1

Jeżeli napięcie zasilające może przekraczać 15 V, zamiast diody D3 można zastosować diodę Zenera ZD1 wraz z rezystorem R1. Wartość napięcia ZD1 dobiera się w zakresie od 9,1 V do 15 V, w zależności od potrzebnego napięcia wyjściowego. Następnie należy obliczyć odpowiednią wartość rezystora R1, który ograniczy prąd płynący przez diodę.

Rozważmy przykład: układ ma pracować jako inwerter i dostarczać napięcie około –9 V przy poborze prądu do 13 mA. Z wykresu na rysunku 1 wynika, że aby uzyskać takie napięcie przy tym obciążeniu, należy zasilić układ napięciem 12 V. W takim przypadku odpowiednim wyborem będzie dioda Zenera 12 V o mocy 1 W (ZD1).

Wartość rezystora R1 zależy od spodziewanego napięcia wejściowego. Jeśli napięcie Vin wynosi 21 V, różnica napięć na R1 będzie wynosić 9 V (czyli 21 V–12 V). Maksymalny dopuszczalny prąd dla diody Zenera 12 V/1 W wynosi 83,33 mA (1 W÷12 V).

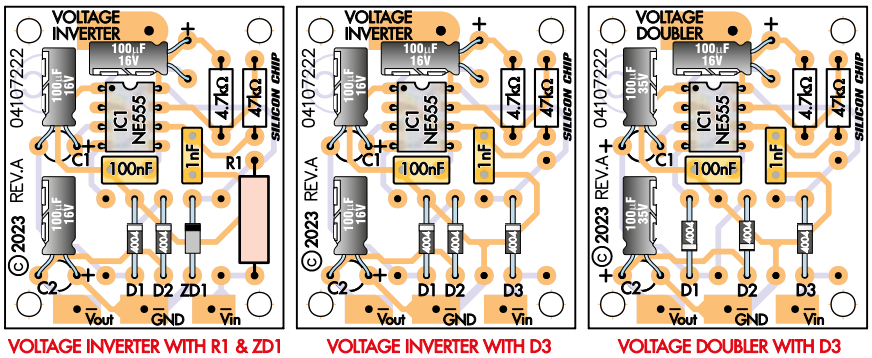
Zazwyczaj diodę Zenera należy stosować z co najmniej 50-procentowym zapasem mocy, aby zapobiec jej przegrzewaniu się. Dodatkowo, aby utrzymać stabilną regulację napięcia, prąd płynący przez diodę powinien wynosić nie mniej niż 5 mA. Oznacza to, że zalecany zakres prądu pracy mieści się pomiędzy 5 mA a 41,6 mA.



Zarówno moduł podwajacza napięcia (u góry), jak i moduł inwertera (u dołu) wymagają jedynie układu scalonego timera 555 i kilku innych elementów

Wartość rezystora R1 oblicza się odejmując od napięcia wejściowego Vin napięcie Zenera (12 V), a następnie dzieląc wynik przez prąd odpowiadający 50-procentowej mocy znamionowej – czyli 41,6 mA. Dla napięcia Vin równego 21 V, otrzymujemy wartość R1 równą 216 Ω, co pozwala zastosować standardowy rezystor 220 Ω.

Moc wydzielana w rezystorze wynosi $V^2 \div R1$, czyli 368 mW (9^2 V÷220 Ω). Najlepszym wyborem będzie zatem rezystor o mocy



Rysunek 6. Oznaczenia na płytce drukowanej dla wersji inwertera i podwajacza. Oznaczenia wariantu podwajacza umieszczono na spodzie płytki, natomiast wszystkie elementy montowane są po stronie górnej

eprasa.pl 7d549de066

1 W. Można również użyć elementu o mocy 0,5 W lub 0,6 W, jednak należy liczyć się z jego zauważalnym nagrzewaniem się.

Układ może pobierać prąd do około 36,6 mA (41,6 mA–5 mA), zanim prąd przez diodę Zenera spadnie do wartości granicznej 5 mA. Jeśli chcemy uzyskać 13 mA przy napięciu wyjściowym Vout, zakładając sprawność przetwornicy na poziomie 75% (co jest wartością realistyczną), prąd wejściowy wyniesie 17,3 mA (13 mA ÷ 0,75). Oznacza to, że przez ZD1 będzie płynąć około 17,7 mA, co w zupełności wystarcza do utrzymania stabilnej pracy układu. Dodatkowo uwzględniony jest zapas prądu dla zasilania generatora, który pobiera około 5 mA.

Budowa

Układ został zmontowany na płytce drukowanej oznaczonej kodem 04107222, o wymiarach 37 mm × 42,5 mm. Rozmieszczenie i orientacja elementów D1, D2, C1 i C2 w wersji inwertera zostały pokazane na górnej stronie płytki. W przypadku wersji podwajacza te same elementy rozmieszczono na spodniej stronie, co przedstawiono na **rysunku 6**.

Warto zauważyć, że rysunek 6 przedstawia jedynie konfigurację inwertera, wraz z możliwymi wariantami montażowymi elementów D3 oraz ZD1 i R1. Nic jednak nie stoi na przeszkodzie, aby układ ZD1/R1 zastosować również w wersji podwajacza – wystarczy pominąć D3 i zamiast niej wlutować diodę Zenera wraz z rezystorem.

Wszystkie elementy przewidziano do montażu po górnej stronie płytki drukowanej, niezależnie od wybranej wersji układu. Dla wersji podwajacza warstwę opisową przeniesiono na spodnią stronę płytki, aby uniknąć kolizji z oznaczeniami wersji inwertera znajdującymi się na stronie górnej.

Płytka wyposażona jest w cztery otwory montażowe, które umożliwiają przymocowanie jej do podłoża za pomocą dystansów. Możliwy jest także montaż pionowy – z wykorzystaniem sztywnych, ocynowanych przewodów wlutowanych w zaciski Vin, GND i Vout. Dodatkowy otwór znajdujący się w górnej części płytki może służyć jako punkt wzmocnienia mechanicznego, jeśli konstrukcja tego wymaga.

Jak już wspomniano, dioda D3 może zostać zamontowana w celu ochrony układu przed odwrotną polaryzacją – jeśli takie zabezpieczenie jest potrzebne. W przeciwnym przypadku można ją zastąpić zworą. Alternatywnie, jeśli zachodzi potrzeba ograniczenia napięcia zasilającego układ IC1 lub uzyskania ściśle określonego napięcia wyjściowego, zamiast D3 (lub zamiast zwory) należy zastosować rezystor R1 oraz diodę Zenera ZD1.

Montaż układu należy rozpocząć od przylutowania elementów przewlekanych – zgodnie z wersją, którą chcemy zbudować. W pierwszej kolejności zaleca się osadzić rezystory i diody. Przed lutowaniem należy upewnić się, że wszystkie diody zostały zorientowane zgodnie z rysunkiem – paski oznaczające katody powinny być skierowane ku górnej krawędzi płytki drukowanej.

Układ scalony IC1 można wlutować bezpośrednio w płytkę, pamiętając o zachowaniu właściwej orientacji. Następnie należy przystąpić do montażu mniejszych kondensatorów foliowych typu MKT, które nie posiadają biegunowości.

Trzy kondensatory elektrolityczne mają wystarczająco dużo miejsca, aby można je było zamontować w pozycji poziomej (na leżąco), jednak w razie potrzeby dopuszczalny jest również montaż pionowy. Należy zachować szczególną ostrożność przy ustalaniu ich biegunowości, ponieważ kierunek montażu różni się w zależności od tego, czy układ pracuje jako inwerter, czy jako podwajacz napięcia. We wszystkich przypadkach wyprowadzenie oznaczone na obudowie paskiem – krótsze – odpowiada biegunowi ujemnemu.

Testowanie

Testowanie układu jest proste i nie zajmuje wiele czasu. Do wejścia należy doprowadzić napięcie zbliżone do wartości docelowej, jaka będzie używana w końcowej aplikacji, a następnie sprawdzić, czy napięcie wyjściowe jest odpowiednio wyższe (w przypadku podwajacza) lub ujemne (dla inwertera) i czy mieści się w przewidywanym zakresie.

Następnie należy podłączyć obciążenie – na przykład rezystor o mocy 5 W – i sprawdzić, czy napięcie nie obniża się bardziej, niż można się było spodziewać.

Jeśli układ nie pobiera prądu, pobiera go zbyt dużo lub napięcie wyjściowe jest nieprawidłowe, należy upewnić się, że wszystkie elementy zostały zamontowane w odpowiednich miejscach i są zgodne z wersją układu, którą przedstawiono na rysunku 6. Trzeba również sprawdzić jakość połączeń lutowanych oraz upewnić się, że nie występują zwarcia między polami lutowniczymi ani między wyprowadzeniami elementów. ■

John Clarke

Materiały dodatkowe dostępne są na stronie Silicon Chip:
https://www.siliconchip.com.au/Shop/8/6804

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

PRENUMERATA EdW+

Rozpocznij przygodę z elektroniką! Poznaj podstawy elektroniki z prenumeratą „Elektroniki dla Wszystkich" wraz z zestawem Praktyczny Kurs Elektroniki (PKE)

Na PKE składa się zestaw edukacyjny EDW A09 KPL, w którym znajdziesz:
1. Projekt – samodzielnie uruchamiany układ elektroniczny. Wszystkie układy są montowane na dołączonej płytce stykowej, do której wkłada się „nóżki" elementów na wcisk,
2. Pendrive z wykładami i materiałami multimedialnymi kursu PKE,
3. Zasilacz płytek stykowych AVT3072 C,
4. Zasilacz impulsowy 12 V, 1,4 A.

Cena prenumeraty EdW+PKE wynosi 280,90 zł. Zamówienia na prenumeratę w ofercie EdW+ możesz złożyć na stronie **www.UlubionyKiosk.pl**

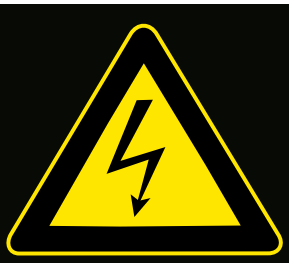
eprasa.pl 7d549de066

Jak zbudowałem trzydziestomilimetrową cewkę Tesli z iskiernikiem

Mój projekt półprzewodnikowej cewki Tesli „Flame Discharge" z Silicon Chip z lutego 2022 r. (siliconchip.au/Article/15196) działał bez zarzutu. Brakowało mu jednak „kultowej" elektrody górnej w formie metalowego toroidu, który przychodzi na myśl większości ludzi na dźwięk hasła „cewka Tesli". Zbudowałem więc drugie urządzenie, nieco większe, za to bardziej zgodne z tradycyjnymi wyobrażeniami!

Układ wytwarza niebezpieczne napięcia!

W artykule nie przedstawiamy co prawda pełnego opisu budowy ani obsługi cewki Tesli, przekazujemy jednak szereg zaleceń i wskazówek osobom decydującym się na zbudowanie lub obsługę podobnego urządzenia.
Wszystkie elementy cewki Tesli działają pod napięciem groźnym dla życia i wytwarzają prąd zdolny do zatrzymania akcji serca lub spowodowania poważnych oparzeń. Nawet jeśli nie widać żadnego wyładowania, istnieje niebezpieczeństwo doznania oparzeń od promieniowania w. cz. Należy się zawsze upewnić, że nikt nie znajduje się w pobliżu miejsca wyładowania, gdy urządzenie jest włączone. Dopóki zasilanie nie zostanie wyłączone, a wyładowania nie ustaną, wszystkie części ciała należy trzymać z dala od urządzenia. Nie wolno zapominać, że wysokie napięcie może być obecne nawet wtedy, gdy wyładowania nie są widoczne.



Ostrzeżenie o zakłóceniach elektromagnetycznych

Prezentowana cewka Tesli jest generatorem wielkiej częstotliwości o mocy do 180 W. Iskierniki stanowią szerokopasmowe anteny radiowe.
Podczas pracy układ może powodować zakłócenia radiowe w szerokim zakresie częstotliwości, zwłaszcza w pasmach średnio- i krótkofalowym, w tym na częstotliwościach nadawania rozgłośni radiowych, w krótkofalowym paśmie amatorskim, a także na niektórych częstotliwościach telefonii komórkowej. Prace z układem zaleca się przeprowadzać w „klatce Faradaya".

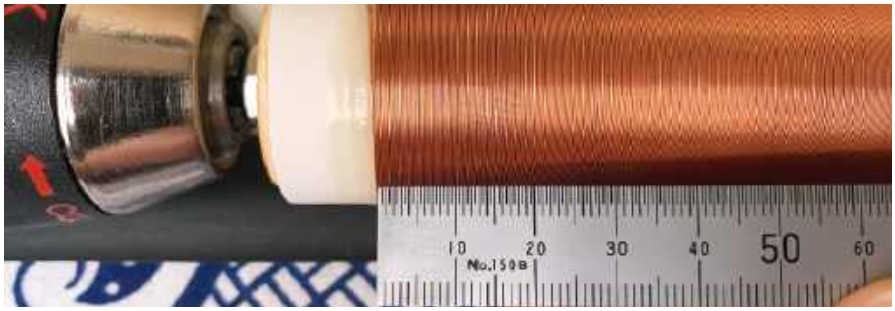
eprasa.pl 7d549de066

Zbudowanie pełnowymiarowej cewki Tesli jest przedsięwzięciem ambitnym. Moja motywacja do zbudowania takiego urządzenia zaczęła osiągać szczyt w sierpniu 2020 r. Wtedy zdecydowałem się wykonać niewielką cewkę Tesli w tradycyjnej postaci. Tradycyjnej zarówno dlatego, że cewka jest osłonięta metalowym torusem, jak i dlatego, że wykorzystuje generator oparty na iskierniku. Generator steruje transformator, który wytwarza ekstremalnie wysokie napięcia (dziesiątki kilowoltów), niezbędne do uzyskania iskry.

Mój artykuł z lutego 2022 r. (opublikowany również w EdW 8/2024) opisywał, jak zrobić bardzo małą cewkę Tesli. Teraz przedstawiam raczej historię opisującą, jak zbudowałem cewkę nieco większą. Nie będę wracał do teorii cewek Tesli, którą przedstawiłem w numerze z lutego 2022 r., jedynie szybko ją podsumuję, aby wyjaśnić, czym ta wersja układu różni się od poprzedniej.

Cewka Tesli jest rodzajem transformatora rezonansowego wynalezionego przez Nikolę Teslę i opatentowanego 25 kwietnia 1891 roku. Przekształca on prąd przemienny o stosunkowo niskim napięciu (od kilkuset woltów do kilku kilowoltów) na napięcia bardzo wysokie (od kilkudziesięciu kilowoltów do megawoltów) za pośrednictwem dwóch obwodów rezonansowych LC (cewka/kondensator), które są ze sobą luźno sprzężone indukcyjnie.

Obwód pierwotny LC składa się z kondensatora („zbiornika"), indukcyjnej cewki pierwotnej i „przełącznika". Obwód pierwotny może być przełączany na kilka sposobów. W klasycznej cewce Tesli stosuje się iskiernik (**rysunek 1**). Inne topologie układu wykorzystują lampy elektronowe, a w nowoczesnych, podwójnych rezonansowych cewkach Tesli (DRSSTC) stosowane są tranzystory IGBT lub MOSFET. Takiej właśnie konfiguracji użyłem w moim projekcie z lutego 2022 roku.



Zdjęcie 1. Cewka wtórna. Ma blisko 38 zwojów na centymetr

Obwód wtórny LC składa się z cewki wtórnej (w formie wysokiej kolumny, która jest bardzo rozpoznawalnym elementem cewki Tesli) i „górnej elektrody", która realizuje pojemność rezonansową i stanowi miejsce wystąpienia iskry wysokiego napięcia.

Kondensator po stronie pierwotnej zaczyna się ładować, gdy do obwodu pierwotnego zostaje doprowadzone zasilanie. Napięcie na kondensatorze wzrasta do poziomu, przy którym następuje przebicie w iskierniku. Energia z kondensatora rozładowuje się wtedy przez szczelinę iskiernika i przez cewkę pierwotną. Energia oscyluje następnie z kondensatora do cewki pierwotnej i z powrotem, z wysoką częstotliwością, wyznaczoną przez pojemność kondensatora i indukcyjność cewki pierwotnej.

Zdolność cewki Tesli do generowania bardzo wysokich napięć i długich rozgałęzień łukowych (streamerów) wynika z procesu znanego jako rezonansowy wzrost napięcia, występującego w obwodzie wtórnym LC. Cewki Tesli mogą być projektowane do wytwarzania napięcia wielu milionów woltów.

Nowa koncepcja projektowa

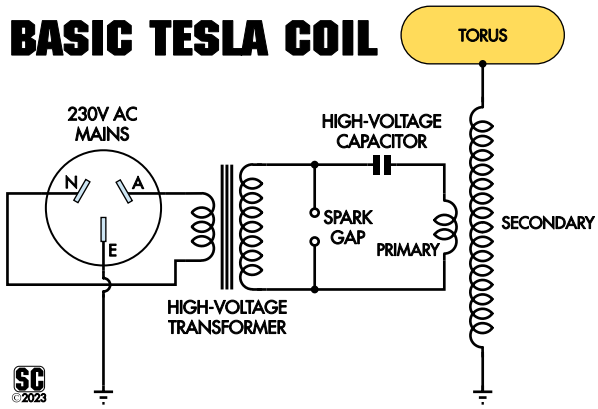
Moim pierwotnym pomysłem było zbudowanie małej cewki Tesli przy wykorzystaniu jako źródła wysokiego napięcia, zapalniczki z łukiem elektrycznym albo transformatora do oświetlenia neonowego (6 kV/30 mA). Miałem pod ręką kilka odpowiednich elementów, w tym kondensatory 3 nF/20 kV AC, „gałkowy" kondensator ceramiczny, mnóstwo emaliowanego drutu miedzianego o średnicy 0,25 mm oraz aluminiowy toroid o średnicy 107 mm i wysokości 27 mm.

Na bardzo wczesnych etapach projektu rozważałem zastosowanie cewki wtórnej o średnicy 50 mm. Wymagałoby to jednak tak dużej ilości drutu, że musiałbym specjalnie zamówić całą wielką szpulę. Mój miejscowy sklep Jaycar Electronics miał w małych szpulkach emaliowany drut miedziany o średnicy 0,25 mm. Biorąc pod uwagę dostępne długości i średnice rurek z PCW, spędziłem kilka godzin na obliczaniu uzwojenia wtórnego, które pozwoliłoby uzyskać współczynnik kształtu około 4:1. Ostatecznie w projekcie użyłem uzwojenia z drutu Jaycar na karkasie o średnicy 33,5 mm i wysokości 132 mm, umieszczonego na 30-milimetrowej rurce z PCW.

Uzwojenie wtórne

Przyciąłem rurkę PCW o średnicy 30 mm na długość 160 mm, uzyskując na każdym końcu około 10 mm prześwitu. Następnie obrobiłem rurkę papierem ściernym, a powierzchnię uszczelniłem dwiema warstwami lakieru elektrycznego UltiMeg 2000 (siliconchip.au/link/abha).

Obracałem rurkę w wiertarce ręcznej i powoli naprowadzałem na nią drut, co zajęło mi około dwóch i pół godziny. W ciągu



Rysunek 1. Schemat pokazujący jeden z najbardziej podstawowych układów cewki Tesli

Dane cewki wtórnej

częstotliwość rezonansowa	1618,28 kHz
kąt uzwojenia wtórnego	90°
długość uzwojenia	13,2cm
zwoje na centymetr	37,88
odstęp między zwojami	0,00936 mm
długość drutu	52,62 m
stosunek wysokość/średnica	3,94
rezystancja stałoprądowa	17,6699 Ω
masa drutu	0,024 kg
efektywna indukcyjność szeregowa (LES)	1,848 mH
równoważna indukcyjność energetyczna (LEE)	1,931 mH
indukcyjność dla niskiej częstotliwości (LDC)	1,879 mH
efektywna pojemność bocznikująca (CES)	5,233 pF
równoważna pojemność energetyczna (CEE)	5,009 pF
pojemność dla niskiej częstotliwości (CDC)	8,014 pF
efektywna pojemność obciążenia	3,997 pF
głębokość wnikania	0,0562 mm
rezystancja zmiennoprądowa	88,3825 Ω
dobroć	213

Rysunek 2. Wyniki oprogramowania JavaTC, którego używałem do projektowania cewki Tesli

eprasa.pl 7d549de066

Kity pokrewne tematycznie, dostępne na stronie: https://sklep.avt.pl:
Generator Tesli 15W, 15-24Vdc, DIY - generator wysokiego napięcia do samodzielnego złożenia
https://sklep.avt.pl/pl/products/generator-tesli-15w-15-24vdc-diy-generator-wysokiego-napiecia-do-samodzielnego-zlozenia-181768.html

następnych dni pokryłem i uszczelniłem uzwojenie wtórne kilkoma warstwami lakieru bezbarwnego.

Zmierzyłem, że jest 38 zwojów na centymetr (**zdjęcie 1**), wartość bardzo bliska obliczonej (37,88; **rysunek 2**), co w sumie daje około 500 zwojów.

Końce uzwojenia wtórnego uszczelniłem laminatem FR-4 (materiał na płytki drukowane). Techniki konstrukcyjne, które stosowałem do cewki wtórnej, są takie same jak w przypadku cewek znacznie większych (o wysokiej sprawności) – żadna część uzwojenia nie może nachodzić na inną. Uziemiany koniec uzwojenia zakończyłem miedzianym radiatorem komponentu, natomiast górna część cewki jest przytrzymywana nylonową śrubą, którą przed uszczelnieniem uzwojenia przykleiłem do płyty górnej. Zabezpieczyłem końce uzwojeń czarną taśmą elektryczną i nałożyłem jeszcze kilka warstw lakieru bezbarwnego.

Zdecydowałem się na mocowanie części wtórnej poprzez złącze, co pozwala na odłączanie tej części od całego systemu. Realizuje to podejście modułowe i umożliwia bezpieczne przechowywanie części wtórnej, gdy nie jest ona używana. Złącze służy również jako punkt podłączenia uziemienia elektrycznego u podstawy wtórnika, jak pokazano na **zdjęciu 2**.

Zdjęcie 2. W podstawę części wtórnej zostało wbudowane złącze, aby część tę można było łatwo usunąć, gdy cewka Tesli nie jest używana. Złącze służy również jako uziemienie

Po ukończeniu części wtórnej pomierzyłem ją z użyciem oscyloskopu i generatora sygnałowego. Rezystancja stałoprądowa cewki wynosiła 19,2 Ω, a częstotliwość rezonansowa – 1708 kHz z toroidem i 2489 kHz bez niego.

W tym momencie zdecydowałem, iż idzie mi na tyle dobrze, że zbuduję przyrząd wysokiej jakości, w którym istotny będzie aspekt estetyczny. Poza tym zrezygnowałem z pomysłu użycia zapalniczki łukowej – na rzecz nabytego przeze mnie transformatora do oświetlenia neonowego (NST), o napięciu znamionowym 6 kV i prądzie 30 mA (180 W).

Obliczenia uzupełniające wykazały, że kondensator rezonansowy powinien mieć pojemność 15,9 nF, a kondensator „ponadrezonansowy" (LTR) – 240 nF. Kontynuowałem jednak prace z wybranym początkowo kondensatorem 3 nF. Pojemność mogłem zawsze zwiększyć później.

Użycie transformatora do neonów oznaczało, że konieczne było użycie dodatkowych elementów: filtru ochronnego („filtr Terry'ego"), kondensatora do korekcji współczynnika mocy (PFC) oraz sieciowego filtru przeciwzakłóceniowego (EMI). Przypis redaktora: nazwa „filtr Terry'ego" pochodzi od imienia konstruktora, który wprowadził ten rodzaj filtru, a był nim Terry Fritz.

Dane techniczne cewki Tesli

Obwód pierwotny
Kondensator: 3 nF, 20 kV AC
Odczep: 4,25 zwoju
Częstotliwość: 1527 kHz
Indukcyjność odczepu: 2,23 μH
Indukcyjność całkowita: 13,5 μH

Obwód wtórny
Ilość zwojów: ~500
Częstotliwość rezonansowa bez toroidu: 2489 kHz
Częstotliwość rezonansowa z toroidem: 1708 kHz
Rezystancja stałoprądowa: 19,2 Ω
Indukcyjność: 1720 μH

Toroid
Średnica główna: 107 mm
Średnica mniejsza: 27 mm
Pojemność wyliczona: 4,62 pF
Wyliczone napięcie przebicia: 80,62 kV

Transformator do oświetlenia neonowego
Wyjście: 6 kV, 30 mA (180 W)
Rezystancja uzwojenia pierwotnego: 11 Ω
Rezystancja uzwojenia wtórnego: 12,7 kΩ (6,3 kΩ do odczepu środkowego)
Impedancja uzwojenia wtórnego: 200 kΩ

Zdjęcie 3. Zdecydowałem się na stożkową podstawę o kącie 30°, z regulowaną podstawą wykonaną z twardego drewna

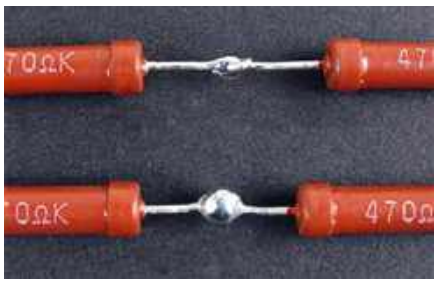
Konstrukcja części pierwotnej

Kolejną fazą projektu było zaprojektowanie i wykonanie cewki pierwotnej, wsporników oraz podstaw do montażu wszystkich głównych elementów cewki. Do kluczowych kryteriów podczas pracy z wysokimi napięciami i przy wysokich częstotliwościach należą: zapewnienie wystarczających odstępów (w celu zapobieżenia wyładowaniom łukowym i przebiciom izolacji), wybór odpowiednich materiałów nadających się do prac elektrycznych oraz użycie właściwych sposobów mocowania.

Jako główny materiał karkasu cewki głównej wybrałem SwitchPanel Type X. Jest to impregnowana żywica fenolowa, wzmocniona włóknem, przeznaczona do tworzenia izolacji elektrycznych (siliconchip.au/link/abhb).

Zamówiłem trzy sekcje wspornika cewki w firmie Vale Plastics, każda o wymiarach 180 mm × 180 mm. Jedna z nich ma centralny otwór o średnicy 50 mm, co umożliwia dostęp do złącza.

Projekt części pierwotnej wymagał zaawansowanej analizy uwzględniającej parametry elektryczne, rozmiar i kształt (płaska spirala, pionowy lub stożkowy). Biorąc pod uwagę sposób, w jaki strumień magnetyczny cewki pierwotnej miał być przekazywany do cewki wtórnej, zdecydowałem się na cewkę



Rysunek 4. Elementy filtra zostały zlutowane przy użyciu techniki zwanej „lutowaniem kulowym". Technika ta pomaga minimalizować straty wyładowań koronowych przy wysokich napięciach

eprasa.pl 7d549de066

pierwotną w kształcie stożka o kącie 30° (**zdjęcie 3**).

Pole wytwarzane przez stożkową cewkę pierwotną jest bardziej równomiernie przekazywane do cewki wtórnej. W najszerszym punkcie (w zwoju najbardziej zewnętrznym) szerokość cewki pierwotnej jest w przybliżeniu taka sama jak wysokość cewki wtórnej (~140 mm). Jako przewodnika użyłem miedzianej rurki kapilarnej o średnicy 2,14 mm z odstępem między zwojami (od krawędzi do krawędzi) wynoszącym 5 mm (7,14 mm między środkami). Daje to łącznie 10,5 zwoju, zapewniając łatwość dostrojenia.

Podstawa montażowa cewki pierwotnej powinna być regulowana, aby umożliwić precyzyjne dostrojenie sprzężenia z cewką wtórną. Budowę rozpocząłem od wykonania czterech klinów podpierających, wyciętych z twardego drewna. Przymocowałem je do panelu SwitchPanel dwuskładnikową żywicą epoksydową Loctite, która ma cenną właściwość wypełniania szczelin. Nie można tutaj używać metalowych śrub ani gwoździ, więc wszystkie stałe elementy są klejone ew. mocowane elementami nylonowymi.

Po wykonaniu cewki i umieszczeniu jej na wspornikach przykleiłem krańcowe nakładki drewniane większą ilością żywicy epoksydowej w celu poprawienia wytrzymałości mechanicznej i dla lepszej estetyki. Przykleiłem również centralny łącznik. Wyprowadziłem zacisk uziemienia części wtórnej, dając pasek miedziany, centralną śrubę mosiężną i nakrętkę żołędziową.

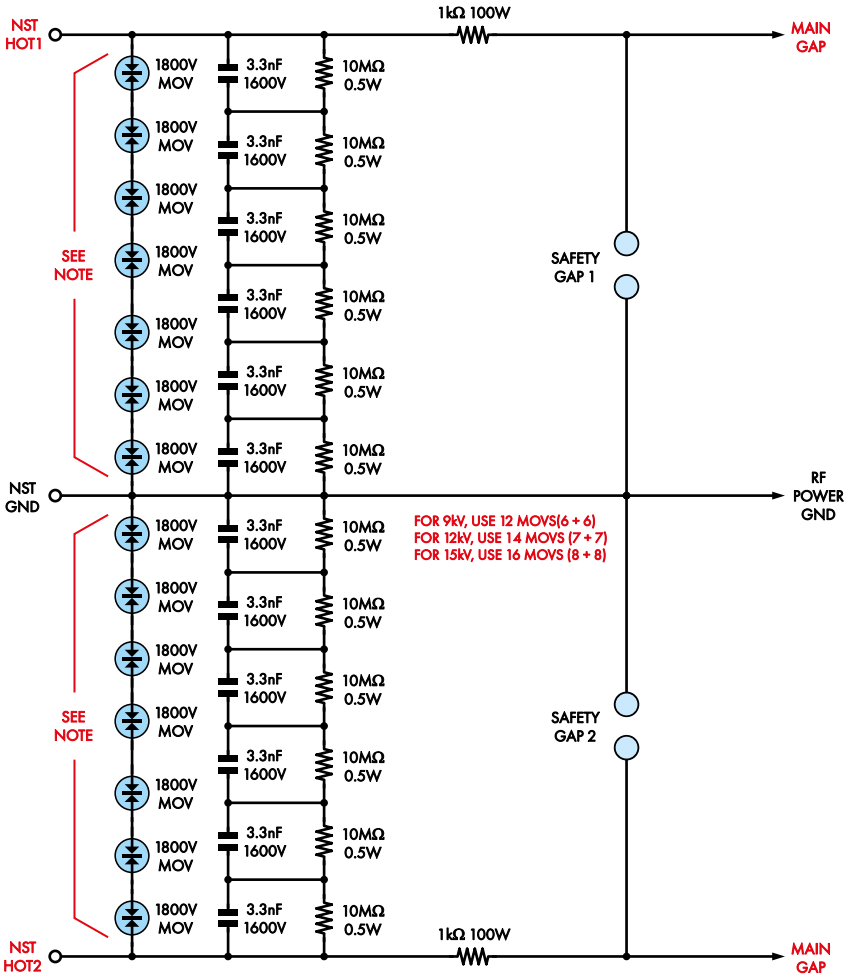
Od tego momentu części pierwotna i wtórna były prawie gotowe.

„Filtr Terry'ego" i iskierniki bezpieczeństwa

Jako źródła zasilania zamierzałem użyć transformatora do oświetlenia neonowego (NST). Uzwojenie wtórne wykonałem z bardzo cienkiego drutu nawojowego. Emaliowana izolacja takiego drutu zwykle nie radzi sobie zbyt dobrze z szybkimi, wysokonapięciowymi stanami przejściowymi. Stany takie powstają w cewce Tesli za każdym razem, gdy zapala się iskiernik i mogą one istotnie skrócić żywotność transformatora.

Jedną z metod ochrony uzwojenia wtórnego transformatora jest układ dolnoprzepustowych filtrów RC znany jako „filtr Terry'ego" (www.hvtesla.com/terry.html\) – **rysunek 5**.

Budowę filtru rozpocząłem od zamontowania głównych kondensatorów i warystorów na płytce z laminatu FR-4. Zaplanowałem ułożenie elementów, zaznaczyłem otwory



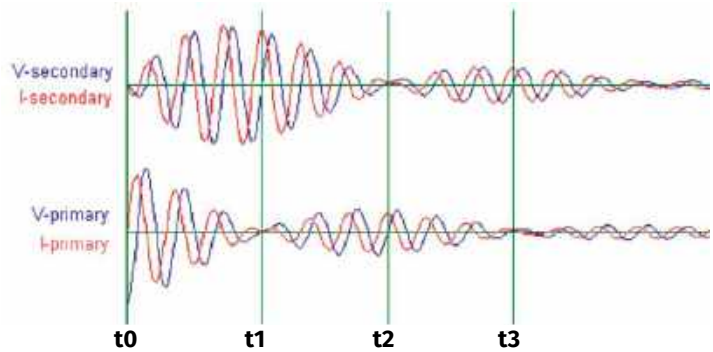
Rysunek 5. Układ filtra ochronnego cewki Tesli („filtr Terry'ego")

Zdjęcie 4. Iskiernik bezpieczeństwa. Zawiera trzy mosiężne gałki dołączone do filtra Terry'ego. Elementy są już rozmieszczone, ale jeszcze nie połączone. Gałki zostały umieszczone na blokach aluminiowych i ustawione tak, żeby można było regulować ich położenie

eprasa.pl 7d549de066

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

Zdjęcie 5. Po zmontowaniu filtra Terry'ego na płytce SwitchPanel Type X przeprowadziłem test weryfikujący działanie iskierników bezpieczeństwa



Rysunek 6. Czasy oznaczone t1 i t3 to pierwsze i drugie „wycięcie pierwotne". Są to chwile, w których prąd w uzwojeniu pierwotnym spada do zera i iskiernik można „zdusić"

t0:	Początek wyładowania w szczelinie
t0...t1:	Energia jest przekazywana z obwodu pierwotnego do wtórnego
t1:	Cała energia jest teraz w obwodzie wtórnym (1. wycięcie pierwotne)
t1...t2:	Energia pozostała w obwodzie wtórnym jest przekazywana do obwodu pierwotnego
t2:	Energia jest teraz w obwodzie pierwotnym (1. wycięcie wtórne)
t2...t3:	Energia pozostała w obwodzie pierwotnym przenosi się do wtórnego
t3:	Energia jest teraz w obwodzie wtórnym (2. wycięcie pierwotne)

Proces ten powtarza się do momentu, aż szczelina przestanie przewodzić (łuk wygaśnie). Gdy nastąpi wygaszenie, dojdzie do wykładniczego zaniku napięcia

do wiercenia używając jako szablonu kawałka prototypowej płytki uniwersalnej, po czym ręcznie wywierciłem otwory o średnicy 1 mm.

Lutowałem elementy stosując specjalną technikę zwaną „lutowaniem kulowym", gdzie połączenia są maksymalnie gładkie i kuliste, by zminimalizować późniejsze straty na wyładowania koronowe przy wysokich napięciach (**rysunek 4**).

Iskierniki bezpieczeństwa wykonałem z trzech mosiężnych gałek do szuflad. Każdą kulkę przeszlifowałem drobnym papierem ściernym na mokro i sucho, aby usunąć przezroczystą powłokę lakierniczą, a następnie nawierciłem otwory i nagwintowałem je gwintem M4.

Jako podpory gałek wykorzystałem trzy aluminiowe bloki. Nawierciłem i nagwintowałem każdy blok gwintem M4 w celu zamontowania ich na podłożu FR-4. Położenie dwóch skrajnych kulek jest regulowane, tak aby wyładowanie elektryczne w szczelinie powietrznej następowało przy odpowiednim napięciu. Na **zdjęciu 4** widać, jak ten układ jest zamontowany na zespole filtra Terry'ego.

Kable wysokiego napięcia, które łączą się z samą cewką, wykonałem skrętką OFC 7,5 mm² z nałożonymi dwiema warstwami taśmy PTFE. Dałem na to rurkę termokurczliwą, a następnie dodatkową warstwę taśmy PTFE i jeszcze jedną warstwę rurki termokurczliwej.

Łatwo dostępna biała taśma PTFE (hydrauliczna) ma wysoką wytrzymałość dielektryczną wynoszącą około 60…70 kV/mm (siliconchip.au/link/abhc). Zwykła taśma hydrauliczna PTFE o dużej gęstości (około 0,3 g/cm³) ma nominalną grubość 0,1 mm (siliconchip.au/link/abhd), a jej wytrzymałość dielektryczna to około 6…7 kV.

Filtr Terry'ego i iskierniki zmontowałem na płytce SwitchPanel Type X o wymiarach 150 × 250 × 12 mm. Połączenia elektryczne z filtrem wykonałem za pomocą mosiężnych okuć i nakrętek żołędziowych, natomiast połączenie z cewką Tesli odbywa się poprzez dwa aluminiowe bloki po lewej i prawej stronie. **Zdjęcie 5** przedstawia moje testy mające na celu weryfikację działania i regulację iskierników.

Iskrownik główny i obwód „zbiornika"

Po sfinalizowaniu filtra Terry'ego przeszedłem do głównego iskrownika i do rozmieszczenia elementów obwodu „zbiornika".

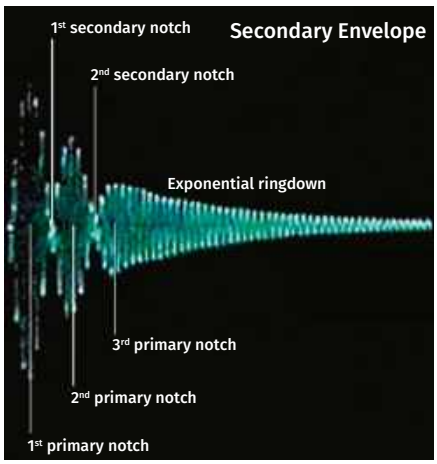
Sprawność działania cewki Tesli zależy od wydajności iskiernika, który działa jak przełącznik chwilowy, dopełniający obwód między kondensatorem a uzwojeniem pierwotnym. Energia kondensatora jest rozładowywana do uzwojenia pierwotnego, gdy przez iskiernik płynie prąd. Iskiernik jest urządzeniem prostym, ale dynamika jego działania jest złożona.

Odległość między elektrodami określa napięcie wyładowania iskiernika. W przypadku iskiernika statycznego odległość byłaby ustawiana do napięcia linii zasilającej (w tym przypadku 6 kV) i, przy jej prawidłowym ustawieniu, iskiernik „odpalałby" przy pełnym napięciu transformatora.

W niniejszym projekcie zastosowano iskiernik statyczny. Cewki znacznie większe wykorzystują jednak iskierniki obrotowe, zapewniające lepszą kontrolę i wydajność. W naszym przypadku zastosowanie takiego iskiernika byłoby lekką przesadą.

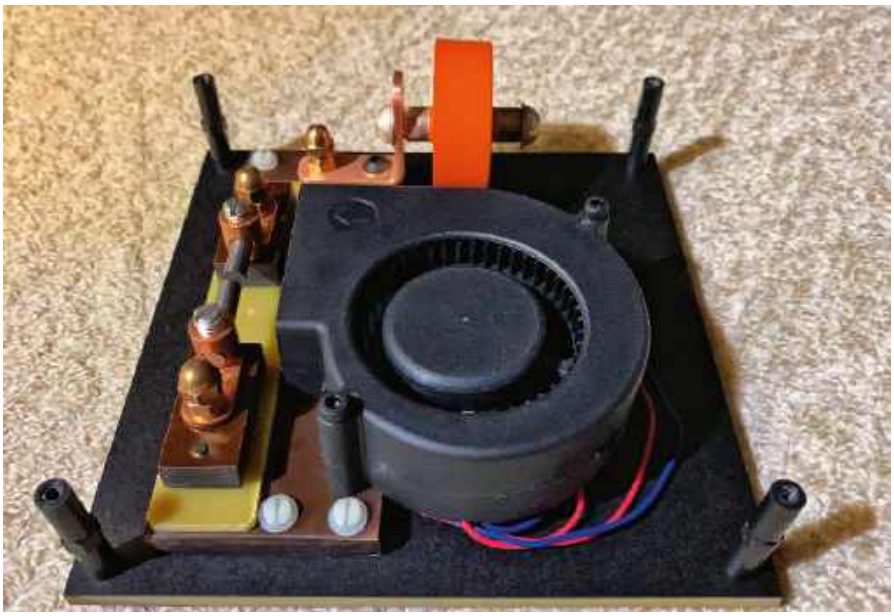
Główny iskiernik składa się z uchwytów elektrod i samych elektrod. W projekcie zastosowałem równoległe pręty wolframowe o średnicy 6,35 mm. Wolfram jest materiałem preferowanym na iskierniki ze względu na wysoką temperaturę topnienia, a tym samym odporność na spalanie i wżery.

Kiedy dochodzi do wyładowania w iskierniku, łuk elektryczny jonizuje i podgrzewa powietrze wewnątrz szczeliny, co czyni ją wysoce przewodzącą. Gdy szczelina już zacznie przewodzić, to będzie przewodzić dalej nawet gdy napięcie kondensatora spadnie poniżej początkowego napięcia przebicia. Może to powodować częściowy powrót energii z części wtórnej do pierwotnej. Energia ta zostanie rozproszona w postaci ciepła, dźwięku i światła, zmniejszając sprawność cewki Tesli. Do maksymalizacji energii utrzymywanej w obwodzie wtórnym niezbędne jest wygaszanie przewodzącego iskiernika, co jest określane jako „quenching" („zduszanie"; przypis redaktora).



Rysunek 7. Przebieg pokazuje zduszanie trzeciego wycięcia. W trzecim wycięciu pierwotnym szczelina przestaje przewodzić, po czym napięcie zanika w formie „dzwonienia"

eprasa.pl 7d549de066



Zdjęcie 6. Do schładzania iskrownika głównego zastosowałem wentylator odśrodkowy a nie osiowy, ponieważ zapewnia on lepszy przepływ powietrza

Zdjęcie 7. Zespół iskiernika składa się z dwóch elektrod w uchwytach, zamontowanych na podstawie z FR-4

Zduszanie iskiernika polega na tym, że przechodzi on w stan otwarty i przestaje przewodzić. Może to zajść tylko wtedy, gdy prąd przez przewodzący iskiernik spadnie poniżej pewnej wartości. Wówczas łuk przestaje być podtrzymywany, a powietrze w szczelinie schładza się na tyle, aby zapobiec przedwczesnemu powstaniu łuku, gdy w następnym cyklu napięcie ponownie zaczyna rosnąć.

Całkowity czas transferu energii to liczba półcykli potrzebnych przy częstotliwości rezonansowej do przeniesienia całej energii z obwodu pierwotnego do wtórnego (bez uwzględnienia strat). W idealnej sytuacji chcielibyśmy utrzymać całą energię w obwodzie wtórnym, ponieważ każda część energii, która powróci do obwodu pierwotnego, przełoży się na spadek sprawności, a tym samym doprowadzi do zmniejszenia energii wyładowań w obwodzie wtórnym.

Jedynym sposobem na zatrzymanie maksymalnej energii w obwodzie wtórnym jest powstrzymanie przewodzenia iskiernika w obwodzie pierwotnym, gdy tylko prąd w nim osiągnie zero. Moment ten, znany jako „wycięcie pierwotne", jest bardzo krótki, a ilość energii znajdująca się w obwodzie pierwotnym jest wtedy nadal wystarczająco wysoka, aby utrzymać przewodzenie iskiernika (**rysunki 6** i **7**). Jeśli po „wycięciu pierwotnym" iskiernik nadal przewodzi, kolejna okazja do jego otwarcia ma miejsce w następnej chwili, w której prąd przechodzi przez zero („drugie wycięcie pierwotne") i tak dalej.

Wczesne gaszenie iskiernika można osiągnąć różnymi metodami, w tym gaszeniem magnetycznym (siliconchip.au/link/abhe), przedmuchem powietrza (siliconchip.au/link/abhf), próżnią (siliconchip.au/link/abhg) lub przy pomocy iskiernika obrotowego.

Użycie wymuszonego przepływu powietrza, próżni lub szczeliny obrotowej pozwala na schłodzenie szczeliny poprzez usunięcie z niej gorącego, zjonizowanego powietrza, co zmniejsza szanse ponownego wyładowania. Zdecydowałem się użyć wentylatora odśrodkowego (pobierającego 860 mA przy 12 V), ponieważ wentylatory takie wytwarzają przepływ powietrza pod wysokim ciśnieniem w porównaniu do wentylatora osiowego (**zdjęcie 6**). Myślałem o sterowaniu prędkością wentylatora sygnałem PWM, ale podczas testów okazało się, że daje to w efekcie niewielki zakres kontroli, dlatego porzuciłem ten pomysł. Wentylator podczas działania pracuje z pełną prędkością.

Szczelina główna i szyna ochronna

Krytyczną częścią oscylatora opartego na iskrowniku jest szczelina główna. Wyciąłem cokół z żywicy fenolowej jako podstawę montażową zarówno dla zespołu iskiernika, jak i połączeń z kondensatorem. Sama szczelina została utworzona przez zamontowanie uchwytów elektrod na dwóch fenolowych wspornikach, które potem przymocowałem do paska z FR-4. Następnie umocowałem cały zespół na fenolowej podstawie (**zdjęcie 7**).

Aby utworzyć podporę dla kondensatora, użyłem miedzianej szyny zbiorczej z krótką miedzianą rurką, łączącą ją z jedną stroną szczeliny.

Ostatnim elementem związanym z cewką pierwotną jest szyna ochronna, która chroni cewkę i elementy obwodu

Zdjęcie 8. Najbardziej zewnętrzna rurka miedziana to szyna ochronna, która została dodana w celu ochrony obwodu pierwotnego przed łukiem elektrycznym

Zdjęcie 9. Do szyny ochronnej dodałem zacisk uziemienia (po prawej)

eprasa.pl 7d549de066

pierwotnego przed łukiem elektrycznym. Jest wykonana z miedzianej rurki kapilarnej o średnicy 2,3 mm (**zdjęcie 8**).

Szyna ochronna musi stanowić tor uziemienia o małej impedancji dla w. cz., więc wykonałem zacisk z miedzi dobrze dopasowany do szyny. Następnie dodałem słupek uziemiający, kończący uziemienie wtórne i szynę zaczepową (**zdjęcie 9**). Szyna ochronna nie może tworzyć zamkniętej pętli, aby nie stanowiła zwarcia.

Wsporniki szyny ochronnej wykonane są z profili drewnianych o wymiarach 9×9×46 mm z otworem 2,5 mm wywierconym w każdym wsporniku. Przed przyklejeniem na miejsce wsporniki przeszlifowałem i zabejcowałem żywicą epoksydową Loctite. Następnie wsunąłem miedzianą rurkę w przeznaczone na nią miejsce i otwartą część okryłem koszulką termokurczliwą.

Odczep uzwojenia pierwotnego

Wykonanie połączenia odczepu uzwojenia pierwotnego stanowiło spore wyzwanie. Na początku prac nad projektem wywierciłem cztery otwory przelotowe z myślą o przeprowadzeniu przewodu przez podstawy. Utrudniłoby to jednak demontaż i montaż ponowny. Wyprowadziłem więc przewód z boku, używając jako kontaktu zacisku bezpiecznika M205, pomniejszonego w celu uzyskania dokładnego dopasowania. Aby wzmocnić zacisk i zapewnić lepsze połączenie, dałem oplot miedziany.

W tym momencie znaczna część cewki Tesli była ukończona. Wciąż jednak czekałem na wysokonapięciowe rezystory upustowe (10 MΩ/10 kV) do obwodu kondensatora głównego.

Przeszukałem stronę internetową DigiKey i znalazłem rezystory Maxi-Mox 100 MΩ/10 kV 2,5 W firmy Ohmite (MOX-1-121006FE), znajdujące się na stanie magazynowym. Oprócz tego, że były dostępne, miały tę zaletę, że w rezystorze 10 MΩ rozpraszałaby się moc 7,2 W, a rezystancja 100 MΩ pozwoliła zmniejszyć tę moc poniżej 1 W. Rozładowanie kondensatora do bezpiecznego poziomu (50 V) następuje w ciągu 1,5 sekundy.

Zdjęcie 10. Transformator do oświetlenia neonowego został zmontowany na podstawie o grubości 12 mm wykonanej ze SwitchPanel. Do zamocowania nad nim filtra Terry'ego zostały użyte drewniane wsporniki

Uziemienie dla w. cz.

Jednym z ważnych choć często pomijanych zagadnień związanych z każdym układem wielkiej częstotliwości jest zapewnienie odpowiedniego uziemienia o małej impedancji. Cewki Tesli wytwarzają duże prądy w. cz., które muszą być prawidłowo odprowadzane do ziemi. Solidny system uziemienia jest kluczem do poprawnego działania cewki, ponieważ ziemia tworzy ścieżkę powrotną obwodu LC strony wtórnej.

Zakopałem na głębokości 1,8 m pręt uziemiający o średnicy 19 mm i długości 2,4 m oraz drugi pręt o rozmiarze „domowym" na głębokości 1,2 m. Połączyłem je ze sobą i podłączyłem do cewki kablem do spawarek o przekroju 25 mm².

Pomiary

Gdy cewka była już zasadniczo gotowa, wykonałem kilka pomiarów mających określić parametry nastrojenia, potwierdzić częstotliwości rezonansowe i porównać je z moimi obliczeniami.

Zmierzyłem okres fali w rezonansie: 124 µs. Odpowiada to czasowi całkowitego przeniesienia energii. Pierwsze „wycięcie" pojawiło się po około 8,2 µs.

Zasilanie

Transformator do oświetlenia neonowego przymocowałem do podstawy o grubości 12 mm i wymiarach 200 × 300 mm, wykonanej ze SwitchPanel. Na moduł filtra Terry'ego dałem dwa drewniane wsporniki (**zdjęcie 10**). Następnie dodałem skrzynkę kontrolną, która zawiera przeciwzakłóceniowy filtr liniowy TE Connectivity z serii 3A EMC, zapobiegający przedostawaniu się zakłóceń do sieci energetycznej. W skrzynce kontrolnej jest również mały zasilacz impulsowy (SMPS), dający napięcie 12 V i prąd 1,2 A dla wentylatora gaszącego.

Skrzynka kontrolna zawiera także wyłącznik sieciowy, przełącznik wentylatora i przełącznik zasilania transformatora, lampki potwierdzające aktywne zasilanie obwodów oraz termiczny wyłącznik magnetyczny 2 A (**zdjęcie 11**). Skrzynka jest zasilana przez autotransformator, co zapewnia pełną kontrolę nad działaniem cewki Tesli.

Pierwsze testy

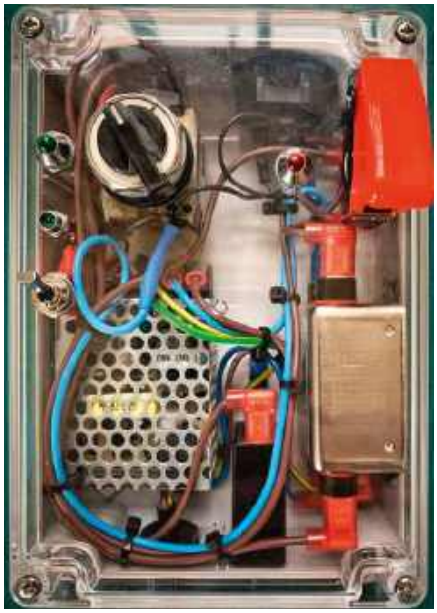
Po prawie trzech miesiącach prac nadszedł czas na pierwsze uruchomienie urządzenia i przeprowadzenie testu wstępnego.

Zauważyłem przeskoki iskry z końca uzwojenia pierwotnego do szyny ochronnej. Wystąpiły kilka razy w tym samym miejscu, powodując osmalenie. Zorientowałem się, że problem wynika z niewygładzonej powierzchni i nieosłoniętego końca uzwojenia pierwotnego. Innym przeoczeniem było nieuszczelnienie wsporników lakierem takim jak np. Ultimeg.

Naprawiłem te niedociągnięcia. Wygładziłem miedziany koniec uzwojenia i uszczelniłem go, nakładając żywicę epoksydową. Po wyczyszczeniu osmaleń uszczelniłem również wspornik.

Na wszystkie ważne miejsca na uzwojeniu pierwotnym i wspornikach dałem więcej żywicy epoksydowej. Na drewniane wsporniki nałożyłem też kilka warstw lakieru izolującego Ultimeg. Zostawiłem cały zespół uzwojenia pierwotnego na kilka dni do wyschnięcia i utwardzenia.

Z perspektywy czasu widzę, że, biorąc pod uwagę impulsowy charakter wysokiego napięcia na cewce pierwotnej, drewno nie było najlepszym materiałem. Lepsza do tego celu byłaby żywica fenolowa. Jest ona jednak droga w małych ilościach i o odpowiednich wymiarach. Do utworzenia mniejszych części mógłby zostać użyty SwitchPanel Type-X, ale części te musiałyby zostać wycięte z większego arkusza, co zajęłoby dużo czasu.



Zdjęcie 11. Skrzynka kontrolna cewki Tesli. Zawiera główny wyłącznik sieciowy, wyłączniki indywidualne wentylatora i transformatora, lampki kontrolne oraz inne elementy

eprasa.pl 7d549de066

Zdjęcia 12 i 13. Po lewej – wstępny test przy małej mocy, z przerwą iskrową 3...4 mm; po prawej – kolejny test z przerwą iskrową 5 mm

Po zakończeniu poprawek i ulepszeń powróciłem do testowania. Na potrzeby testu ustawiłem odstęp iskrownika na około 3...4 mm. Test z niską mocą zakończył się sukcesem w postaci pięknego wyładowania (**zdjęcie 12**).

Rozsunąłem następnie szczelinę iskrownika do około 5 mm i wykonałem kolejną próbę (**zdjęcie 13**). Udało się, ale zauważyłem, że dochodzi do sporadycznych wyładowań między ostatnim zwojem cewki pierwotnej a szyną ochronną. Rzecz jasna musiałem poprawić izolację między szyną a ostatnim zwojem cewki. Przeprowadziłem to, dodając kolejne warstwy lakieru Ultimeg oraz krótkie odcinki przezroczystej rurki winylowej wokół kluczowych punktów na linii zasilającej i na ostatnim zwoju. Zanim wróciłem do testów, pozwoliłem, żeby lakier utwardzał się przez ponad tydzień.

Kolejne testy przeprowadziłem już przy maksymalnej mocy, przykładając do transformatora pełne napięcie sieciowe. W trakcie tych testów poprawiłem równoległość ułożenia elektrod iskiernika. Testy przy pełnej mocy były bardzo udane i dawały wyładowania o licznych rozgałęzieniach. W punktach podparcia nie dochodziło do wyładowań łukowych.

Poprawianie części górnej

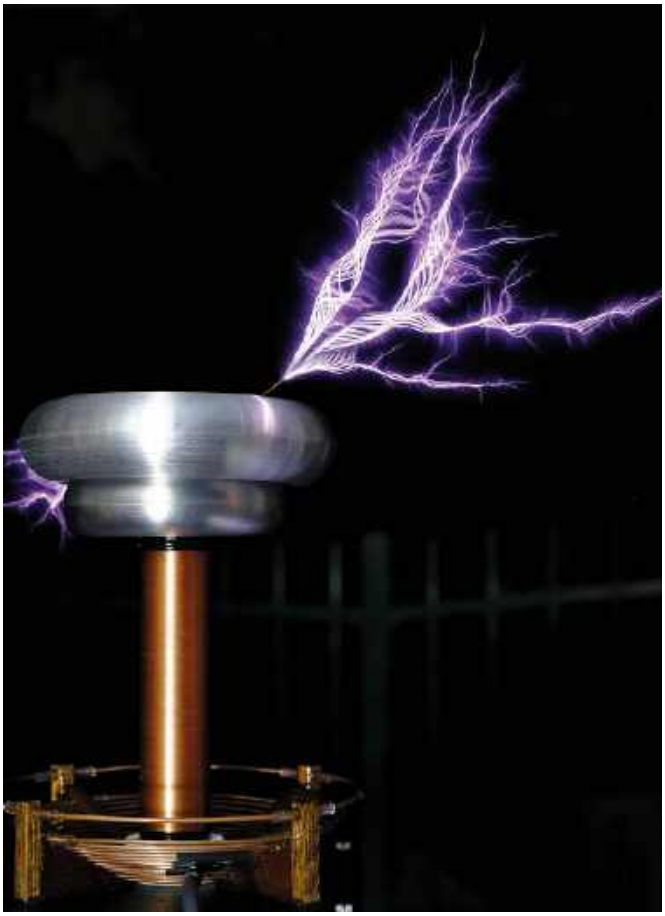
Zdecydowałem się zamówić większy toroid w pewnej amerykańskiej firmie. Dostawa zajęła prawie dwa miesiące. Obsługa klienta w tej firmie pozostawiała wiele do życzenia, więc nie będę wymieniać jej nazwy.

Nowy toroid ma główną średnicę 152 mm, mniejszą średnicę 38,64 mm, pojemność obliczoną 6,61 pF i obliczone napięcie przebicia 114,74 kV.

Większa pojemność toroidu wymagała dopasowania cewki pierwotnej, aby była ona zestrojona z niższą częstotliwością rezonansową cewki wtórnej. Test z użyciem oscyloskopu i generatora sygnału potwierdził, że nowa częstotliwość rezonansowa w cewce wtórnej wynosi 1360 kHz.

Aby uwzględnić większe obciążenie uzwojenia wtórnego i przywrócić rezonans, odwinąłem jeden zwój uzwojenia pierwotnego. **Zdjęcie 14** przedstawia wynik testu z większym toroidem przy pełnej mocy. Powstawały wyładowania wystarczająco długie, by dosięgnąć szyny prądowej. Ich długość była porównywalna z długością cewki wtórnej.

Dalsze eksperymenty przeprowadzałem po umieszczeniu na cewce obu toroidów. Efektem były dłuższe wyładowania. Ponowne dostrojenie cewki nie było konieczne.



Zdjęcie 14. Umieszczenie na starym toroidzie nowo zakupionego większego toroidu pozwoliło uzyskać silniejsze wyładowania. Byłem zadowolony z rezultatu, więc ostatecznie toroidy zespawałem ze sobą, a następnie wyczyściłem je i wypolerowałem, co poprawiło ich wygląd i sprawność działania

Czas na wnioski

Mała cewka Tesli, ale dużo pracy... Jestem jednak zachwycony rezultatem. Ciekawy był cały proces strojenia. Nikola Tesla i inni pionierzy elektrotechniki musieli go stworzyć od zera. Przekonałem się, że podczas pracy z tak wysokimi napięciami trzeba zwracać szczególną uwagę na izolację.

Tesla był geniuszem – wymyślił tak elegancki sposób wytwarzania skrajnie wysokich napięć przy użyciu bardzo ograniczonej techniki dostępnej w jego czasach.

Zbudowanie cewki Tesli jest zadaniem, któremu nie każdy podoła (przypis redaktora: budowa takiego układu wymaga ostrożności, dużej precyzji i cierpliwości; to zajęcie dla doświadczonych i odpowiedzialnych elektroników). Tym niemniej samo urządzenie jest imponujące i stanowi obowiązkowy element laboratorium każdego szalonego naukowca! ■

Flavio Spedalieri

Tekst poświęcam pamięci mojej Mamy, Ziny Spedalieri. Była zdumiona, gdy zobaczyła wydrukowany mój pierwszy artykuł o cewce Tesli. Niestety, straciliśmy Mamę 2 czerwca 2022 r. Wiele by dla niej znaczyło, gdyby ujrzała, że wydrukowany został również drugi artykuł.

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

eprasa.pl 7d549de066

Wielostopniowa ładowarka akumulatorów z przetwornicą Buck-Boost

Opisywany w artykule niedrogi moduł rozszerzający zamienia nasz sterownik LED dużej mocy (przetwornicę Buck-Boost) w ładowarkę akumulatorów z automatycznym przełączaniem faz ładowania. Urządzenie to może współpracować z wieloma typami ogniw, jednak szczególnie dobrze sprawdza się w przypadku akumulatorów kwasowo-ołowiowych. Oferuje między innymi regulację napięcia ładowania zasadniczego i podtrzymującego, kompensację temperaturową, tryb długotrwałego przechowywania, wskaźnik stanu ładowania oraz niski pobór prądu w stanie czuwania.

Gdy w Silicon Chip z czerwca 2022 roku (oraz w EdW ze stycznia 2025 roku) zaprezentowaliśmy projekt sterownika LED Buck-Boost o dużej mocy (siliconchip.au/Article/15340) wyjaśniliśmy, że może on również pełnić funkcję ładowarki akumulatorów, zasilanej z szerokiego zakresu napięć stałych.

Jednak w swej pierwotnej wersji urządzenie działało wyłącznie jako jednostopniowa ładowarka (bez wsparcia dla faz ładowania). Tymczasem do prawidłowego ładowania – zwłaszcza akumulatorów kwasowo-ołowiowych – niezbędne jest zastosowanie ładowarki wielostopniowej. Właśnie taką funkcjonalność zapewnia opisany poniżej prosty moduł rozszerzający.

Jedną z dodatkowych zalet szerokiego zakresu napięcia zasilania jest możliwość wykorzystania jako źródła energii tanich, a przy tym wydajnych i mocnych zasilaczy do komputerów przenośnych (zwykle o napięciu około 19 V).

Moduł ładowarki

Tę dodatkową płytkę nazywamy modułem ładowarki. W połączeniu ze wspomnianym sterownikiem zasilania LED dużej mocy tworzy on kompletny system do ładowania akumulatorów. Dzięki temu modułowi możliwe jest teraz realizowanie wszystkich etapów ładowania: wstępnego, doładowywania, podtrzymującego oraz trybu magazynowania.

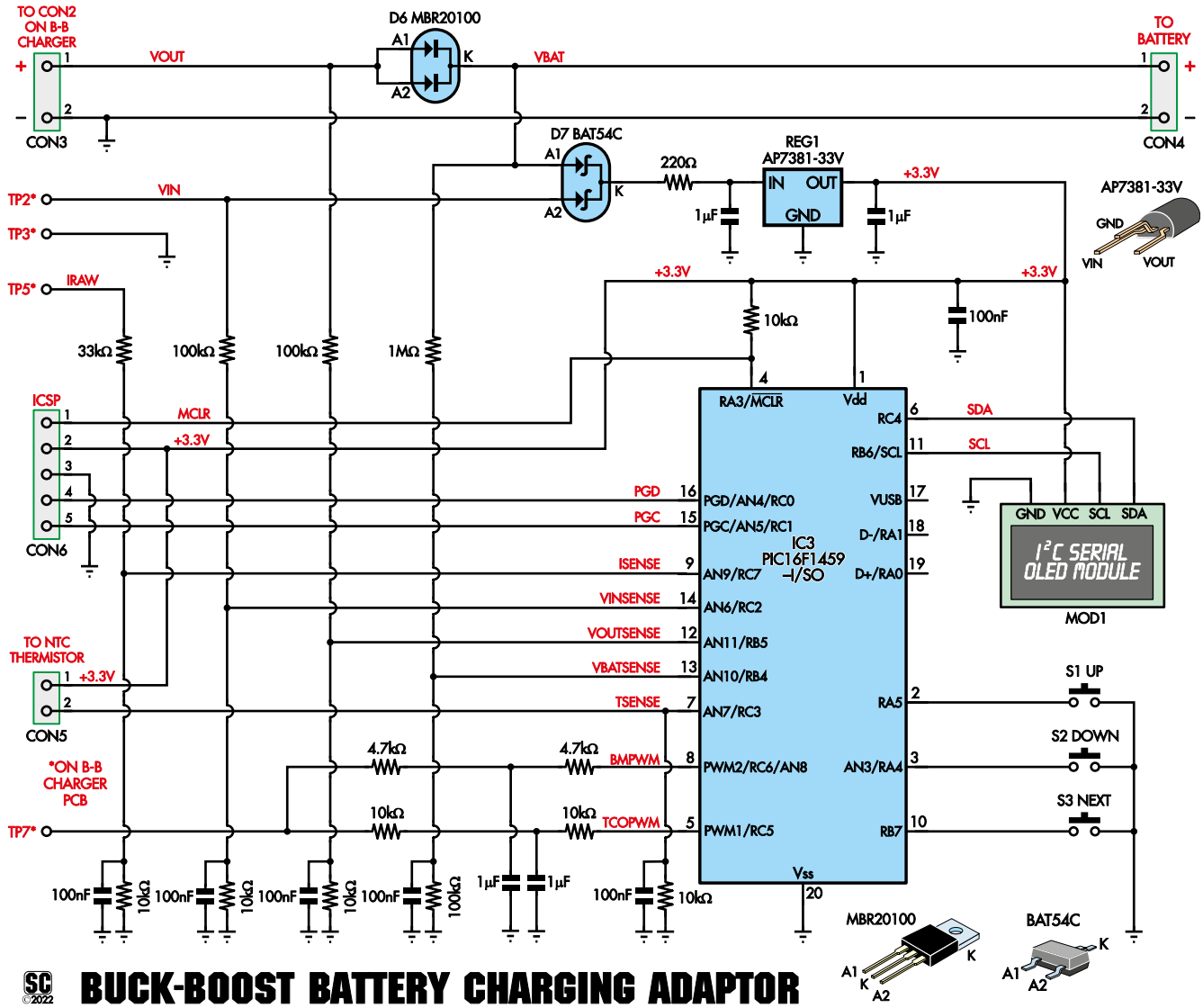
Cechy i specyfikacja:

- napięcie wejściowe: od 11,3 V do 35 V DC przy prądzie do 10 A,
- napięcie wyjściowe: od 7 V do 34 V DC,
- prąd ładowania: do 8 A (dla prądów powyżej 5 A zaleca się zastosowanie dodatkowego radiatora),
- kompatybilność: właściwa dla większości akumulatorów 12 V i 24 V,
- obsługiwane tryby ładowania: zasadnicze, doładowywanie, podtrzymujące i przechowywania,
- możliwości regulacji: napięcie, prąd i czas ładowania,
- wyświetlacz: kompaktowy wyświetlacz OLED do konfiguracji i prezentacji stanu akumulatora,
- obsługa: wbudowane przyciski umożliwiające konfigurację i zmianę ustawień,
- kompensacja temperaturowa: automatyczne dostosowanie napięcia ładowania do temperatury akumulatora,
- pobór prądu w stanie czuwania: typowo 10 mA, zredukowany do około 1 mA przy braku zasilania.

Opisywany moduł ładowarki został zbudowany na bazie naszego sterownika diod LED dużej mocy – przetwornicy podwyższająco-obniżającej napięcie (Buck-Boost) oraz dodatkowej płytki rozszerzeń (moduł ładowarki). Połączenie tych dwóch elementów tworzy wielostopniową ładowarkę idealną do pracy z akumulatorami kwasowo-ołowiowymi

Kompletny zestaw tworzy kompaktowy układ modułowy, przeznaczony do montażu wewnątrz obudowy lub szafki sterowniczej. Przedni panel z przezroczystej płyty akrylowej może pełnić funkcję ramki montażowej, umożliwiającej dostęp do wyświetlacza i przycisków od zewnątrz. Zespół ładowarki może być również wykorzystywany jako samodzielne, niezależne urządzenie

eprasa.pl 7d549de066



BUCK-BOOST BATTERY CHARGING ADAPTOR

Rysunek 1. Schemat modułu ładowarki nie zawiera wielu elementów, ponieważ większość z nich to podzespoły umożliwiające podłączenie mikrokontrolera IC3 do wybranych punktów na płytce przetwornicy w celu monitorowania jego parametrów oraz sterowania pracą układu. Mikrokontroler wpływa na napięcie wyjściowe przetwornicy poprzez modyfikację polaryzacji jego wejścia sprzężenia zwrotnego, za pośrednictwem punktu testowego TP7

Całość zachowuje szeroki zakres napięcia wejściowego, charakterystyczny dla oryginalnej przetwornicy, a także wysoką sprawność energetyczną i zdolność do pracy z dużymi prądami.

Moduł ładowarki wyposażono w niewielki wyświetlacz OLED, który informuje o bieżącej pracy układu oraz umożliwia monitorowanie stanu akumulatora i zasilania. Do jego konfiguracji służą trzy przyciski sterujące.

Ładowarka została zaprojektowana głównie z myślą o pracy z akumulatorami kwasowo-ołowiowymi o napięciu 12 V i 24 V oraz ich różnymi odpowiednikami i zamiennikami, takimi jak akumulatory AGM, a nawet litowe. Dzięki możliwości regulacji wielu parametrów zarówno w samej przetwornicy, jak i w module ładowarki, możliwe jest również ładowanie innych typów ogniw. Szczególnie dobrze sprawdza się to w przypadku akumulatorów $LiFePO_4$, które zostały opracowane tak, aby odwzorowywać charakterystykę pracy klasycznych akumulatorów kwasowo-ołowiowych.

Jeśli potrzebne jest wyłącznie ładowanie podtrzymujące, wystarczy użyć samego oryginalnego sterownika LED dużej mocy. W takim przypadku należy ustawić jego napięcie wyjściowe na poziomie napięcia podtrzymującego danego akumulatora. Dla wielu akumulatorów 12 V,

Jednopinowe złącza na płytce drukowanej przetwornicy powinny zostać połączone bezpośrednio z odpowiadającymi im złączami na płytce modułu ładowarki. Najprostszym sposobem wykonania tego połączenia jest nałożenie gniazd (żeńskich) na piny (męskie), a następnie zamocowanie płytki modułu ładowarki przy użyciu elementów montażowych

eprasa.pl 7d549de066

zwłaszcza kwasowo-ołowiowych, wartość ta wynosi zazwyczaj 13,5 V...13,8 V. Prąd ładowania można następnie ograniczyć do poziomu odpowiedniego dla danego typu akumulatora, zastosowanego zasilacza oraz przekroju przewodów.

Ograniczenie prądu w przetwornicy sprawia, że nawet głęboko rozładowany akumulator może zostać bezpiecznie doładowany do poziomu podtrzymującego – bez ryzyka jego uszkodzenia, przeciążenia zasilacza czy przegrzania przewodów. Należy jednak pamiętać, że ładowanie wyłącznie w trybie podtrzymującym nie pozwala w pełni wykorzystać pojemności akumulatora i nie jest również najefektywniejszym pod względem czasu sposobem jego ładowania.

Podczas etapu ładowania zasadniczego do akumulatora płynie zwiększony prąd, a napięcie również utrzymywane jest na podwyższonym poziomie. Celem tego etapu jest szybkie podniesienie stopnia naładowania akumulatora do około 80% jego całkowitej pojemności.

Następnie przechodzi się do doładowywania, które polega na utrzymywaniu napięcia nieco wyższego od napięcia podtrzymującego. Dzięki temu możliwe jest dalsze doładowywanie akumulatora do poziomu około 95% pojemności.

Po zakończeniu tych dwóch faz następuje przełączenie w tryb ładowania podtrzymującego, którego zadaniem jest utrzymanie naładowania akumulatora na niemal maksymalnym poziomie, bez ryzyka przeładowania.

Aby możliwe było przeprowadzenie zarówno ładowania zasadniczego, jak i doładowywania, niezbędna jest możliwość zwiększenia napięcia wyjściowego sterownika. Konieczne jest również ciągłe monitorowanie napięcia i prądu akumulatora, aby móc ocenić jego stan i dostosować przebieg procesu ładowania.

Najlepszym rozwiązaniem byłoby wyposażenie ładowarki akumulatorów w możliwość monitorowania temperatury ogniwa i odpowiedniego dostosowywania napięcia wyjściowego. Dzięki temu można zapewnić optymalne warunki ładowania w zależności od aktualnej temperatury. Napięcie pracy akumulatora zmienia się wraz z temperaturą, dlatego stosowanie stałego napięcia ładowania w zmiennych warunkach otoczenia może prowadzić do jego niedoładowania lub przeładowania.

Ładowarka rozwiązuje ten problem, monitorując temperaturę akumulatora za pomocą termistora NTC i obliczając odpowiednie napięcie ładowania, uwzględniając współczynnik temperatury określony przez użytkownika.

Ładowarka charakteryzuje się dużą możliwością konfiguracji. Domyślne ustawienia są wystarczające do poprawnej pracy – choć niekoniecznie optymalne – w przypadku akumulatorów kwasowo-ołowiowych o napięciu 12 V, pod warunkiem odpowiedniego ustawienia ograniczenia prądu ładowania.

Należy jednak pamiętać, że istnieje możliwość zaprogramowania takich ustawień, które – przy braku znajomości zasad działania wielostopniowych ładowarek akumulatorów – mogą doprowadzić do uszkodzenia ogniwa. Warto również zaznaczyć, że ograniczenie prądu wbudowane w przetwornicę nie może zostać ustawione poniżej około 1,8 A, co sprawia, że urządzenie nie nadaje się do współpracy z małymi akumulatorami, które nie są przystosowane do ładowania z tak dużym natężeniem prądu.

Uszczelnione akumulatory kwasowo-ołowiowe o pojemności około 7 Ah – takie jak stosowane w instalacjach NBN, często oferowane jako opcjonalne źródło zasilania awaryjnego – to najmniejsze ogniwa, które zalecamy ładować za pomocą opisywanego urządzenia.

Zwykle ich maksymalny dopuszczalny prąd ładowania wynosi około 2 A. Również domyślne parametry ładowania zasadniczego – takie jak czas trwania i napięcie początkowe – zostały dobrane z myślą o akumulatorach nie mniejszych niż ten.

Szczegółowy opis modułu ładowarki

Moduł ładowarki łączy się ze przetwornicą w czterech istniejących punktach testowych. Choć pierwotnie nie przewidywano takiego zastosowania tych punktów, okazały się one idealnym miejscem do podłączenia dodatkowego układu.

Na **rysunku 1** przedstawiono schemat modułu ładowarki oraz sposób jego połączenia z przetwornicą. Układ został zbudowany w oparciu o mikrokontroler PIC16F1459 (oznaczony jako IC3).

Poszczególne elementy obu płytek zostały ponumerowane tak, jakby stanowiły jeden wspólny układ, dzięki czemu nie powinno być wątpliwości, do której części odnosi się dana numeracja.

Zacisk wyjściowy CON2 na płytce przetwornicy jest połączony przewodami wysokoprądowymi z zaciskiem CON3 modułu ładowarki, natomiast akumulator podłącza się do zacisku CON4 tego modułu.

Dzięki takiemu rozwiązaniu w torze ładowania można umieścić diodę Schottky'ego D6 przystosowaną do pracy z dużym prądem. Zabezpiecza ona akumulator przed rozładowaniem do przetwornicy w sytuacji, gdy zasilanie zostanie odłączone. Umożliwia to również niezależny pomiar napięcia wyjściowego ładowarki oraz napięcia samego akumulatora.

Zaciski wejściowe CON1 na płytce przetwornicy pełnią standardową funkcję przyłącza zasilania – tak jak we wszystkich innych zastosowaniach tego układu.

Cztery punkty testowe, z którymi łączymy się na płytce przetwornicy, to TP2, TP3, TP5 i TP7. Zostały one ponumerowane w taki sam sposób na obu płytkach i są połączone bezpośrednio za pomocą niskoprądowych złączy stykowych.

Napięcie zasilające płytkę Buck/Boost jest doprowadzane do punktu TP2, skąd zasila dzielnik rezystorowy 100 kΩ/10 kΩ względem masy. Umożliwia to modułowi przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC) mikrokontrolera IC3 monitorowanie napięcia wejściowego poprzez wejście analogowe AN6 (nóżka 14).

Podobny dzielnik zastosowano do pomiaru napięcia wyjściowego na złączu CON3, będącym wyjściem przetwornicy. Z kolei dzielnik o wartościach 1 MΩ/100 kΩ służy do monitorowania napięcia akumulatora podłączonego do zacisku CON4.

Stosunkowo duże wartości zastosowanych rezystorów ograniczają prąd pobierany z akumulatora w sytuacji, gdy zasilanie ładowarki jest odłączone.

Termistor NTC (o ujemnym współczynniku temperaturowym) o rezystancji 10 kΩ jest podłączony do złącza CON5 i wraz z rezystorem 10 kΩ tworzy górną połowę dzielnika napięcia. Termistor został umieszczony w taki sposób, aby mógł przylegać do ładowanego akumulatora, co umożliwia bieżące monitorowanie temperatury ogniwa.

Punkt testowy TP5 jest połączony z dzielnikiem rezystorowym 33 kΩ/10 kΩ, co umożliwia mikrokontrolerowi monitorowanie prądu ładowania.

Każdy z pięciu dzielników napięcia został wyposażony w kondensator o pojemności 100 nF, dołączony równolegle do dolnego rezystora. Ma to na celu ograniczenie zakłóceń oraz zapewnienie niskiej impedancji wejściowej dla przetwornika analogowo-cyfrowego. Dzielniki te są połączone z wyprowadzeniami 7, 9, 12, 13 i 14 układu IC3.

Dzięki zastosowaniu szyny 3,3 V jako napięcia odniesienia oraz dzielników o stosunku 10:1, układ IC3 może mierzyć napięcia do 36,3 V z rozdzielczością około 0,03 V. Zakres pomiaru prądu jest ograniczony przez maksymalne napięcie wyjściowe przetwornicy, a zatem możliwy jest pomiar w pełnym zakresie pracy układu.

Ostatnim połączeniem między modułem ładowarki a przetwornicą jest punkt testowy

eprasa.pl 7d549de066

TP7. Jest on podłączony do komparatora sprzężenia zwrotnego wewnątrz układu IC1 na płytce przetwornicy i zwykle znajduje się na poziomie 1,23 V. Jeśli napięcie to wzrośnie, przetwornica obniży napięcie wyjściowe; jeśli natomiast spadnie – napięcie wyjściowe zostanie zwiększone.

Dzięki temu możliwe jest regulowanie ustawionego napięcia wyjściowego przez dostarczanie lub odbieranie prądu za pośrednictwem TP7. Funkcję tę realizuje para elementów typu RCR (rezystor-kondensator-rezystor), podłączonych do tego punktu testowego.

Przebiegi PWM (modulowane szerokością impulsu), generowane na wyprowadzeniach 5 i 8 układu IC3, są wygładzane przez pierwszy rezystor każdej pary oraz połączony z nim kondensator o pojemności 1 μF.

Drugi rezystor w każdej z tych sieci przekształca wygładzone napięcie w niewielki prąd sterujący, który może podnieść lub obniżyć napięcie wyjściowe przetwornicy. Wygładzanie jest niezbędne, ponieważ każde tętnienie sygnału PWM przełożyłoby się bezpośrednio na odpowiadające mu wahania napięcia na wyjściu przetwornicy.

Dwie sieci RCR (złożone z dwóch rezystorów i kondensatora) pełnią odmienne funkcje. Sieć z dwoma rezystorami o wartości 10 kΩ służy do wprowadzania drobnych korekt związanych z kompensacją temperaturową. Z kolei sieć z rezystorami 4,7 kΩ umożliwia przekazywanie lub odbieranie większego prądu, a tym samym pozwala na szerszy zakres regulacji – wykorzystywana jest do ustawiania napięć ładowania zasadniczego i doładowywania.

Przy napięciu zasilania 3,3 V wypełnienie impulsu na poziomie 37% skutkuje napięciem około 1,23 V, co nie wywołuje zmian napięcia wyjściowego przetwornicy. Natomiast stały stan niski (czyli wypełnienie 0%) powoduje obniżenie napięcia na wejściu sieci RCR do 0 V, co z kolei skutkuje wzrostem napięcia wyjściowego przetwornicy o około 15%.

Warto zauważyć, że zmiana ta jest proporcjonalna do napięcia wyjściowego, ponieważ wartość odniesienia 1,23 V pochodzi z dzielnika napięcia o zmiennej wartości, znajdującego się na płytce przetwornicy (w tym z elementów takich jak VR1).

Choć możliwe byłoby zastosowanie jednej sieci RCR i jednego układu generującego sygnał impulsowy, uproszczenie oprogramowania układowego osiągnięto dzięki rozdzieleniu tych funkcji.

Dzięki temu mikrokontroler IC3, umieszczony na płytce modułu ładowarki, może równocześnie monitorować napięcia w obrębie przetwornicy i regulować jego napięcie wyjściowe, umożliwiając realizację różnych trybów ładowania.

Warto wspomnieć o pewnym osobliwym aspekcie konstrukcyjnym – mianowicie, rzeczywiste wartości napięcia i prądu ustawione za pomocą potencjometrów montażowych na płytce przetwornicy nie są znane modułowi ładowarki. Oznacza to, że niektóre parametry ładowania są ustalane jako proporcje względem innych napięć.

Monochromatyczny wyświetlacz OLED MOD1 z interfejsem szeregowym I²C jest podłączony do wyprowadzeń 6 i 11 układu IC3, a także do szyny zasilającej 3,3 V i masy. Moduł MOD1 sterowany jest przez układ IC3 za pomocą magistrali I²C.

Przyciski S1, S2 i S3 zostały połączone między masą a wyprowadzeniami 2, 3 i 10 układu IC3. W połączeniu z wyświetlaczem OLED tworzą one podstawowy interfejs użytkownika modułu ładowarki.

Zasilanie modułu ładowarki

Zasilanie modułu ładowarki jest pobierane głównie z punktów testowych TP2 i TP3, które są podłączone do wejścia CON1 poprzez bezpiecznik F1 znajdujący się na płytce przetwornicy. Prąd zasilający płytkę modułu ładowarki przepływa przez podwójną diodę D7 ze wspólną katodą oraz rezystor 220 Ω do stabilizatora napięcia REG1, który obniża napięcie do poziomu 3,3 V i zasila mikrokontroler PIC16F1459 (IC3) odpowiedzialny za realizację wszystkich funkcji ładowania wielostopniowego.

Stabilizator REG1 został dobrany ze względu na szeroki dopuszczalny zakres napięcia wejściowego oraz niski prąd spoczynkowy. Rezystor 220 Ω ogranicza moc tracącą się w samym stabilizatorze przy wysokich napięciach wejściowych, przejmując część tej mocy i tym samym zwiększając niezawodność układu.

Para kondensatorów ceramicznych o pojemności 1 μF pełni funkcję filtrującą dla wejścia i wyjścia stabilizatora REG1. Druga anoda diody D7 jest zasilana dodatnim biegunem akumulatora, podłączonego do zacisku CON4, co zapewnia zasilanie układu również w sytuacji braku napięcia z głównego źródła zasilania. Dzięki temu mikrokontroler IC3 może zapamiętać stan ładowania, nawet gdy napięcie wejściowe zostanie odłączone.

Układ IC3 wyposażono także w kondensator filtrujący o pojemności 100 nF, umieszczony pomiędzy linią zasilania 3,3 V (nóżka 1) a masą (nóżka 20). Wyprowadzenie 4 (MCLR) zostało podciągnięte do szyny zasilającej 3,3 V przez rezystor 10 kΩ, co zapobiega przypadkowym resetom mikrokontrolera.

Typowe wyprowadzenia służące do programowania układu (1, 4, 15, 16 i 20) są doprowadzone do opcjonalnego złącza programującego ICSP (CON6), co umożliwia programowanie układu IC3 bez konieczności jego demontażu z płytki.

Zasilanie ładowarki (całości)

Z kilku powodów zalecamy, aby napięcie doprowadzane do ładowarki przez złącze CON1 było, jeśli to możliwe, wyższe od typowego napięcia akumulatora.

Po pierwsze, przetwornica pracuje z większą sprawnością, gdy obniża napięcie wejściowe – czyli w trybie obniżającym (buck).

Po drugie, płytka modułu ładowarki czerpie energię z anody diody D7 o wyższym potencjale. W przypadku przepalenia się bezpiecznika wyjściowego F2 w przetwornicy, a jednocześnie zbyt niskiego napięcia zasilania względem napięcia akumulatora, ogniwo będzie się powoli rozładowywać przez układ modułu ładowarki.

Żadna z tych sytuacji nie stanowi zagrożenia dla działania układu, jednak uznaliśmy, że warto o nich wspomnieć, aby umożliwić pełne i świadome wykorzystanie możliwości ładowarki.

Sprzętowe oprogramowanie sterujące

Pracą modułu ładowarki, a tym samym ładowarki jako całości, steruje mikrokontroler IC3.

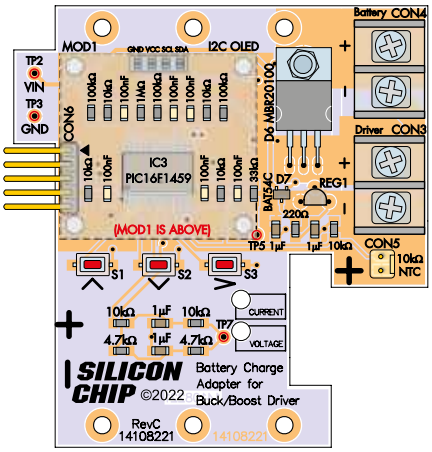
Tryb domyślny odpowiada funkcji ładowania podtrzymującego, dostępnej również w samodzielnej przetwornicy – napięcie wyjściowe nie podlega wtedy regulacji. Na wyświetlaczu pokazywane są trzy napięcia (wejściowe, wyjściowe i akumulatora), prąd wyjściowy oraz temperatura zmierzona przez termistor.

Przyjęto założenie, że prąd wyjściowy przetwornicy przepływa od zacisku CON2, przez CON3, aż do akumulatora podłączonego do CON4. Moduł ładowarki pobiera niewielki prąd – około 10 mA – który można pominąć w większości obliczeń.

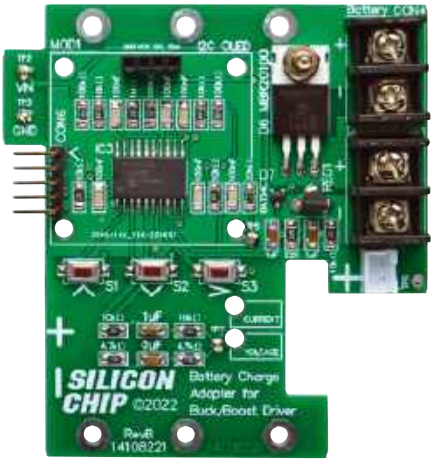
Jeśli jednak do zacisku CON2 (lub dalej) podłączone są inne elementy pobierające prąd, należy to uwzględnić, zwłaszcza przy określaniu progu odcięcia ładowania zasadniczego. Nadmierny pobór prądu może bowiem uniemożliwić prawidłowe zakończenie tego etapu ładowania.

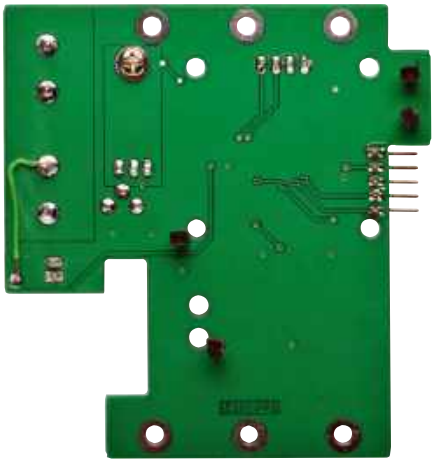
Gdy moduł ładowarki wykryje brak napięcia zasilającego, automatycznie przechodzi w tryb oszczędzania energii: wyświetlacz OLED zostaje wygaszony, a pobór prądu spada do około 1 mA. Działanie to jest konieczne, ponieważ w takiej sytuacji układ zasilany jest bezpośrednio z akumulatora.

eprasa.pl 7d549de066



Rysunek 2. Moduł ładowarki zawiera elementy zarówno do montażu powierzchniowego jak i przewlekanego. Powinien być łatwy w montażu. Jeśli zadbasz o prawidłowy kierunek montażu IC3 i nie pomylisz (nieoznakowanych) kondensatorów, nie powinieneś mieć żadnych problemów podczas uruchamiania. Cztery punkty testowe są od spodu wyposażone w gniazda do podłączenia do pinów na przetwornicy – szczegóły na zdjęciach





Widok od spodu płytki modułu ładowarki, przedstawiający gniazda połączeniowe dołączone do punktów testowych na płytce przetwornicy. Dodatkowy przewód widoczny na fotografii pochodzi z wersji prototypowej – w wersji oznaczonej jako RevC został on zastąpiony ścieżką na płytce drukowanej

Brak napięcia może wynikać z wielu przyczyn, zależnych od sposobu zasilania całego układu. Co więcej, w wielu zastosowaniach takie przerwy będą zjawiskiem normalnym i dość częstym.

W przypadku wykrycia napięcia zasilającego przy jednoczesnym braku napięcia wyjściowego z przetwornicy, na wyświetlaczu pojawi się komunikat „PWR FAULT". Zwykle oznacza to uszkodzenie przetwornicy, takie jak przepalony bezpiecznik. Tego rodzaju sytuacja wymaga interwencji – dopóki przetwornica nie zacznie ponownie dostarczać napięcia wyjściowego, ładowanie akumulatora nie będzie możliwe.

Temperatura mierzona przez termistor NTC jest monitorowana na podstawie napięcia na dzielniku rezystorowym, do którego jest on podłączony. Zmierzona wartość jest następnie przeliczana na temperaturę przy użyciu zapisanej w pamięci tabeli.

Jeśli dojdzie do przerwania lub zwarcia termistora, zostanie to wykryte i zasygnalizowane na wyświetlaczu.

W normalnych warunkach – przy prawidłowym działaniu termistora – mikrokontroler stosuje automatyczną kompensację temperaturową, proporcjonalną do współczynnika ustawionego przez użytkownika. Parametr ten, podobnie jak kilka innych, wyrażony jest w postaci proporcji – szczegóły zostaną omówione w dalszej części artykułu, w rozdziale poświęconym konfiguracji i testowaniu.

Ładowanie wieloetapowe

Typowa ładowarka wielostopniowa realizuje trzy główne fazy: ładowanie zasadnicze, doładowywanie oraz podtrzymujące.

W fazie ładowania zasadniczego akumulator jest ładowany z prądem o natężeniu ograniczonym do ustalonej wartości, natomiast napięcie wzrasta do zadanego poziomu – wyższego niż napięcie podtrzymujące. Gdy napięcie to zostanie osiągnięte i prąd zacznie maleć, ładowarka przechodzi do fazy doładowywania, w której utrzymywane jest stałe napięcie.

W miarę jak akumulator osiąga stan niemal pełnego naładowania, prąd nadal spada. Gdy spadnie poniżej określonej wartości progowej, ładowarka uznaje, że etap doładowywania został zakończony i przełącza się w tryb podtrzymujący, w którym napięcie zostaje obniżone do stałej, bezpiecznej wartości.

W opisywanym układzie proces ładowania przebiega podobnie, choć rozróżnienie między etapem zasadniczym a doładowywania ma mniejsze znaczenie. W dokumentacji przyjęto określenie „etap ładowania zasadniczego/doładowywania" lub skrótowo „etap ładowania zasadniczego".

Przetwornica w trybie domyślnym dostarcza napięcie podtrzymujące, natomiast w trakcie etapu ładowania zasadniczego/doładowywania moduł ładowarki chwilowo podnosi napięcie wyjściowe, pobierając niewielki prąd z punktu testowego TP7.

Etap ładowania zasadniczego/doładowywania zostaje automatycznie uruchomiony, gdy napięcie akumulatora spadnie poniżej zadanego progu, co wskazuje na znaczne rozładowanie ogniwa i gotowość do przyjęcia większego ładunku.

Możliwe jest również ręczne rozpoczęcie tego etapu.

Na początku, gdy prąd ładowania osiąga wartość ograniczenia ustawioną w przetwornicy, mamy do czynienia z klasyczną fazą ładowania zasadniczego. Wraz ze wzrostem napięcia akumulatora prąd stopniowo maleje, co odpowiada przejściu do etapu doładowywania.

Moduł ładowarki posiada ustawioną wartość progową prądu, poniżej której uznaje, że ładowanie zasadnicze i doładowywanie zostało zakończone. Wówczas napięcie wyjściowe wraca do poziomu podtrzymującego. Dodatkowo, zastosowany zegar ogranicza maksymalny czas trwania etapu zasadniczego/doładowywania, zgodnie z zaleceniami wielu producentów akumulatorów.

Dostępny jest również tryb przechowywania, przeznaczony dla sytuacji, w których akumulator pozostaje przez dłuższy czas podłączony do ładowarki w trybie czuwania. W tym trybie napięcie wyjściowe jest obniżane poniżej poziomu podtrzymującego.

Co pewien czas (domyślnie raz w tygodniu) uruchamiane jest ładowanie zasadnicze w celu wyrównania stanu ogniw. Zakłada się przy tym, że akumulator nie jest w tym czasie obciążony – w przeciwnym razie ładowarka może wznowić wcześniejsze etapy.

Jest to najlepsza strategia długoterminowej konserwacji akumulatorów kwasowo-ołowiowych pracujących w trybie czuwania. Utrzymywanie napięcia podtrzymującego przez zbyt długi czas może prowadzić do stopniowego uszkodzenia ogniwa.

Początek i zakończenie trybu przechowywania kontrolowane są za pomocą zegarów czasowych. Funkcję tę można również całkowicie wyłączyć, ustawiając czas na zero. Choć nie jest ona tak istotna jak etap ładowania zasadniczego czy doładowywania, poziom obniżenia napięcia wyjściowego w trybie przechowywania można regulować.

eprasa.pl 7d549de066

Wyświetlacz OLED oraz trzy przyciski umożliwiają zmianę i konfigurację wszystkich istotnych parametrów. Jak widać na ilustracjach, w płytce drukowanej modułu ładowarki znajdują się otwory umożliwiające dostęp do potencjometrów montażowych znajdujących się na płytce przetwornicy, które służą do regulacji prądu i napięcia. Dzięki temu wszystkie ustawienia można zmieniać bez konieczności demontażu urządzenia.

Po zakończeniu montażu omówimy szczegółowo dostępne opcje konfiguracyjne.

Domyślne ustawienia oprogramowania zostały dobrane w sposób dość zachowawczy, ale zapewniają poprawne działanie (choć niekoniecznie maksymalną efektywność) dla większości popularnych akumulatorów kwasowo-ołowiowych.

Warunkiem prawidłowej pracy układu są jednak odpowiednio ustawione parametry przetwornicy.

Budowa

Moduł ładowarki w dużym stopniu działa samodzielnie, jednak bez współpracy z przetwornicą nie będzie spełniał swojej funkcji. Dlatego zakładamy, że dysponujesz już zmontowaną płytką drukowaną przetwornicy wykonaną zgodnie z opisem zamieszczonym pod adresem: siliconchip.au/Article/15340. Dostępny jest kompletny zestaw obejmujący przetwornicę (nr kat. SC6292) i moduł ładowarki (SC6512), w tym zaprogramowany mikrokontroler.

Jeśli jeszcze nie zmontowałeś przetwornicy, nie wprowadziliśmy żadnych zmian w oryginalnej instrukcji montażu. Warto jednak wspomnieć, że przewody pomiędzy CON2 w przetwornicy a CON3 w module ładowarki można zastąpić złączami śrubowymi z przegrodą, co ułatwia montaż i zapewnia modułowość.

Schemat połączeń pomiędzy płytką modułu ładowarki a płytką przetwornicy, przedstawiający sposób komunikacji i przekazywania sygnałów pomiarowych oraz sterujących

Moduł ładowarki można zbudować na dwustronnej płytce drukowanej o wymiarach 75 mm × 80 mm, oznaczonej kodem 14108221. Rozmieszczenie elementów przedstawiono na **rysunku 2**.

Podobnie jak w przypadku przetwornicy, również w module ładowarki zastosowano wiele elementów do montażu powierzchniowego. Do ich poprawnego przylutowania będziesz potrzebować pasty lutowniczej, pincety, plecionki lutowniczej, lutownicy z cienkim grotem, lupy oraz – najlepiej – wentylatora do usuwania oparów lutowniczych.

Na szczęście elementy nie są rozmieszczone tak gęsto jak w przetwornicy, dzięki czemu montaż płytki drukowanej jest prostszy.

Zacznij od mikrokontrolera IC3 (PIC16F1459). Nałóż niewielką ilość topnika na pady, ustaw układ scalony w odpowiednim położeniu, zwracając uwagę na oznaczenie pinu 1. Przylutuj jeden z narożnych pinów i sprawdź, czy układ jest dobrze ustawiony. Dopiero wtedy przylutuj pozostałe wyprowadzenia. W razie potrzeby usuń ewentualne mostki lutownicze przy użyciu plecionki z dużą ilością topnika.

Następnie przylutuj diodę D7 w obudowie SOT-23. Mimo niewielkich rozmiarów wyprowadzeń jest łatwa w montażu – wystarczy poprawnie wyśrodkować obudowę względem oznaczenia na płytce, przylutować jedno wyprowadzenie, a po sprawdzeniu ułożenia przylutować pozostałe.

Kolejnym krokiem jest montaż ceramicznych kondensatorów w obudowach M3216 (rozmiar 1206). Występują one w dwóch różnych pojemnościach – należy zachować ostrożność, aby ich nie pomylić.

Następnie przystąp do montażu rezystorów o różnych wartościach, oznaczonych standardowymi kodami liczbowymi. Przyciski S1...S3 lutuje się podobnie jak inne elementy montowane powierzchniowo.

Po zakończeniu montażu elementów SMD oczyść płytkę z pozostałości topnika, używając odpowiedniego rozpuszczalnika. Przed przejściem do dalszych etapów montażu należy odczekać, aż płytka dokładnie wyschnie.

Elementy przewlekane nie wymagają użycia dodatkowego topnika.

REG1 to stabilizator napięcia w obudowie TO-92 – przed jego przylutowaniem upewnij się, że został poprawnie ustawiony względem oznaczeń na płytce.

D6 to dioda mocy w obudowie TO-220, montowana płasko na płytce. Należy zagiąć jej wyprowadzenia w odległości około 7 mm od obudowy i umieścić w otworach. Diodę należy przykręcić do płytki za pomocą śruby M3 o długości 8 mm, nakrętki i podkładki sprężystej, zwracając uwagę, by nie uszkodzić wyprowadzeń. Gdy dioda znajdzie się we właściwym położeniu, przylutuj jej piny i skróć je do odpowiedniej długości.

Układ został zaprojektowany z myślą o pracy z mocami rzędu kilku watów. Jeżeli jednak planujesz ładować akumulatory prądem powyżej 5 A, może być konieczne zwiększenie powierzchni odprowadzania ciepła. W prostych zastosowaniach wystarczy docisnąć do diody pasek stalowy lub aluminiowy z otworem montażowym o średnicy 3 mm, pamiętając, by nie dopuścić do zwarcia z innymi elementami układu.

Czteropinowe złącze MOD1 (żeńskie) służy do podłączenia wyświetlacza OLED. Należy zadbać o to, aby zostało ono przylutowane prostopadle do płytki, co zapewni prawidłowe osadzenie modułu wyświetlacza.

Następnie można zamontować złącza CON3 i CON4. Jak wspomniano wcześniej, zamiast nich można bezpośrednio przylutować przewody o dużym przekroju, jednak zalecamy użycie zacisków śrubowych – ułatwia to montaż i ewentualną konserwację.

Ze względu na większe rozmiary oraz połączenie z szerokimi ścieżkami miedzianymi, przylutowanie tych złączy może wymagać zwiększenia temperatury grota lutownicy.

CON5 to dwupinowe złącze do podłączenia termistora. W prototypie zastosowano proste gniazdo spolaryzowane, ale w zestawach dostarczamy gniazda typu JST, pasujące do wstępnie przygotowanego okablowania termistora. Rozstaw pinów wynosi 2,54 mm, co pozwala na montaż w tych samych otworach. Termistor nie posiada określonej polaryzacji – jego orientacja nie ma znaczenia.

Na koniec, jeśli konieczne będzie samodzielne zaprogramowanie mikrokontrolera (co nie będzie potrzebne w przypadku zakupu gotowego zestawu), należy zamontować pod kątem prostym złącze programujące ICSP w miejscu CON6.

Programowanie

Jeśli mikrokontroler został już zaprogramowany, możesz przejść do kolejnej części opisu.

Do programowania układu PIC16F1459 można użyć programatora PICkit 3, PICkit 4 lub Snap. Należy skonfigurować programator tak, aby dostarczał napięcie zasilające 3,3 V – ponieważ do takiego napięcia przystosowany jest cały układ.

Alternatywnie, jeśli programator nie dostarcza zasilania, należy doprowadzić

eprasa.pl 7d549de066

napięcie z zakresu 10 V...35 V pomiędzy TP2 (biegun dodatni) i TP3 (biegun ujemny), co pozwoli zasilić mikrokontroler poprzez stabilizator napięcia.

Następnie należy podłączyć programator zgodnie ze strzałkami oznaczonymi na płytce i wgrać do mikrokontrolera kod z pliku 1410822A.HEX za pomocą oprogramowania MPLAB X IPE.

Uwaga: zaciski masowe złączy CON3 i CON4 nie są połączone z masą układu na TP3 ani ze złączem programującym ICSP. Nie należy więc używać ich jako punktów odniesienia przy podłączaniu masy programatora. Taki sposób prowadzenia masy został celowo przyjęty, aby zapobiec przepływowi niepożądanych prądów przez obwód cyfrowy modułu ładowarki.

Przed przejściem do kolejnego etapu należy odłączyć zasilanie układu.

Testowanie

Podłącz termistor oraz moduł OLED do odpowiednich złączy, a następnie doprowadź napięcie stałe z zakresu 10 V...35 V pomiędzy TP2 (biegun dodatni) i TP3 (biegun ujemny). Po upływie około jednej sekundy wyświetlacz OLED powinien się uruchomić, prezentując przybliżoną wartość napięcia zasilającego.

Odczyt temperatury powinien odpowiadać rzeczywistej temperaturze otoczenia. Jeśli na wyświetlaczu pojawi się komunikat T_ERR, może to oznaczać problem z układem pomiarowym lub zastosowanie nieodpowiedniego typu termistora.

Jeśli wyświetlana wartość napięcia zasilającego znacznie odbiega od rzeczywistej (na przykład o więcej niż 10%), najprawdopodobniej doszło do pomyłki przy montażu elementów w dzielnikach napięciowych – warto wówczas sprawdzić, czy nie zostały zamienione wartości rezystorów.

To najlepszy moment, aby wykryć i usunąć ewentualne błędy, zanim moduł ładowarki zostanie wyłączony i podłączony do przetwornicy.

Montaż mechaniczny

Podczas montażu płytek zaleca się tymczasowe odłączenie wyświetlacza OLED, ponieważ jego obudowa jest wykonana z cienkiego szkła i może być dość krucha.

Aby ułatwić prawidłowe ustawienie wszystkich elementów, rozpocznij od zamocowania czterech tulei dystansowych o długości 10 mm w skrajnych rogach spodniej strony płytki przetwornicy. Przykręć je krótkimi śrubami M3 – będą pełnić funkcję nóżek. Następnie usuń pozostałe dystanse znajdujące się pod przetwornicą, by umożliwić późniejsze zamocowanie modułu ładowarki nad przetwornicą.

Przy użyciu czterech śrub o długości 15 mm przymocuj do płytki przetwornicy cztery dystansowe tuleje gwintowane o wysokości 10 mm, skierowane ku górze. Tuleje te powinny odpowiadać położeniem otworom montażowym w narożnikach płytki modułu ładowarki, dzięki czemu możliwy będzie montaż jednej płytki nad drugą.

Teraz przylutuj cztery pojedyncze piny do punktów testowych TP2, TP3, TP5 i TP7 na płytce przetwornicy – powinny one wystawać ku górze, w kierunku płytki modułu ładowarki. Rozpoczynamy od złączy męskich, ponieważ ich montaż jest znacznie łatwiejszy.

Na wystające piny nałóż jednopinowe gniazda żeńskie, które będą przylutowane do płytki modułu ładowarki. Gniazda te mogą nie wcisnąć się całkowicie – to normalne. Oprzyj płytkę modułu ładowarki na wcześniej zamontowanych tulejach dystansowych i upewnij się, że piny testowe prawidłowo przechodzą przez odpowiadające im otwory w płytce modułu ładowarki. Następnie przylutuj gniazda do odpowiednich padów.

Jeśli zajdzie potrzeba rozdzielenia obu płytek, zrób to ostrożnie. Podczas ponownego montażu zwróć szczególną uwagę na właściwe ustawienie złączy, aby uniknąć ich zgięcia lub uszkodzenia.

Następnie przygotuj dwa krótkie odcinki przewodu o przekroju odpowiednim do pracy z prądem do 10 A. Połącz nimi złącze CON2 na płytce przetwornicy ze złączem CON3 na płytce modułu ładowarki, zwracając

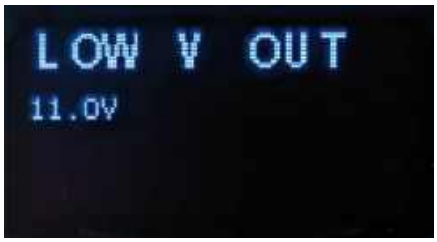
Ekran 1. Gdy wszystko działa prawidłowo, pojawia się strona startowa bez aktywnego ładowania. Moduł ładowarki nie modyfikuje napięcia wyjściowego, a niewielki wyświetlany prąd wskazuje, że akumulator jest w pełni naładowany. Kreski w prawym dolnym rogu oznaczają, że tryb podtrzymywania jest wyłączony

Ekran 2. Podczas ładowania zasadniczego moduł ładowarki zwiększa napięcie wyjściowe przetwornicy. W przedstawionej sytuacji aktywne jest ograniczenie prądu, przez co napięcie wyjściowe jest niższe niż na ekranie 1. Licznik czasu w prawym dolnym rogu pokazuje maksymalny pozostały czas trwania etapu ładowania zasadniczego

Ekran 3. W trybie Storage (przechowywanie) napięcie wyjściowe zostaje obniżone poniżej poziomu Float (doładowywanie), a do akumulatora płynie minimalny prąd – wystarczający, by zapobiec jego samorozładowaniu. Tryby Bulk (ładowanie zasadnicze) i Storage (przechowywanie) można przerwać w każdej chwili, naciskając przycisk S2

Ekran 4. Wyświetlany w przypadku braku zasilania – gdy zostało ono wyłączone lub odłączone. Napięcie wyjściowe jest wówczas niskie, a prąd wskazywany jako 0,00 A. Licznik w prawym dolnym rogu odlicza czas do wyłączenia wyświetlacza. Można go ponownie włączyć, naciskając dowolny przycisk

Ekran 5. Stałe kalibracyjne dla trzech napięć oraz prądu wyświetlanego na stronie głównej można regulować na tej stronie za pomocą przycisków S1 i S2. Nowo przeliczona wartość jest wyświetlana i może zostać łatwo porównana z odczytem z multimetru



Ekran 6. Można ustawić kilka progów napięcia. Dostępne są trzy progi alarmowe oraz próg rozpoczęcia ładowania zasadniczego (Bulk). Każde naciśnięcie przycisku S1 lub S2 zmienia wartość o 0,1 V; przytrzymanie przycisku przyspiesza zmianę wyświetlanej wartości

eprasa.pl 7d549de066

Ekran 7. Próg prądu, który wyzwala zakończenie ładowania zasadniczego, jest regulowany na tej stronie. Jego wartość zmienia się za pomocą przycisków S1 i S2 w krokach co 0,05 A (50 mA)

Ekran 8. Żadna ze zmian wprowadzonych na wcześniejszych stronach nie jest aktywowana natychmiast. Aby je zastosować, należy nacisnąć przycisk S1. Przycisk S2 przywraca wcześniejsze wartości. Wyświetlany tekst zmienia się, aby wskazać, że przycisk został naciśnięty

Ekran 9. Zmiany nie są automatycznie zapisywane w pamięci Flash. Naciśnięcie przycisku S1 powoduje zapisanie aktywnych ustawień, które będą używane jako domyślne po kolejnym włączeniu zasilania

Tabela 1. Strony ustawień ładowarki

Tytuł	Funkcja	Uwagi	Ustawienia domyślne
BATTERY V	Stała kalibracji napięcia akumulatora (CON4)	Strony te wyświetlają również obliczone napięcie/prąd w oparciu o stałą kalibracji. Stałą kalibracji najlepiej ustawić za pomocą przycisków S1/S2, porównując obliczoną wartość z odczytem multimetru, aż do uzyskania zgodności. Należy pamiętać, że do kalibracji prądu potrzebne będzie odpowiednie obciążenie (np. rozładowana bateria) i należy dostosować się do tego, że moduł ładowarki zużywa wewnętrznie około 10 mA	
SUPPLY V	Stała kalibracji napięcia zasilania (CON1)		
OUTPUT V	Napięcie wyjściowe (CON3) stała kalibracji		
OUTPUT I	Prąd przetwornicy (od CON2 do CON3) stała kalibracji		
LOW V BAT	Próg błędu niskiego napięcia akumulatora	Jeśli jakiekolwiek napięcie zostanie zmierzone poniżej progu LOW, ładowarka wejdzie w stan alarmowy i zatrzyma ładowanie zasadnicze, doładowywanie i magazynowe. Błąd jest wyświetlany na stronie głównej	11,0 V
LOW V SUP	Próg błędu niskiego napięcia zasilania		11,0 V
LOW V OUT	Próg błędu niskiego napięcia wyjściowego		11,0 V
BULK START	Napięcie, poniżej którego uruchamiane jest ładowanie zasadnicze	Parametry te określają działanie trybów zasadniczego i doładowywania. Timer określa również maksymalny czas działania ładowania zasadniczego (patrz poniżej)	12,0 V
BULK END	Prąd, poniżej którego ładowanie zasadnicze zostaje zatrzymane		0,5 A
BULK BOOST	Wartość, o jaką zwiększane jest napięcie wyjściowe (powyżej napięcia podtrzymującego) w trybie ładowania zasadniczego		4%
STORE DROP	Wartość, o jaką napięcie wyjściowe jest obniżane w trybie przechowywania	Wartość 4,5% opiera się na zmniejszeniu napięcia na ogniwo z 2,3 V do 2,2 V. Wyższe wartości do 10% mogą całkowicie zatrzymać ładowanie	4,5%
BULK TIME	Maksymalny czas ładowania zasadniczego	Zakładając, że ograniczenie prądu ładowania zasadniczego nie zostało osiągnięte, ładowanie zasadnicze będzie trwało przez ten okres (w godzinach i minutach). Jeśli ładowanie zasadnicze zostanie przerwane z powodu niskiego napięcia zasilania, pozostały czas ładowania zasadniczego będzie powoli wzrastać do tego limitu, aż do wznowienia ładowania zasadniczego	2:00 godz. (GG:MM)
STORY TIME	Czas ładowania akumulatora	Oprócz naciśnięcia S2 na stronie głównej lub błędu niskiego napięcia, wygaśnięcie tego timera jest jedynym warunkiem, który zakończy ładowanie pamięci masowej	144:00 godzin (<1 tydzień)
STORE DELAY	Czas pomiędzy kolejnymi ładowaniami akumulatora	Ten licznik czasu jest resetowany po rozpoczęciu ładowania i odlicza czas, dopóki nie wystąpi błąd lub inna zmiana stanu. Jeśli wartość jest ustawiona na zero, nie następuje ładowanie pamięci	0:00 godzin (wył.)
TEMP COEFF	Współczynnik temperatury napięcia akumulatora	Zaleca się modyfikowanie ładowania podtrzymującego akumulatora w różnych temperaturach. Parametr ten określa zmianę w stosunku do wartości nominalnej w temperaturze 25°C	0%/°C
Use Edits	Załaduj lub odrzuć edytowane wartości ustawień	Zmiany wprowadzone w parametrach nie mają wpływu na ładowanie do momentu naciśnięcia przycisku S1 na tym ekranie. Naciśnięcie przycisku S2 odrzuca zmiany i przywraca poprzednie ustawienia	
Save Flash	Zapisywanie bieżących ustawień w pamięci Flash	Naciśnięcie przycisku S1 spowoduje zapisanie bieżących wartości w pamięci Flash, dzięki czemu zostaną one załadowane po włączeniu zasilania	

eprasa.pl 7d549de066

uwagę na poprawną polaryzację zgodnie z oznaczeniami na płytkach drukowanych. Dla ułatwienia można posłużyć się kodowaniem kolorystycznym widocznym na naszych fotografiach.

Podłącz ponownie termistor oraz wyświetlacz OLED, a następnie przykręć płytkę modułu ładowarki do wcześniej przygotowanych tulei dystansowych (15 mm) przy użyciu czterech śrub. Akrylowa osłona ochronna powinna zostać zamocowana dopiero po zakończeniu uruchomienia i konfiguracji układu.

Uruchomienie i kalibracja

Rozpocznij od podłączenia napięcia zasilającego do złącza CON1, zwracając szczególną uwagę na prawidłową polaryzację. Po kilku sekundach wyświetlacz OLED powinien się uruchomić i wyświetlić komunikat FLOAT – oznaczający tryb ładowania podtrzymującego. Informacje na wyświetlaczu są aktualizowane co jedną sekundę, co pozwala ograniczyć pobór energii. Wyjątkiem jest sytuacja, gdy użytkownik naciśnie któryś z przycisków – wtedy aktualizacja następuje natychmiastowo.

Strona główna przedstawia aktualny stan pracy układu. Dostęp do kolejnych stron konfiguracyjnych uzyskuje się, naciskając przycisk S3. Zalecane jest pozostawienie aktywnej strony głównej, ponieważ pozostałe uniemożliwiają wygaszenie wyświetlacza po zaniku zasilania.

Nawet jeśli akumulator nie został jeszcze podłączony, na złączu CON4 pojawi się napięcie (miejsce pomiaru napięcia akumulatora), ponieważ dioda przewodzi zasilanie wstecznie. W takim przypadku prąd ładowania powinien być bliski zeru – może pojawić się wartość około 0,01 A, co odpowiada niewielkiemu poborowi prądu przez układ modułu ładowarki.

Aby ręcznie uruchomić etap ładowania zasadniczego i doładowywania, przytrzymaj przycisk S1 przez około dwie sekundy. Napięcie wyjściowe powinno wówczas wzrosnąć powyżej poziomu podtrzymującego (FLOAT), a na wyświetlaczu pojawi się komunikat BULK/ABS.

Tryb ten będzie aktywny przez około dziesięć sekund, po czym zostanie automatycznie zakończony, jeśli układ wykryje, że prąd nie płynie (co może oznaczać brak akumulatora). Etap ładowania zasadniczego/doładowywania można również przerwać ręcznie – wystarczy nacisnąć przycisk S2 na stronie głównej. Spowoduje to natychmiastowe przejście do trybu podtrzymującego i zakończenie procesu ładowania.

Domyślnie współczynnik kompensacji temperaturowej ustawiony jest na zero. Aby przetestować tę funkcję, należy zmienić jego wartość. Wprowadzenie wartości ujemnej spowoduje, że wzrost temperatury będzie skutkować obniżeniem napięcia ładowania. Zmiana ta ma jednak umiarkowaną skalę.

Układ wykorzystuje cztery parametry kalibracyjne, które można modyfikować w razie potrzeby, choć domyślne ustawienia powinny być wystarczające w większości przypadków. Przełączanie stron konfiguracyjnych odbywa się za pomocą przycisku S3.

Pierwsze cztery strony ustawień służą do wprowadzania współczynników kalibracyjnych, kolejne dwanaście – do ustawień parametrów eksploatacyjnych. Dwie ostatnie strony umożliwiają aktywację oraz zapisanie zmodyfikowanych ustawień.

Tabela 1 zawiera zestawienie wszystkich stron konfiguracyjnych. Na pierwszych stronach konfiguracji wyświetlane są cztery współczynniki kalibracyjne wraz z odpowiadającymi im wartościami obliczonymi. Umożliwia to skalibrowanie układu za pomocą zewnętrznego miernika – na przykład multimetru. Wystarczy zmierzyć rzeczywistą wartość (napięcia lub prądu), a następnie stopniowo dostosowywać współczynnik kalibracyjny tak, aby wartość wyświetlana przez układ zgadzała się z odczytem z miernika.

Każdy współczynnik kalibracyjny działa jako prosty mnożnik. Zwiększenie jego wartości skutkuje proporcjonalnym zwiększeniem wartości obliczonej.

W przypadku kalibracji prądu tą metodą należy pamiętać, że pomiar będzie miarodajny tylko wtedy, gdy przetwornica zasila rzeczywiste obciążenie.

Po zakończeniu wprowadzania zmian przejdź do strony z napisem Use Edits i naciśnij przycisk S1. Pojawi się komunikat Loaded, informujący o wczytaniu nowych ustawień.

Następnie naciśnij przycisk S3, aby przejść do kolejnej strony, i ponownie naciśnij S1 – spowoduje to zapisanie ustawień w nieulotnej pamięci Flash. Powinien pojawić się komunikat Saved, potwierdzający, że dane zostały zapisane.

Ustawienia napięcia i prądu

Rozpocznij od ustawienia napięcia podtrzymującego (FLOAT) za pomocą potencjometru regulacji napięcia na płytce przetwornicy.

Należy pamiętać, że dioda D6 wprowadza spadek napięcia – nawet przy niewielkim prądzie – dlatego warto przyjąć wartość nieco zawyżoną. Dobrym punktem wyjścia będzie ustawienie napięcia o około 0,3 V wyższego od docelowego. Wartość tę można później skorygować po podłączeniu akumulatora.

Następnie ustaw żądane maksymalne natężenie prądu ładowania za pomocą potencjometru montażowego odpowiedzialnego za prąd. Należy pamiętać, że minimalna wartość ograniczenia wynosi około 2 A, a maksymalna – około 8 A przy ustawieniu pokrętła w pozycji około 3/4 zakresu.

Ustawienie powyżej tej wartości spowoduje wyłączenie ograniczenia prądowego, co nie jest zalecane w takim zastosowaniu (ładowarka).

Trzeba również uwzględnić, że prąd wyjściowy będzie wyższy przy niższych napięciach. Szczegółowe informacje na ten temat znajdują się w artykule poświęconym przetwornicy. Można także przeprowadzić testy z głęboko rozładowanym akumulatorem, co dobrze oddaje typowe warunki maksymalnego obciążenia. To również dobry moment, by dostosować ustawienia prądu ładowania do konkretnego akumulatora.

Większość domyślnych ustawień modułu ładowarki będzie odpowiednia dla typowego 12-woltowego akumulatora kwasowo-ołowiowego. W przypadku pracy z akumulatorami 24 V konieczna będzie jednak zmiana niektórych parametrów – na przykład ustawień progów alarmowych dla niskiego napięcia.

Zasadniczo wartości graniczne napięcia akumulatora, napięcia wyjściowego oraz progi przełączania należy w takim przypadku podwoić.

Przydatne informacje dotyczące ładowania według profilu IUoU (nazwa wg normy DIN) można znaleźć w artykule Wikipedii: https://w.wiki/5SR9.

W **tabeli 2** zebrano również sugerowane wartości parametrów związanych z konfiguracją ładowarki.

Jak już wcześniej wspomniano, domyślne wartości ustawione w oprogramowaniu zostały dobrane dość konserwatywnie. Jeżeli akumulatory będą użytkowane intensywnie (na przykład w systemach zasilania awaryjnego lub instalacjach fotowoltaicznych), warto rozważyć przejście na ustawienia bardziej agresywne.

Tryb przechowywania (magazynowania) jest domyślnie wyłączony, ale zaleca się jego włączenie w przypadku akumulatorów rzadko używanych lub pozostających przez dłuższy czas w stanie czuwania.

Czas trwania fazy ładowania zasadniczego i doładowywania zależy od pojemności akumulatora oraz rzeczywistego natężenia prądu. Należy pamiętać, że etapy te mogą dostarczyć nawet 80...90% całkowitego ładunku zgromadzonego w akumulatorze. Wartość ta zależy również od napięcia początkowego w momencie rozpoczęcia ładowania.

Przyjmuje się, że etap ładowania zasadniczego odpowiada za około 80% ładunku tylko w przypadku bardzo głęboko rozładowanych akumulatorów.

eprasa.pl 7d549de066

Tabela 2. Sugerowane ustawienia (sprawdź zalecenia producenta)

Typ akumulatora	SLA 12 V	AGM/zalany kwasowo-ołowiowy 12 V	$LiFePO_4$ 12 V	SLA 24 V	AGM/zalany kwasowo-ołowiowy 24 V	$LiFePO_4$ 24 V
Napięcie podtrzymania (potencjometr montażowy przetwornicy)	13,5 V	13,8 V	12,6 V	27,0 V	27,6 V	25,2 V
LOW V BAT/OUT	11,0 V	11,0 V	11,0 V	22,0 V	22,0 V	22,0 V
BULK START	12,0 V	12,0 V	12,0 V	24,0 V	24,0 V	24,0 V
BULK BOOST	4%	4%	10%	4%	4%	10%
TEMP COEFF	–0,17%/°C	–0,14%/°C	0%/°C	–0,17%/°C	–0,14%/°C	0%/°C

Współczynnik kompensacji temperaturowej nie musi być zmieniany przy przełączaniu między akumulatorami 12 V i 24 V, ponieważ jest on liczony jako proporcja napięcia ładowania.

Domyślnie ustawiona wartość to zero – czyli brak korekcji. Takie ustawienie jest odpowiednie dla akumulatorów litowych typu $LiFePO_4$. Dla akumulatorów kwasowo-ołowiowych zaleca się jednak zastosowanie współczynnika zgodnego z zaleceniami producenta – co zapewni prawidłowe zakończenie procesu ładowania.

Typowe wartości to około 0,15%/°C, co odpowiada 3,6 mV/°C na ogniwo o napięciu 2,4 V. Proponowane ustawienia również przedstawiono w tabeli 2.

W trybach FLOAT, BULK/ABS oraz STORAGE w prawym dolnym rogu wyświetlacza OLED widoczny jest licznik czasu. Odlicza on czas pozostały do kolejnego przełączenia trybu – w przypadku trybu zasadniczego lub magazynowania – powrót do trybu podtrzymującego.

W trybie FLOAT zegar odlicza do przejścia w tryb przechowywania, o ile ten został włączony. Jeśli tryb przechowywania jest wyłączony, licznik czasu nie będzie widoczny na ekranie głównym.

W przypadku wystąpienia błędu zasilania, licznik pokazuje czas (w sekundach), po którym wyświetlacz zostanie wygaszony w celu oszczędzania energii. Można przywrócić wyświetlanie ekranu, naciskając dowolny przycisk – co jednocześnie zresetuje licznik.

Wykaz elementów:
1 zmontowany moduł przetwornicy (sterownika LED Buck-Boost, zestaw nr kat. SC6292, czerwiec 2022)
1 dwustronna płytka drukowana 75 mm × 80 mm z kodem 14108221
1 przezroczysta akrylowa pokrywa 75 mm × 80 mm wycinana laserowo (nr kat. SC6567)
2 dwukierunkowe zaciski śrubowe 8,25 mm (CON3, CON4)
1 2-stykowe złącze JST XH 2,54 mm (CON5)
1 5-pinowe złącze kątowe męskie (CON6, opcjonalnie, dla ICSP)
1 4-pinowe gniazdo szpilkowe (dla MOD1)
4 pojedyncze piny szpilkowe (TP2, TP3, TP5, TP7)
4 gniazda jednopinowe (TP2, TP3, TP5, TP7)
1 1,3-calowy wyświetlacz OLED z 4-pinowym interfejsem I²C (MOD1)
1 termistor NTC 10 kΩ montowany na kablu z 2-pinową wtyczką 2,54 mm XH
2 przyciski SMD 6 mm × 3 mm z czarnym klawiszem (S1, S2)
1 przycisk SMD 6 mm × 3 mm z czerwonym klawiszem (S3)
4 śruby M3 × 5...6 mm z łbem walcowym
4 śruby M3 × 15...16 mm z łbem walcowym
4 tuleje dystansowe M3 × 10 mm (nylonowe)
4 tuleje dystansowe M3 × 15 mm (nylonowe)
1 śruba M3 × 8 mm z łbem walcowym (dla D6)
1 podkładka sprężysta M3 (dla D6)
1 nakrętka sześciokątna M3 (dla D6)
2 przewody 10 A, dł. 5 cm (dla połączenia CON2 i CON3)

Półprzewodniki:
1 mikrokontroler PIC16F1459-I/SO (programator z plikiem 1410822A.HEX), obudowa SOIC-20 (IC3)
1 stabilizator liniowy AP7381-33V-A, 3,3 V, obudowa TO-92 (REG1)
1 podwójna dioda Schottky'ego MBR20100CT, 20 A, 100 V, TO-220 (D6)
1 podwójna dioda Schottky'ego BAT54C ze wspólną katodą, SOT-23 (D7)

Kondensatory: (ceramiczne, SMD M3216/1206, wielowarstwowe)
4 × 1 µF, 50 V, X7R 6 × 100 nF, 50 V, X7R

Rezystory: (SMD M3216/1206, 1/8 W, tolerancja 1%)
1 × 1 MΩ 3 × 100 kΩ 1 × 33 kΩ 7 × 10 kΩ 2 × 4,7 kΩ 1 × 220 Ω

Ładowanie akumulatorów

Po skonfigurowaniu ustawień ładowania zmiennego można podłączyć akumulator. W zależności od bieżących parametrów układ może automatycznie rozpocząć ładowanie zasadnicze.

To dobry moment, aby sprawdzić, czy zastosowane chłodzenie diody D6 jest wystarczające – etap ładowania zasadniczego wiąże się zazwyczaj z największym obciążeniem prądowym i generowaniem ciepła.

Najlepiej byłoby pozwolić akumulatorowi na pełne naładowanie. Przypomnijmy, że jeśli zajdzie taka potrzeba, cykl ładowania zasadniczego i doładowywania można uruchomić ręcznie. Pozwala to również na precyzyjne dostrojenie potencjometru regulacji napięcia na płytce przetwornicy – z uwzględnieniem spadku napięcia na diodzie D6.

Jeżeli to możliwe, warto również pozwolić akumulatorowi częściowo się rozładować, aby umożliwić ponowne uruchomienie fazy ładowania zasadniczego i doładowywania. Ułatwi to dostosowanie parametrów do rzeczywistego profilu doładowywania oraz procentowego udziału tych etapów w całkowitym cyklu ładowania.

Podsumowanie

Po zakończeniu konfiguracji ładowarki można zamontować akrylową pokrywę, umieszczając ją na tulejach dystansowych i przykręcając za pomocą ostatnich czterech śrub.

W pokrywie znajdują się otwory, które umożliwiają okazjonalny dostęp do przycisków sterujących – bez konieczności jej demontażu.

Jeśli planujesz zamontować ładowarkę w obudowie lub na panelu, możesz wykorzystać cztery gwintowane tuleje dystansowe znajdujące się z tyłu modułu. Alternatywnie, możliwy jest montaż od strony frontowej – na przykład w przypadku zastosowania przezroczystego panelu lub ramki.

Płytka przetwornicy to wszechstronny moduł, umożliwiający generowanie szerokiego zakresu napięć i prądów. Dodanie modułu ładowarki przekształca go w całkiem zaawansowaną, konfigurowalną ładowarkę. Dzięki dużej elastyczności ustawień, układ może współpracować z wieloma typami akumulatorów, dostosowując parametry ładowania do ich charakterystyki i zastosowania. ■

Tim Blythman

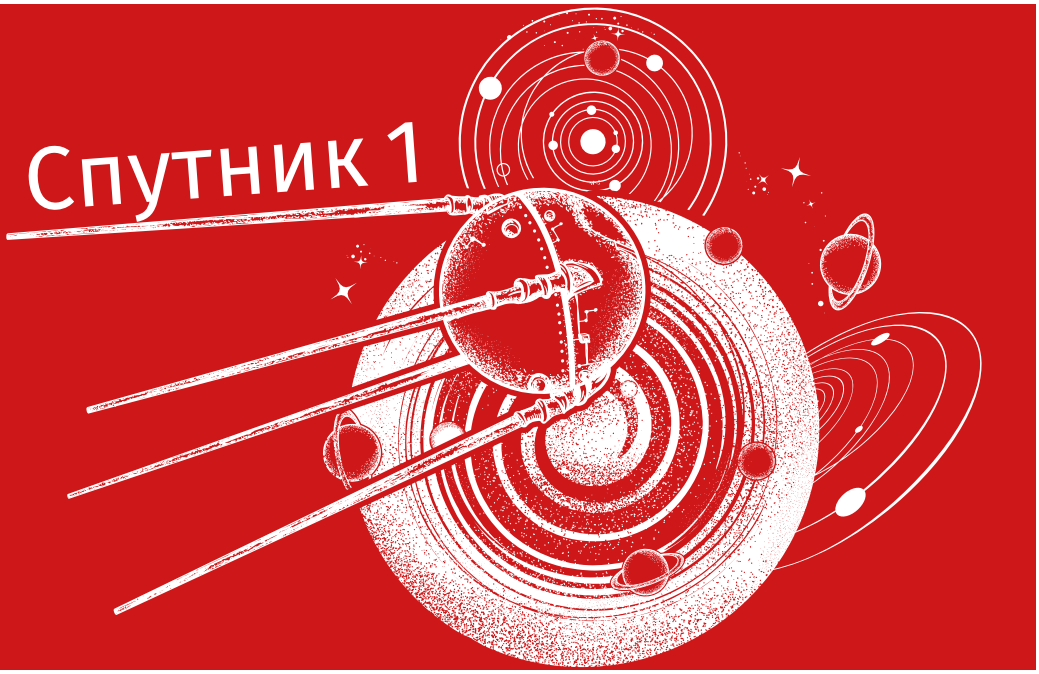
Materiały dodatkowe dostępne są na stronie Silicon Chip:
https://www.siliconchip.com.au/Shop/8/6506

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 7d549de066

W zeszłym miesiącu przedstawiłem nieco informacji na temat Sputnika-1 – historycznie pierwszego sztucznego satelity – i opisywałem, jak odtworzyłem konstrukcję „Manipulatora" opartego na przekaźnikach, który w satelicie przełączał z częstotliwością 2,5 Hz dwa nadajniki radiowe. Kontynuujemy teraz od miejsca, w którym skończyłem.



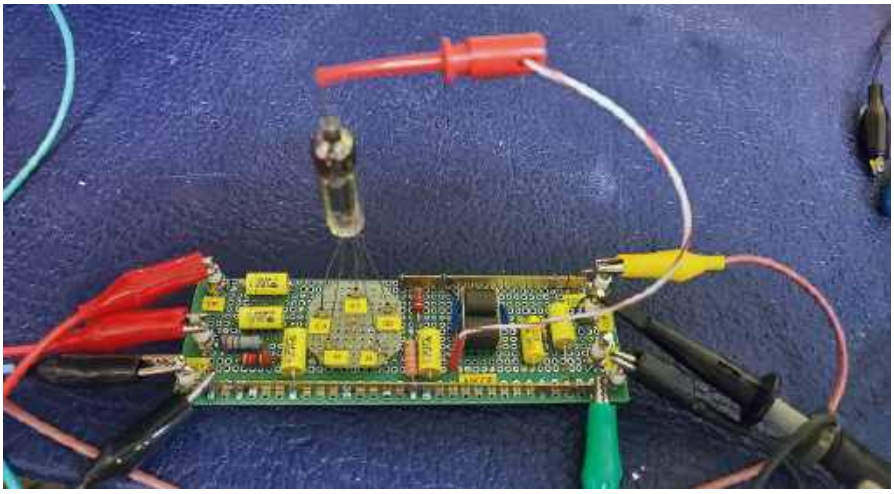
Rekonstrukcja nadajnika radiowego Sputnika, część 2

Moim następnym zadaniem było rozpracowanie i odtworzenie jednego z nadajników radiowych, a następnie zbudowanie odpowiedniego zasilacza.

Manipulator jest generatorem opartym na dwóch czułych przekaźnikach. Naprzemiennie wyłącza lampy elektronowe stopnia wyjściowego każdego z nadajników, odłączając ich siatki ekranujące, co zatrzymuje transmitowaną falę nośną. Każdy z nadajników jest załączony na około 0,2 s, po czym milknie na podobny okres.

Po tym, jak odtworzyłem układ Manipulatora – który działa jak oryginał, głównie dzięki użyciu autentycznych części z epoki – zająłem się nadajnikami na lampach oraz metalową ramą nadajnika, do której miały być wbudowane.

Nie planowałem zbudować kompletnej jednostki D-200 z Manipulatorem i dwoma nadajnikami. Chciałem jednak odtworzyć oprócz Manipulatora przynajmniej jeden nadajnik, tak aby całość nadawała się do zademonstrowania. Zdawałem sobie sprawę, że niektóre elementy nie będą identyczne z oryginalnymi, ale byłem pewien, że uda mi się uzyskać bardzo zbliżony efekt końcowy.



Zdjęcie 1. Przyrząd testowy w akcji. Wyprowadzenie anody wychodzi z górnej części bańki lampy, stąd konieczność zastosowania chwytaka haczykowego

Szczegóły nadajnika

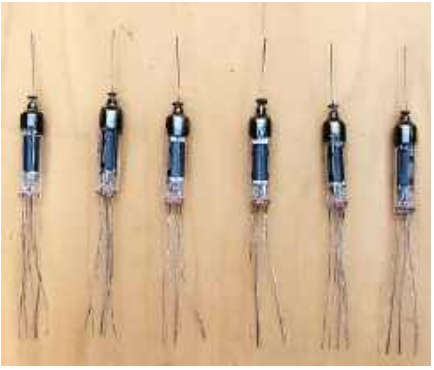
Konstrukcja obu nadajników opiera się na miniaturowych pentodach 2P19B, które są nadal łatwo dostępne.

Wyciąg z karty katalogowej, pokazany na **rysunku 10**, zawiera standardowy widok od dołu wyprowadzeń na cokole lampy. Istnieje też inna karta katalogowa 2P19B, w której pokazano wyprowadzenia ekranu i siatki tłumiącej zamienione ze sobą, tak jakby były widziane od góry. Na podstawie oględzin samej lampy w naturze stwierdziłem, że poprawny rysunek zawiera karta katalogowa prezentowana tutaj.

Przed zbudowaniem nadajników wykonałem specjalny przyrząd testowy, aby sprawdzić, czy zakupione przeze mnie 2P19B (niektóre zostały pokazane na zdjęciu 2) działają prawidłowo.

Lampy były przechowywane w rolkach z tektury falistej owiniętych cienkim

eprasa.pl 7d549de066



Zdjęcie 2. Kilka z 30 zakupionych lamp 2P19B. Trzy z nich uległo awarii. Lampy nie były prawidłowo przechowywane, więc przed przetestowaniem musiałem oczyścić ich wyprowadzenia z korozji

papierem, co okazało się rozwiązaniem dalekim od ideału i nie zapobiegło korozji na pocynowanych wyprowadzeniach miedzianych. Musiałem je wyczyścić, najpierw zdrapując skorodowany metal, a następnie wygładzając wyprowadzenia papierem ściernym o ziarnistości 1000, uważając przy tym, by nie wyginać drutów w pobliżu miejsca, w którym wchodzą one do szklanej bańki.

Aby zbadać „normalne zachowanie" lamp, przetestowałem ich ponad 30 egzemplarzy, co stanowiło dobrą próbkę statystyczną. Trzy sztuki okazały się wadliwe – dwie miały za niskie wzmocnienie, a w trzeciej bańka była nieszczelna.

Rysunek 11 przedstawia schemat przyrządu testowego. Zbudowany przyrząd pokazano na **zdjęciu 1**. Gniazda, w które wchodzą przewody lamp, to obrobione gniazda do układów scalonych. Siatkę trzecią lamp podłączałem do +12 V zamiast do masy, ponieważ w stopniu wyjściowym nadajnika Sputnika siatka ta była dołączona do +10 V. Dodałem rezystor szeregowy o wartości 1 kΩ, aby uniknąć skutków przypadkowego zwarcia wyprowadzenia siatki do sąsiadującego wyprowadzenia żarzenia.

Do zasilania obwodu żarzenia użyłem ogniwa żelowego 12 V. Jako źródło napięcia testowego 120 V wykorzystałem mój podwójny zasilacz stołowy 0...60 V CPX-200D z wyjściami połączonymi szeregowo.

Konstrukcja nadajnika 20,005 MHz ze Sputnika-1

Schemat nadajnika pokazano na **rysunku 12**. Funkcję rezonatora kwarcowego pełni lampa V1, natomiast V2 i V3 tworzą wzmacniacz mocy w układzie przeciwsobnym (push-pull). Wszystkie lampy są typu 2P19B. Mają one dopuszczalną moc anodową 1 W, więc para tych lamp, pracujących na zmianę do obciążenia w stopniu wyjściowym, nie będzie miała trudności z dostarczeniem 1 W radiowej mocy wyjściowej – pod warunkiem, że siatki G1 są wysterowane odpowiednim sygnałem (o amplitudzie prawie 40 V).

Układy nadajników 20,005 MHz i 40,002 MHz są praktycznie identyczne, poza wartościami cewek i kondensatorów. W nadajniku 40 MHz główną zmianą było to, że w celu dopasowania się do impedancji anteny nie wykorzystano odczepów transformatora, jak to zrobiono w przypadku nadajnika 20 MHz. Zamiast tego zastosowano dzielnik pojemnościowy.

Szczegółem, którego nie pokazano na oryginalnym schemacie jest to, że cewki L5

2P19B

SHARP-CUTOFF PENTODE

Subminiature coated-filament type used as rf oscillator and power amplifier in radio equipments. Tube characteristics tally with Standard DL3.309.0001T-11.

Height (without leads)	≤ 45 mm.
Diameter	≤ 10.2 mm.
Weight	≤ 5 grms.
Filament Voltage*	2.2 volts.
Filament Current	100 ma.
Interelectrode Capacitances.	
Input	≤ 4.5 μμf.
Output	≤ 7 μμf.
Grid No. 1 to Plate	≤ 0.03 μμf.
Plate to Filament	≤ 0.05 μμf.
Service Life	≥ 1000 hrs.
Life Standard.	
Transconductance	≥ 1450 μmhos.

* The filament should be operated within the voltage range of 1.8 to 2.5 volts.

CLASS A1 AMPLIFIER

Maximum Ratings.

Plate Voltage	200 max volts.
Grid-No. 2 Voltage	150 max volts.
Plate Dissipation	1 max watt.
Grid-No. 2 Dissipation	0.35 max watt.
Cathode Current	15 max ma.
Service Life for limiting filament voltages.	
At filament volts=2.4 to 2.5	200 hrs.
At filament volts=1.8 to 2.0	800 hrs.

Characteristics.

Plate Voltage	120 volts.
Grid No. 1 Voltage	-5 volts.
Grid-No. 2 Voltage	90 volts.
Grid-No. 3 Voltage	0 volt.
Plate Current	7.6±2.2 ma.
Grid-No. 2 Current	≤ 3.5 ma.
Transconductance	≥ 1700 μmhos.
Grid-No. 1 negative Voltage for plate current cut-off (Ia ≤ 100 μa)	≤ 25 volts.

OPERATING CONSIDERATIONS

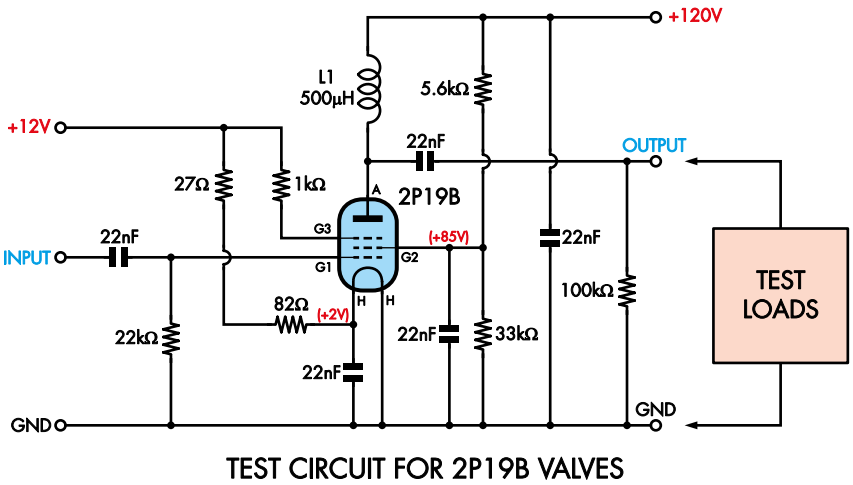
1. Tube operating values should be kept within the Permissible ranges specified here, and any two or more of them should not reach their respective limiting values simultaneously, otherwise the tube may be damaged or made inoperative.
2. This tube is not recommended for circuits employing series-connected filaments.
3. Flexible leads must not be bent within 5 mm from the glass base.

BASING DIAGRAM

1. Filament.
2. Grid No. 2.
5. Grid No. 1.
7. Grid No. 3.
8. Filament.
A. Plate (top lead).

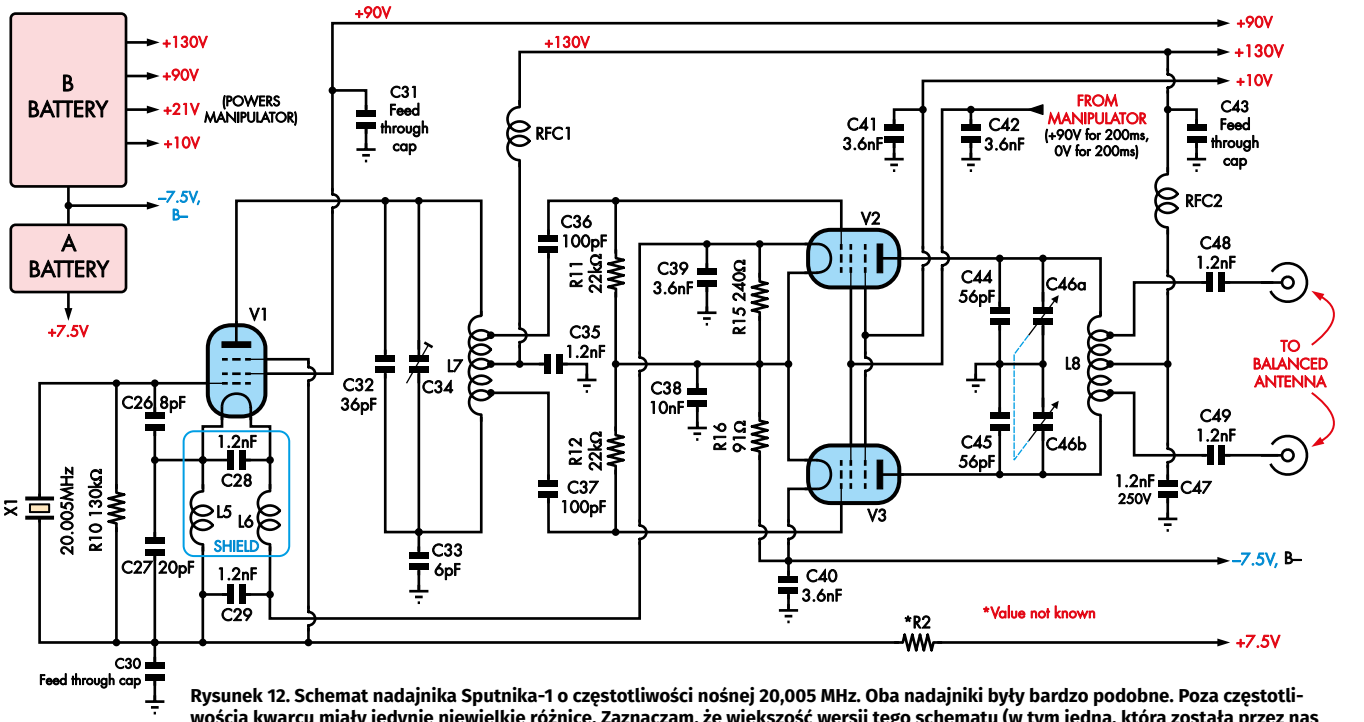
2P19B (71.3 0-5)

Rysunek 10. Strona z noty katalogowej pentody 2P19B, pokazująca układ wyprowadzeń i parametry graniczne



Rysunek 11. Prosty układ testowy dla pentod 2P19B, który pozwolił mi znaleźć i wyeliminować 3 wadliwe sztuki z 30, które kupiłem. Do lampy jest podawany sygnał testowy, a wzmocniony sygnał wyjściowy może być badany z różnymi zewnętrznymi rezystancjami obciążenia

eprasa.pl 7d549de066



Rysunek 12. Schemat nadajnika Sputnika-1 o częstotliwości nośnej 20,005 MHz. Oba nadajniki były bardzo podobne. Poza częstotliwością kwarcu miały jedynie niewielkie różnice. Zaznaczam, że większość wersji tego schematu (w tym jedna, która została przez nas kiedyś opublikowana) zawiera błędy. Niniejsza wersja powinna być prawidłowa

i L6 są wbudowane w prostokątną puszkę. Kondensator C28 nie jest widoczny na żadnych oryginalnych zdjęciach, więc najprawdopodobniej znajdował się w tej samej puszce. Na zdjęciach jest jednak widoczny kondensator C29 (**zdjęcie 3**).

Na **zdjęciu 4** wydaje się, że ekran rezonatora kwarcowego wystaje nieco ponad obudowę. Puszka ekranu cewek L5 i L6 nie wygląda na tak wysoką. Wymiary podstawy konstrukcyjnej (obudowa) określiłem, analizując zdjęcia i skalując je na podstawie szczegółów obrazu i skąpych danych mechanicznych podanych w dokumentacji projektu. Ustaliłem, że obudowa przy modułach nadajników miała szerokość 93 mm, co sugeruje, że miała 90 mm szerokości, 180 mm długości i 60 mm głębokości.

W oryginalnym urządzeniu osłona rezonatora kwarcowego miała prawo nieco wystawać ponad wysokość obudowy, ponieważ ta strona modułu nadajnika była skierowana do wnętrza obudowy D-200, gdzie był pewien prześwit.

W dokumentacji podano szerokość jednostki głównej, w której znajdowały się dwa nadajniki, równą 132 mm, co jest wystarczające, aby pomieścić dwa moduły o głębokości 60 mm z zapasem 12 mm, dzięki czemu przez główny korpus może przebiegać panel środkowy i okablowanie.

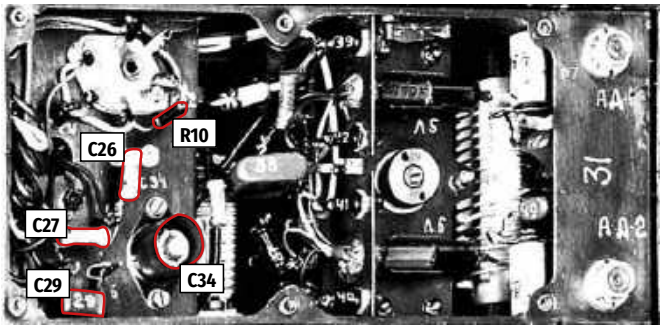
Osłony wyprowadzeń 2P19B

Zdjęcie 5 pokazuje, jak zaizolowałem gołe wyprowadzenia lamp rurkami z PVC. Później zdecydowałem się użyć zamiast nich tulejek teflonowych.

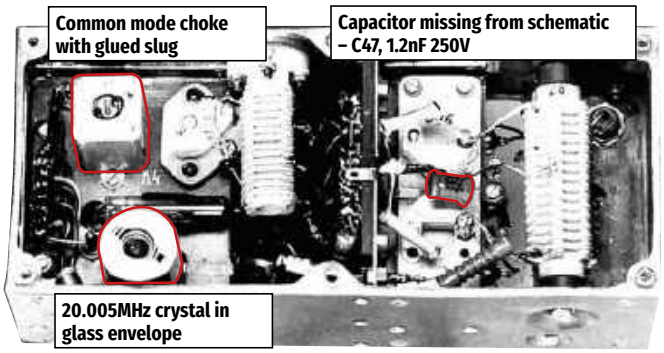
Odtworzenie obudowy

Jeśli chodzi o tworzenie replik zabytkowych urządzeń elektronicznych, najtrudniejszą częścią jest aspekt mechaniczny. Jeżeli mechanika nie zostanie zrobiona dobrze, efekt końcowy nie będzie odzwierciedlał tego, jak urządzenie faktycznie działało i wyglądało.

Badanie historycznych zdjęć i ustalenie, gdzie zostały rozmieszczone elementy, oraz odtworzenie oryginalnej geometrii podziałów wewnętrznych i zewnętrznych zajmuje sporo czasu. Dobra replika wymaga również odszukania i zastosowania jak największej ilości części oryginalnych. Nie tylko lampy, ale także rezystory i kondensatory zasługują na uwagę – zwłaszcza te radzieckie, przykręcane

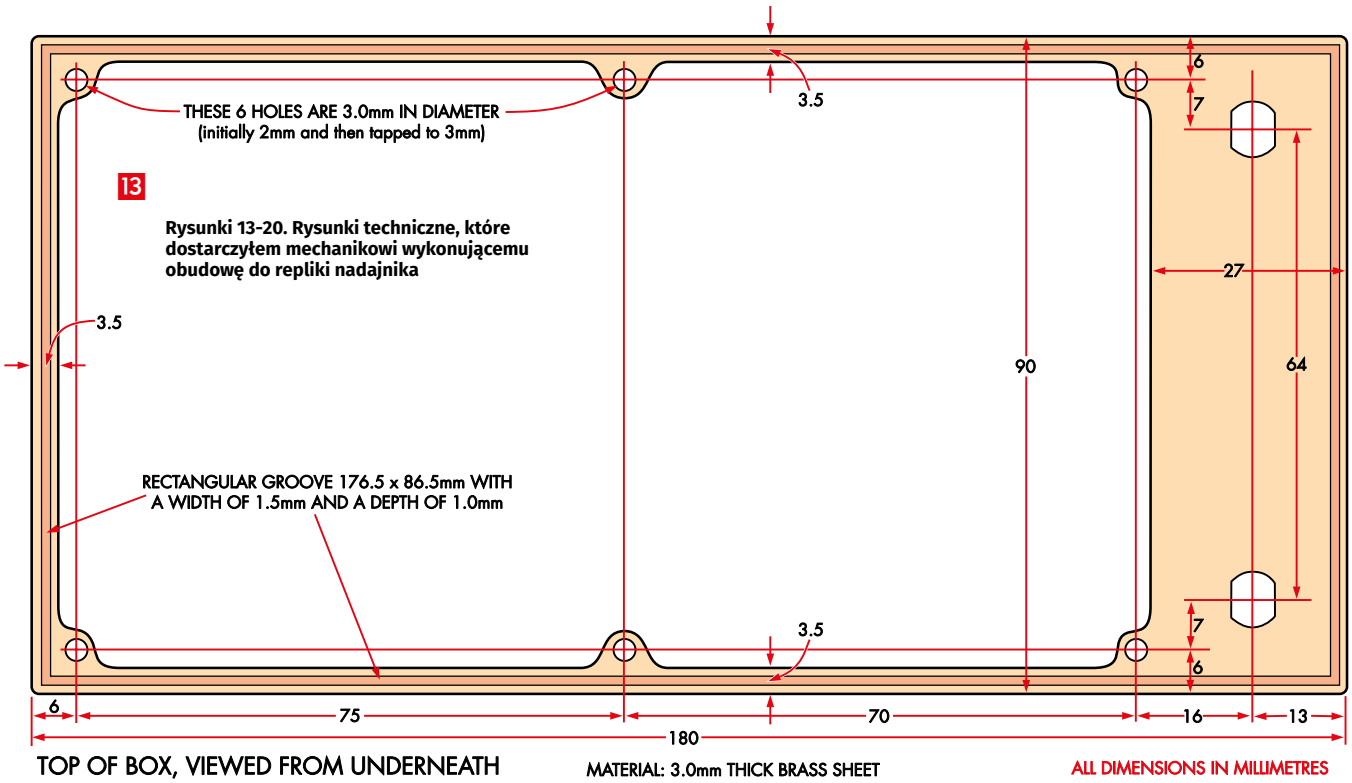


Zdjęcie 3. Zdjęcie oryginalnego nadajnika z widocznymi kondensatorami C27 i C29. Nigdzie jednak nie widać C28. Ponieważ był połączony z cewkami L5 i L6, to najwyraźniej znajdował się razem z nimi w puszce ekranującej



Zdjęcie 4. Inne zdjęcie nadajnika 20,005 MHz, na którym widać, że ekran rezonatora kwarcowego był wyższy niż ekran L5/L6/C28, a nawet nieznacznie wystawał poza obudowę. Czerwoną obwódką oznaczono:
- dławik sygnału wspólnego z klejonym ślimakiem
- brak kondensatora obecnego na schemacie – C47 (1,2 nF 250 V)
- rezonator kwarcowy 20,005 MHz w szklanej bańce

eprasa.pl 7d549de066



do metalowej obudowy lub stosowane w urządzeniach pracujących z wysokimi częstotliwościami – ponieważ mają bardzo charakterystyczny wygląd.

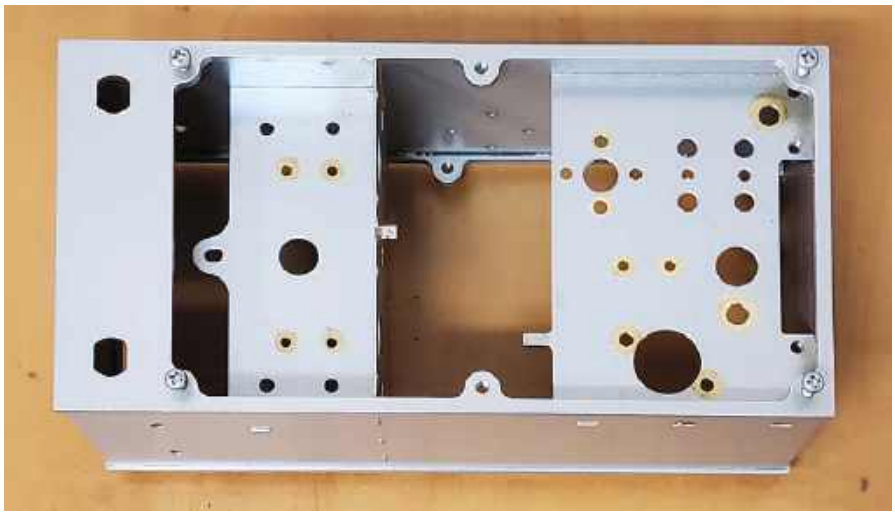
W przypadku urządzeń radiowych pracujących powyżej 5...10 MHz bardzo ważne staje się również fizyczne rozmieszczenie elementów i ekranowanie. Dotyczy to m. in. zacisków montażowych, którymi lampy 2P19B są mocowane do obudowy modułu. Służą one częściowo jako ekrany, odprowadzają również z lamp część ciepła. Dlatego najlepiej jest ściśle trzymać się oryginalnego układu fizycznego.

Aby metalowa obudowa modułu nadajnika była dokładnie taka sama jak w oryginale, do obróbki musiałyby być użyte takie same narzędzia. Konstrukcja metalowa była nitowana i miejscami lutowana. Na szczęście istnieją metody nie wymagające użycia oryginalnego oprzyrządowania, które pozwoliły stworzyć z metalu niemal identycznie wyglądający moduł o praktycznie takiej samej geometrii.

Elementy metalowe zdecydowałem się wykonać z mosiądzu, który daje się łatwo lutować. Do odtworzenia górnej i dolnej powierzchni modułu użyłem płyt o grubości 3 mm, wyfrezowanych i grawerowanych, z rowkiem pasującym do paneli bocznych, wykonanych z mosiądzu o grubości 0,8 mm. Elementy te zostały wykonane metodą obróbki CNC, podobnie jak trzy panele wewnętrzne. Panele zostały przylutowane. Metoda ta pozwoliła uniknąć konieczności zginania metalowych paneli, co mogłoby odkształcić materiał.

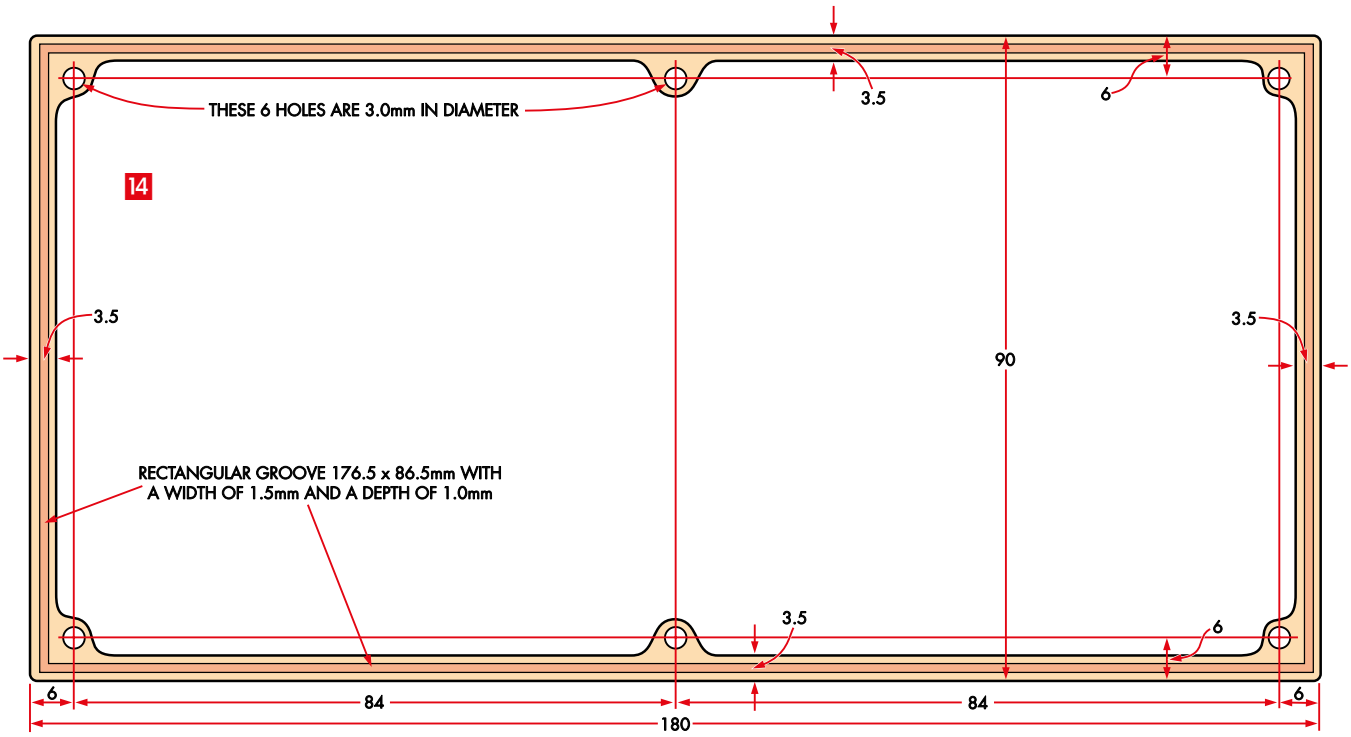
Do wykonania tego zadania przygotowałem **rysunki 13...20**. Obróbkę CNC wykonał Troy z firmy Sunquest Industries w Waranie w stanie Queensland. Występy po bokach płyty mają 1,5 mm wysokości i 5 mm szerokości. Szczeliny w innych panelach, do których

Zdjęcie 5. Na wyprowadzenia pentod nałożyłem rurki izolacyjne – początkowo z PVC, ale później zmieniłem na teflon



Zdjęcie 6. Po otrzymaniu obrobionych na CNC elementów stelaża, zlutowałem je ze sobą, używając kuchenki gazowej. Punkty uziemienia lub gwintowane otwory, gdzie nie powinna dostać się farba, zakryłem łbami śrub

eprasa.pl 7d549de066



BOTTOM OF BOX, VIEWED FROM INSIDE MATERIAL: 3.0mm THICK BRASS SHEET ALL DIMENSIONS IN MILLIMETRES

pasują te płyty, mają szerokość 1,5 mm i długość 6 mm. Są one ze sobą zlutowane. Przylutowałem je, używając kuchenki gazowej. Rezultat widzimy na **zdjęciu 6**.

Obudowę wygładziłem papierem ściernym o ziarnistości 1000 i pokryłem lakierem w sprayu. Przedtem tymczasowo wkręciłem śruby, aby zapobiec przedostaniu się lakieru do gwintów i pokryciu lakierem punktów uziemienia.

Bardzo niewiele lakierów dobrze przylega do polerowanego i błyszczącego mosiądzu. Od wielu lat eksperymentuję z lakierami do takich zastosowań. Jednym z doskonałych produktów jest bezbarwny spray Dupli-Color o numerze DS-117. Nie zawiera on żadnych pigmentów ani wypełniaczy w rodzaju proszku aluminiowego. Po pokryciu mosiądzu tym właśnie lakierem odczekałem 24 godziny i nałożyłem srebrną farbę w sprayu DS-110. Po wyschnięciu nałożyłem ostateczną warstwę lakieru bezbarwnego. Dzięki temu farba jest odporna na zarysowania, ma dobre wykończenie i maksymalną przyczepność do powierzchni (podobnie jak farba samochodowa). Efekt można zobaczyć na zdjęciu 6.

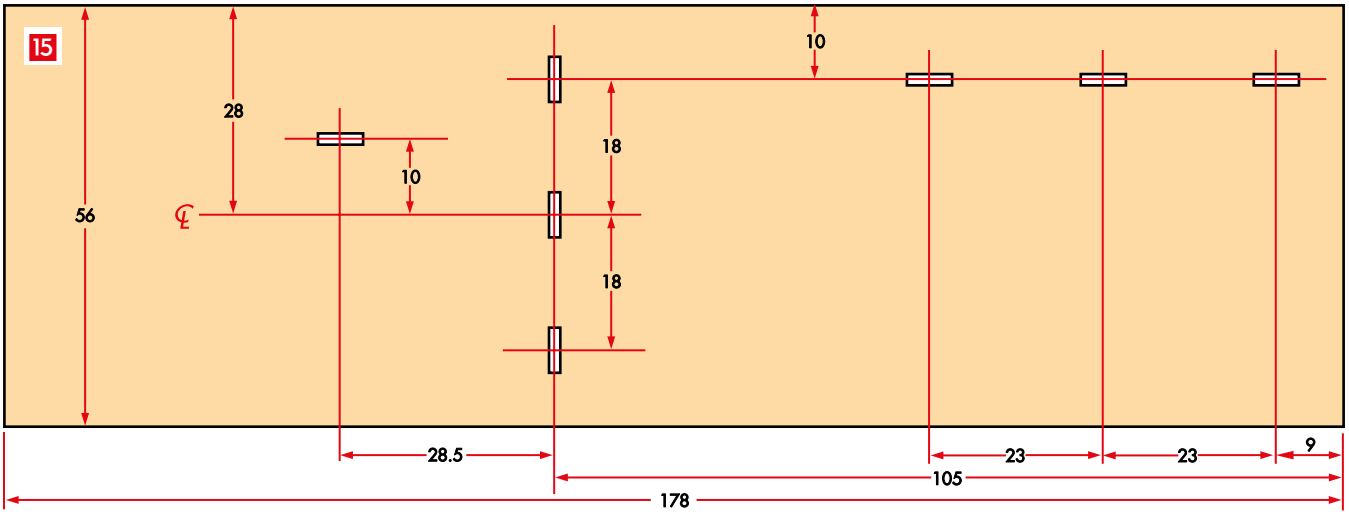
Inne opcje, które zapewniłyby lepszą przyczepność i odporność na zarysowania, to malowanie proszkowe lub galwanizacja. Oznaczałoby to jednak konieczność wysłania obudowy do specjalizowanego warsztatu, na co niechętnie się zapatrywałem.

Zwróćmy uwagę, że do zakrycia otworów przed lakierowaniem użyłem śrub z łbem krzyżakowym, natomiast wersja końcowa nadajnika ma śruby z łbem szczelinowym, tak jak w oryginale.

Zdjęcia 7 i **8** przedstawiają zmontowany nadajnik z ostateczną wersją cewki wyjściowej z odczepami.

Listwy połączeniowe

W oryginalnym urządzeniu użyto dwóch listew połączeniowych umieszczonych obok



INTERNAL VERTICAL PANEL All 7 slots are 6mm long, 1.5mm wide MATERIAL: 0.8mm THICK BRASS PLATE ALL DIMENSIONS IN MILLIMETRES

eprasa.pl 7d549de066

siebie. Każda z nich miała po pięć oczek lutowniczych i była zamontowana dwiema śrubami z nakrętkami, a pod spodem miała cienką płytkę izolacyjną. Listwy postanowiłem zrealizować jako jedną listwę z czarnego włókna szklanego o grubości 3 mm, z czterema otworami montażowymi i spodnią płytką izolacyjną o grubości 1,6 mm. Pokazuje ją **zdjęcie 9**. Niewykluczone, że w oryginale również tak to zrealizowano.

Wykonałem też drugą, niestandardową listwę dla połączeń okablowania z tyłu urządzenia (widać ją również na zdjęciu 9). Zamiast listwy ośmiorzędowej (jak w oryginale) użyłem sześciorzędowej, ponieważ dodatkowe oczka lutownicze nie były potrzebne, i w ten sposób uniknąłem zbytniego zagęszczenia.

Cewki oscylatora i wzmacniacza wyjściowego

Przez kilka tygodni szukałem ceramicznych korpusów do cewek. Średnicę cewek oryginalnych i przybliżoną liczbę zwojów określiłem na podstawie zdjęć w dokumentacji. Korpusy mają otwory na drut nawojowy. Oryginalne korpusy były najprawdopodobniej w ZSRR gotowymi elementami przeznaczonymi dla projektów radioamatorskich.

Ogólnie rzecz biorąc, drut nawijany na tego rodzaju korpusy to posrebrzana miedź.

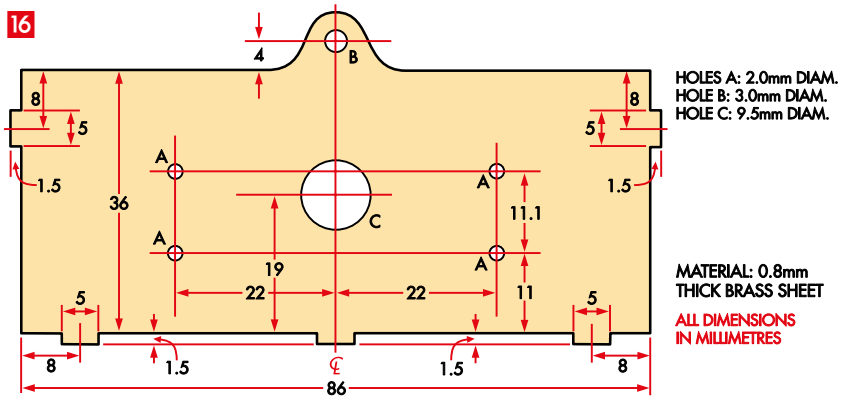
Najbliższy oryginałowi karkas cewki oscylatora, jaki udało mi się znaleźć, nabyłem w Wielkiej Brytanii. Wymagał on obrobionej podstawy, którą, aby dopasować ją do wyglądu cewki oryginalnej, wykonałem z bramitu (**zdjęcie 10**).

Cewkę nawinąłem posrebrzanym drutem miedzianym o średnicy 0,9 mm. Moją pierwszą próbą było wykonanie cewki 12-zwojowej z 5-zwojowym uzwojeniem wtórnym z odczepem pośrodku. Dla uzyskania prawidłowej częstotliwości musiałem równolegle do kondensatora dostrojczego (trymera) dać dodatkowy kondensator 10 pF. Jest możliwe, że trymer użyty w oryginale miał wyższą pojemność środkową niż ten, którego ja użyłem. Zdjęcia oryginału wskazują na zastosowanie cewki 13-zwojowej, czyli uzwojenie wtórne z odczepem musiałoby mieć 4 lub 6 zwojów. Próby wykazały, że czterozwojowe uzwojenie wtórne daje napięcie niewystarczające do uzyskania pełnej mocy stopnia wyjściowego. Musiałem zatem dać sześć zwojów.

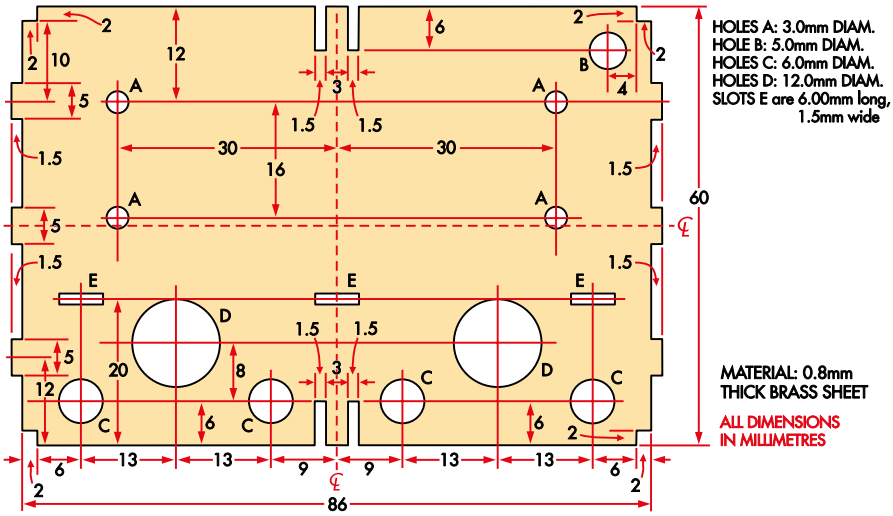
Aby uzyskać pełną moc wyjściową 1 W, na każdej z dwóch siatek lamp wyjściowych niezbędny był sygnał o amplitudzie 40…42 V.

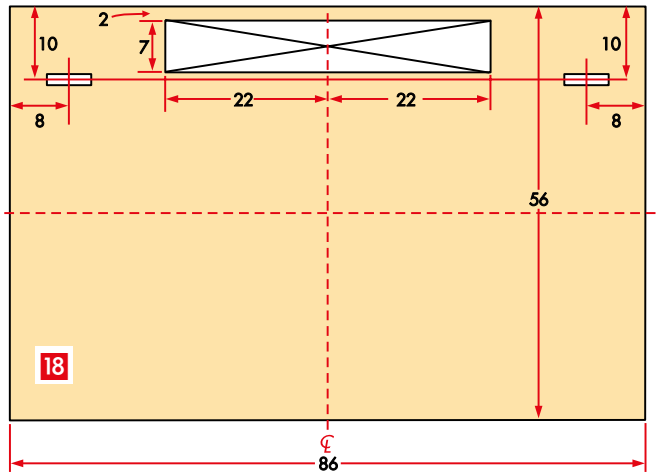
Najlepszy korpus ceramiczny, jaki udało mi się znaleźć dla cewki wyjściowej, a który ściśle odpowiadał geometrii oryginalnej cewki, pochodził z amerykańskiego sklepu Surplus Sales w stanie Nebraska. Korpus miał zbliżoną

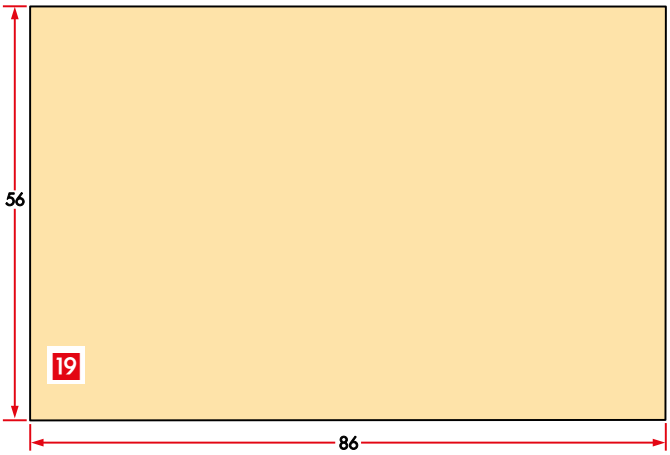
16



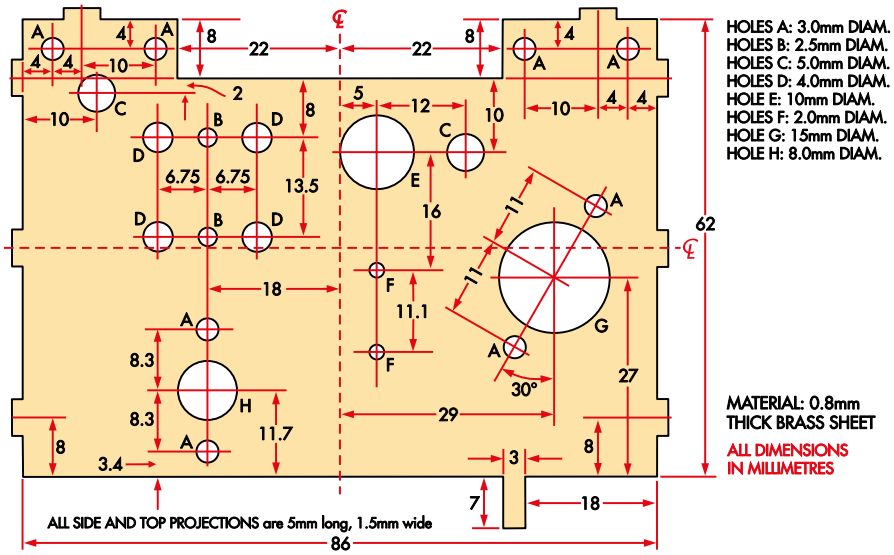
17







eprasa.pl 7d549de066



Rysunek 20. Ostatni z siedmiu rysunków technicznych stelaża

średnicę i prawidłową liczbę rowków, więc liczba zwojów na cal (ew. na cm) była prawidłowa. Tyle że był zbyt długi. Aby rozwiązać ten problem, kupiłem na eBay-u diamentową tarczę tnącą, przymocowałem ją do mojej stołowej piły tarczowej i usunąłem po 7 mm materiału z każdego końca korpusu (**zdjęcie 11**). Obrobiłem elementy montażowe z laminatu fenolowego (podobnego do Tufnolu) i zamontowałem w nich gwintowane, obrobione mosiężne wkładki dla śrub mocujących.

Anteny radiowe Sputnika-1 były dipolami wygiętymi na kuli o średnicy 0,58 m. Impedancja tych anten była raczej większa niż 72 Ω typowe dla prostego dipola i mogła sięgać nawet 150 Ω. Wyznaczenie dokładnej wartości impedancji byłoby możliwe jedynie poprzez wykonanie makiety Sputnika, składającej się z metalowej kuli i kilku prętów antenowych. Na dodatek każdy z prętów anteny był nieco krótszy niż ¼ długości fali. W takim przypadku, przynajmniej w podstawowym układzie dipola, antena zachowuje się jak rezystor połączony szeregowo z kondensatorem i stanowi obciążenie reaktancyjne, w którym prąd wyprzedza napięcie. Wnioski te pomogły mi w dobraniu reaktancji indukcyjnej cewki sprzęgającej o 3 zwojach w nadajniku 20,005 MHz.

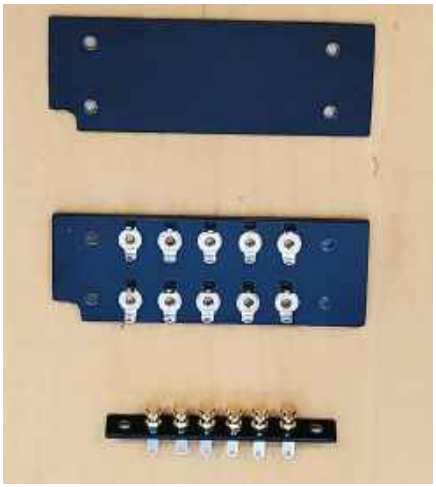
Ze zdjęć w oryginalnej dokumentacji wynika, że cewka wyjściowa miała około 15 zwojów. Środkowy odczep doprowadzający napięcie 130 V do cewki znajdował się po tej samej stronie co połączenia skrajne, co sugeruje parzystą liczbę zwojów. Początkowo nawinąłem eksperymentalną cewkę o zwojach 15:3, a później w ostatecznej wersji cewki przeszedłem na 16:3 (**zdjęcie 12**).

Aby zmierzyć moc wyjściową przy obciążeniu 50 Ω i nie tylko, wykonałem kilka balunów sprzęgających (symetryzatorów), które łączyły wyjście nadajnika z różnymi obciążeniami. Wyniki pomiarów pokazano na **rysunku 21**.

Okazało się, że nadajnik toleruje rezystancję obciążenia od 70 Ω do około 240 Ω, dostarczając do tego zakresu obciążeń moc co najmniej 1 W. Moc wyjściowa osiągnęła wartość maksymalną na poziomie 1,32 W przy obciążeniu około 138,8 Ω. Rezystancja obciążenia widzianego między anodami lamp 2P19B wynosiła wtedy około 4 kΩ.

Rezystancja obciążenia ma wpływ na dokładność dostrojenia obwodu LC cewki wyjściowej i kondensatora motylkowego. Jeśliby nastawiono maksymalną moc wyjściową przy niższych rezystancjach obciążenia (około 70 Ω), spowodowałoby to przesunięcie wykresu zależności mocy wyjściowej od rezystancji obciążenia w dół. Jeśli zaś obwód zostałby zestrojony przy wyższej rezystancji obciążenia (około 300 Ω), wystąpiłaby tendencja do przesunięcia wykresu w górę.

Zdjęcia 7 i 8. Zmontowana i działająca replika nadajnika 20,005 MHz



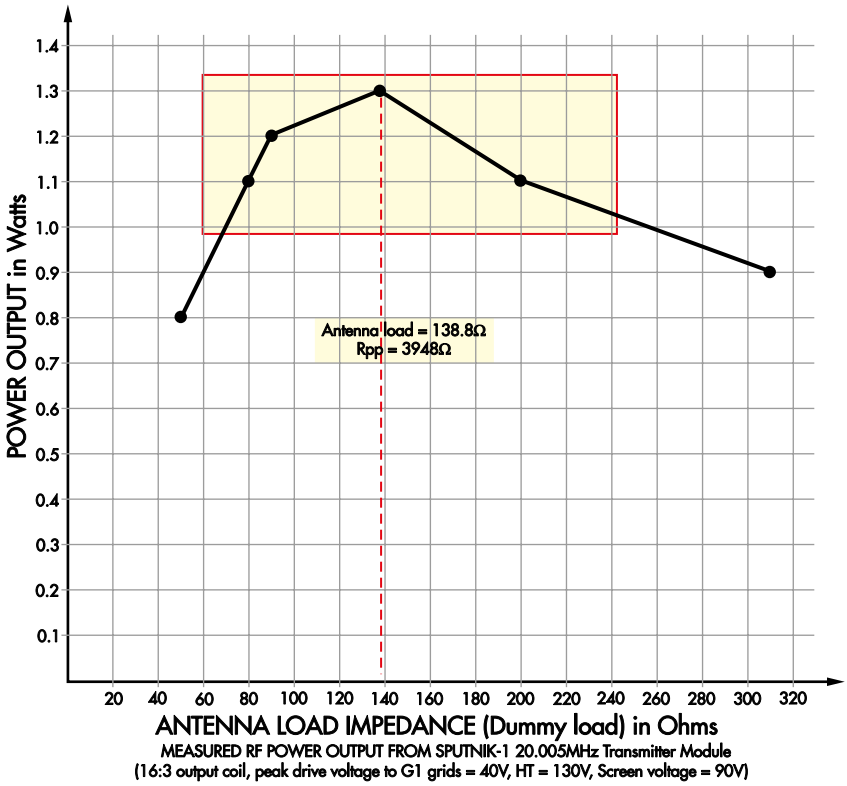
Zdjęcie 9. U góry – wykonana przeze mnie listwa połączeniowa. Nie byłem pewien, czy w oryginale były dwie listwy po 5 oczek, czy jedna listwa podwójna. Łatwiej było mi wykonać listwę pojedynczą. Zrobiłem też drugą listwę połączeniową (na dole), z sześcioma oczkami. W oryginalnej listwie było osiem oczek, ale użyto tylko sześciu

eprasa.pl 7d549de066

Moduły nadajnika D-200 zostały nastrojone na maksymalną moc wyjściową przypuszczalnie dopiero po podłączeniu do rzeczywistych anten statku kosmicznego.

Przy pełnej mocy z obciążeniem 138,8 Ω, napięcie anodowe lamp 2P19B spadało poniżej napięcia siatek ekranujących. Wartość skuteczna napięcia na uzwojeniu pierwotnym cewki wyjściowej 16:3 wynosiła 72 V, co oznacza, że amplituda sygnału między anodami, czyli na uzwojeniu pierwotnym cewki, wynosiła około 102 V. Anoda każdej z lamp widziała jakby połowę tej wartości, więc potencjał anody spadał chwilami do około 79 V (o 51 V poniżej napięcia zasilania 130 V) – czyli o 11 V poniżej potencjału siatki ekranującej (90 V). W przypadku większości pentod tak mała wartość nie stanowi problemu. Gdyby jednak napięcie anody spadło znacznie poniżej napięcia siatki, przez siatkę mógłby popłynąć nadmierny prąd. Zmierzyłem prąd siatki ekranującej przy wszystkich obciążeniach wyjściowych. Nawet przy obciążeniu 312,5 Ω, gdy napięcie anody spadało o 23 V poniżej napięcia siatki, prąd siatki zmieniał się bardzo nieznacznie. Również kształt fali wyjściowej pozostawał normalny.

Przy rezystancjach obciążenia niższych niż 138,8 Ω wahania napięcia anody były mniejsze. Przy obciążeniu 78,1 Ω napięcie anody spadało tylko o 35 V poniżej potencjału zasilania 130 V i leżało o 5 V powyżej napięcia siatki ekranującej.



Rysunek 21. Moc wyjściowa repliki nadajnika w funkcji rezystancji obciążenia. Maksimum mocy wypada przy około 138,8 Ω. Nie znam dokładnej impedancji anten Sputnika-1, ale spodziewam się, że mieściła się ona w przedziale 70-150 Ω

Repliki kondensatorów dostrojczych

Nadajnik zawiera dwa powietrzne kondensatory dostrojcze (trymery). Aby w ich przypadku jak najlepiej zbliżyć się do oryginału, obrobiłem nakrętkę kondensatora motylkowego Johnson-Viking (**zdjęcie 13**) i przymocowałem ją do białej płytki z bramitu, który przypomina ceramikę.

Obrobiłem również osłonkę oryginalnej nakrętki regulacyjnej trymera oscylatora i pomalowałem ją na czarno, aby przypominała element oryginalny. Została ona wykonana z „zabytkowego" zacisku montażowego dla tranzystorów germanowych i obrobionej wkładki mosiężnej (**zdjęcia 14** i **15**).

Replika dławika przeciwzakłóceniowego

Na **zdjęciu 17** porównano wysokości replik elementów: gniazda rezonatora kwarcowego z ekranem oraz dławika sygnału wspólnego.

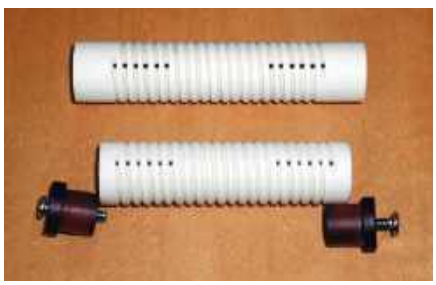
Cewki L5 i L6 zostały prawdopodobnie obie nawinięte na jednym rdzeniu ferrytowym, tworząc dławik sygnału wspólnego. Zdjęcia oryginału pokazują pojedynczy „ślimak" ferrytowy. Myślę, że dławik ten można było przestrajać, co w niewielkich granicach umożliwiało precyzyjne dostrojenie częstotliwości oscylatora kwarcowego.

Powodem zastosowania dławika było zapewnienie katodzie (żarnikowi) lampy V1 bardzo dużej impedancji względem masy dla wyższych częstotliwości, co stanowi warunek poprawnego działania oscylatora.

W typowym oscylatorze kwarcowym Colpittsa pracującym na średnich częstotliwościach (do 2 MHz), dławik w obwodzie

Zdjęcie 10. Miałem szczęście, że znalazłem w Wielkiej Brytanii taki karkas cewki. Jest bardzo zbliżony do oryginalnego. Musiałem tylko dorobić podstawę

Zdjęcie 12. Po eksperymentach ustaliłem konstrukcję cewki wyjściowej. Jest to cewka z odczepami 16:3, średnicy 3/4 cala, długości 3 cali, 8 zwojów na cal, a drut jest posrebrzany i ma średnicę 1 mm

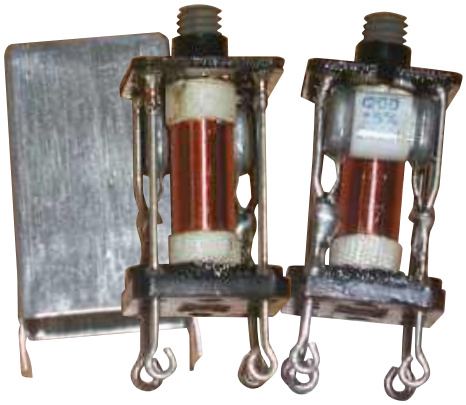


Zdjęcie 11. Ten karkas również był niemal idealny, ale w celu uzyskania odpowiedniej długości musiałem jego część odciąć, a końce obrobić

Zdjęcie 13. Osłona do trymera została wykonana z klipsa montażowego do tranzystorów i polakierowana na czarno. Widać ją na zdjęciu 14

eprasa.pl 7d549de066

Zdjęcie 14 i 15. Osłona oryginalnej nakrętki regulacyjnej trymera oscylatora, wykonana z zabytkowego klipsu montażowego do tranzystorów germanowych



Zdjęcie 16. Dławik sygnału wspólnego L5/L6 i puszka ekranująca. Po prawej z dodanym kondensatorem C28

katody (lub, jak w tym przypadku, żarnika) jest zwykle wybierany w okolicach 1 mH, a jego reaktancja indukcyjna przy częstotliwości 2 MHz wynosi około 12,5 kΩ. W przypadku oscylatora 20 MHz zadowalające wyniki daje dławik około 100 μH, wykazując mniej więcej taką samą reaktancję. Jednym z kryteriów przydatności dławika na częstotliwości radiowe jest niska pojemność własna (międzyzwojowa). Pojemność ta w tym przypadku łączy się równolegle z kondensatorem C27 (20 pF). Aby pojemność własna nie przekraczała kilku pikofaradów, dławik musi być nawinięty jednowarstwowo – a jeżeli wielowarstwowo, to z zachowaniem małej pojemności między warstwami. Mógłbym użyć dwóch oddzielnych dławików osiowych 100 μH, ale sprawiłoby to, że replika odbiegałaby od oryginału.

Wykonałem więc cewkę jednowarstwową (**zdjęcie 16**), nawiniętą bifilarnie, o indukcyjności 85 μH i pojemności własnej 3 pF (wyznaczonej poprzez pomiar rezonansu własnego). Wewnątrz puszki wmontowałem również kondensator C28 (1200 pF, produkcji radzieckiej), jak widać na zdjęciu 16. Podzespół ten jest prawdopodobnie bardzo zbieżny z oryginalnym elementem elektroniki satelity.

Dławik stanowi również część stałoprądowej rezystancji, koniecznej w szeregowym obwodzie żarzenia lamp. Każda lampa wymaga żarzenia 2,2 V, co daje łącznie 6,6 V, podczas gdy zasilanie bateryjne ma napięcie 7,5 V. Rezystancja każdej z cewek dławika to 4 Ω. W rezultacie prąd żarzenia wynosi około 100 mA.

Wartość rezystora R2, włączonego szeregowo w obwód żarzenia, nie została w dokumentacji podana. Całkowity spadek napięcia spowodowany przez dławik wynosi 0,8 V, co oznacza, że wartość R2 powinna wynosić około 1 Ω.

Jest możliwe, że przy nowych bateriach obwód żarzenia był „przeciążony" o 15%. Karta katalogowa 2P19B mówi jednak, że napięcie żarzenia może leżeć w zakresie 1,8...2,5 V, więc wszystko było OK.

Replika rezonatora kwarcowego

Interesujące wyzwanie stanowił rezonator kwarcowy. Oryginalny znajdował się w szklanej bańce z 7 wyprowadzeniami, typowej dla wielu elementów z końca lat 50. Rezonatory kwarcowe tego typu bywają nadal dostępne na Ukrainie, nie mogłem jednak znaleźć takiego o częstotliwości 20,005 MHz. Rezonator kwarcowy 1 MHz w takiej bańce jest pokazany na **zdjęciu 18**.

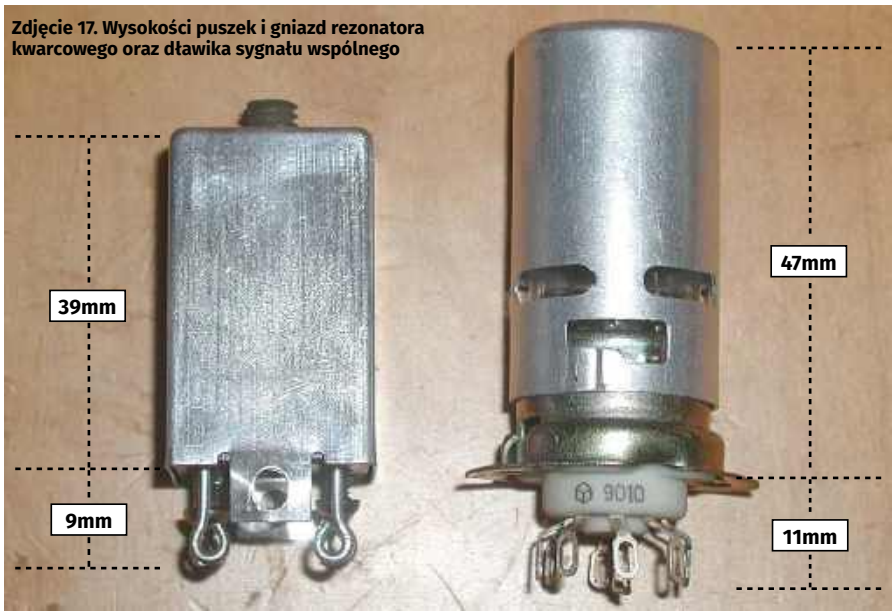
Aby wykonać replikę rezonatora kwarcowego, odciąłem górną część bańki lampy elektronowej o 7 wyprowadzeniach, używając diamentowego pilnika zamocowanego w tokarce. Do tej części dorobiłem 7-pinowy cokół, początkowo montując tylko trzy piny na próbę. Rezonator kwarcowy najbliższy oryginalnemu, jaki udało mi się znaleźć, miał częstotliwość 20,004864 MHz.

Po odcięciu szklanej bańki rozgrzałem jej krawędź palnikiem do czerwoności. Dzięki temu miałem pewność, że mikroskopijne pęknięcia w przyciętej krawędzi nie zaczną się później rozprzestrzeniać na całą szklaną ściankę. Aby współczesny rezonator kwarcowy działał prawidłowo w starym układzie, musiałem dodać 12 pF pojemności równoległej. Ukryłem ją wewnątrz podstawki repliki rezonatora (**zdjęcie 19**).

Złącza wyjściowe w. cz.

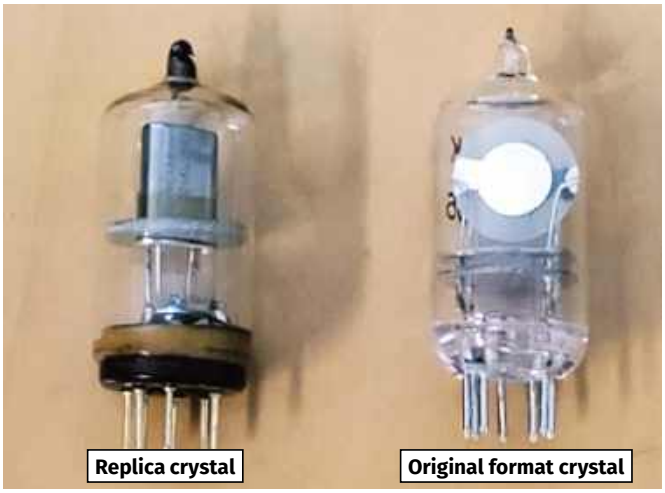
Na zdjęciu oryginalnego urządzenia widać dwa okrągłe złącza w. cz. Aby je odtworzyć, użyłem złączy typu F.

Kiedy moduł nadajnika został ukończony, nadszedł czas, aby połączyć go z Manipulatorem. Rozważałem odtworzenie D-200 w pełnej wersji, zawierającej dwa nadajniki i Manipulator, ale zdecydowałem



Zdjęcie 17. Wysokości puszek i gniazd rezonatora kwarcowego oraz dławika sygnału wspólnego

eprasa.pl 7d549de066



Zdjęcie 18. Rezonator kwarcowy w szklanej bańce (po prawej) i moja replika kwarcu 20,005 MHz (po lewej)

Zdjęcie 19. Replika rezonatora kwarcowego i puszka dla niego

się tego nie robić. Głównym powodem było to, że gdy moduł nadajnika jest zamontowany wewnątrz obudowy D-200, to z jednej strony brak jest dostępu do wnętrza. Lepszym rozwiązaniem było zamontowanie modułu nadajnika na prostokątnej płycie, widocznej z obu stron, wraz z przekaźnikami Manipulatora i kondensatorami czasowymi. W ten sposób wszystkie elementy są dobrze widoczne.

Aby to zrealizować, zleciłem wykonanie na CNC anodyzowanej płyty aluminiowej o grubości 3 mm, a następnie pokryłem ją czarnym lakierem. Płyta jest montowana na izolowanej podstawie. Po jednej stronie płyty jest umocowany nadajnik, a płyta jest przymocowana do podstawy z fenolu (**zdjęcie 20**).

Test nadawania

Fali nośnej o częstotliwości 20,005 MHz i mocy 1 W nie można tak po prostu wysyłać w eter, ponieważ może to powodować masę zakłóceń. Sygnał wyjściowy nadajnika kierowałem do obciążenia zastępczego, które absorbowało prawie całą moc sygnału. Po dodaniu kilku małych anten prętowych pojawił się „wyciek" mocy, wystarczający, abym mógł odbierać sygnał na radiu krótkofalowym w sąsiednim pokoju.

Aby zapewnić nadajnikowi optymalne obciążenie wyjściowe równe 138,8 Ω, zmontowałem balun (symetryzator) 5:3, podłączyłem go do nadajnika i użyłem obciążenia zastępczego 50 Ω (**zdjęcie 21**).

Filmy przedstawiające działanie repliki, w tym odbiór jej sygnału na falach krótkich, można obejrzeć na stronach https://youtu.be/9N26pkGGPew i https://youtu.be/_rq2yrdeGK8.

„Eliminator baterii"

Do repliki Manipulatora i modułu nadajnika 20,005 MHz Sputnika-1 zbudowałem zasilacz.

Standardową metodą zasilania bateryjnego radia czy wzmacniacza lampowego w warunkach domowych i laboratoryjnych było, w przypadku braku baterii, zasilanie z zasilacza sieciowego. Zasilacz taki nazywano „eliminatorem baterii".

Baterie srebrowo-cynkowe zastosowane w Sputniku-1 były wówczas niedostępne na rynku. Zostały wyprodukowane specjalnie na potrzeby tej misji. Bateria „wysokiego napięcia" zasilała linie +10 V, +21 V, +90 V i +130 V. Napięcie 10 V było używane w nadajnikach do polaryzacji siatek tłumiących w dwóch lampach wyjściowych 2P19B. Pobór prądu z tego napięcia był znikomy. Odczep 21 V zasilał przekaźniki Manipulatora.

W dokumentacji Sputnika wspólne połączenie minusów baterii B i baterii żarzenia 7,5 V oznaczono jako „–A". Postanowiłem trzymać się tego oznaczenia na przednim panelu „eliminatora baterii".

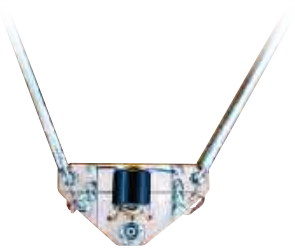
Przedstawiona tutaj wersja „eliminatora" opiera się na czterech zasilaczach impulsowych MEAN WELL RS-15, każdy o mocy 15 W.

Zasilacze te zrobiły się dość tanie. Mają zwartą konstrukcję, ich wyjścia są izolowane i zabezpieczone przed przeciążeniem. Oferowane są modele z napięciem wyjściowym 3,3 V, 5 V, 12 V, 24 V i 48 V. Napięcia wyjściowe mogą być w niewielkim zakresie nastawiane wbudowanym potencjometrem. Jest to funkcja bardzo przydatna. Ponieważ wyjście każdego zasilacza jest izolowane, zasilacze te mogą spełniać funkcję regulowanych baterii.

Schemat „eliminatora baterii" pokazano na **rysunku 23**.

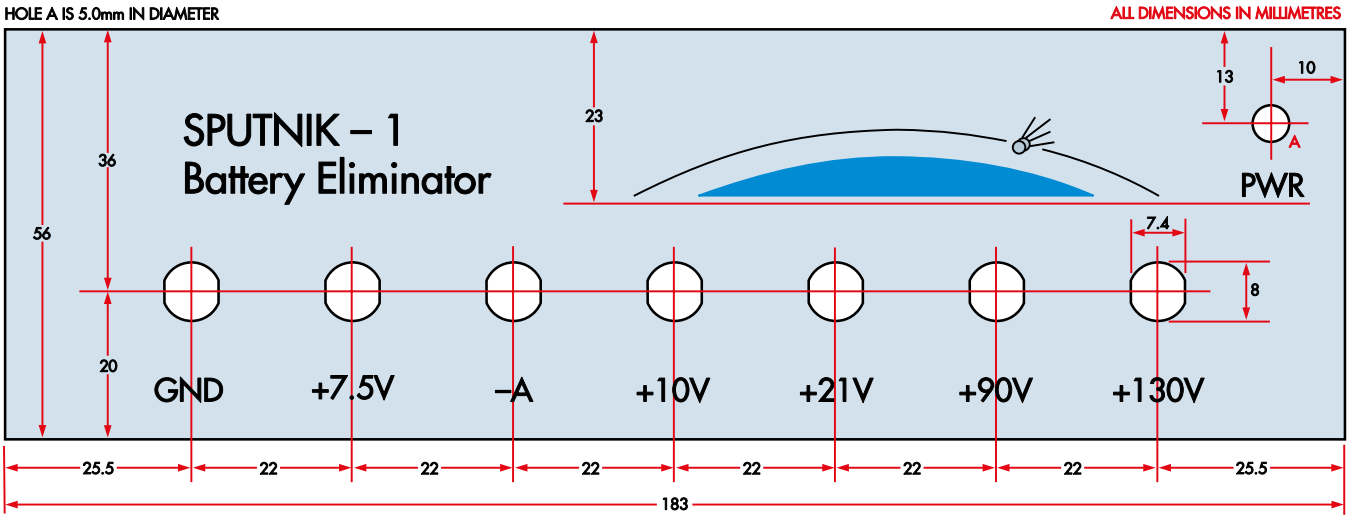
Przez odpowiedni dobór modeli tych zasilaczy można uzyskać niemal dowolny zakres napięć zasilania. Zasilacz 12 V ma wysoki prąd wyjściowy, więc jego właśnie użyłem do zasilenia obwodu żarzenia lamp. Trzy

Zdjęcie 20. Ukończona i w pełni funkcjonująca replika nadajnika. Manipulator i moduł nadajnika można teraz szczegółowo badać



Zdjęcie 21. Sztuczne obciążenie, dołączane do gniazda wyjściowego nadajnika. Niewielka ilość sygnału „przecieka" do anten i może być w pobliżu odbierana przez radio

eprasa.pl 7d549de066



Rysunek 22. Rozmieszczenie otworów w panelu przednim i projekt graficzny mojego „eliminatora baterii"

jednostki 48 V połączone szeregowo zapewniają napięcie B+.

Źródła napięć +10 V i +21 V nie muszą dostarczać dużego prądu, więc użyłem diod Zenera z rezystorem 1,2 kΩ/2 W ograniczającym ich prąd. Diody są zasilane z wyjścia pierwszego zasilacza 48 V.

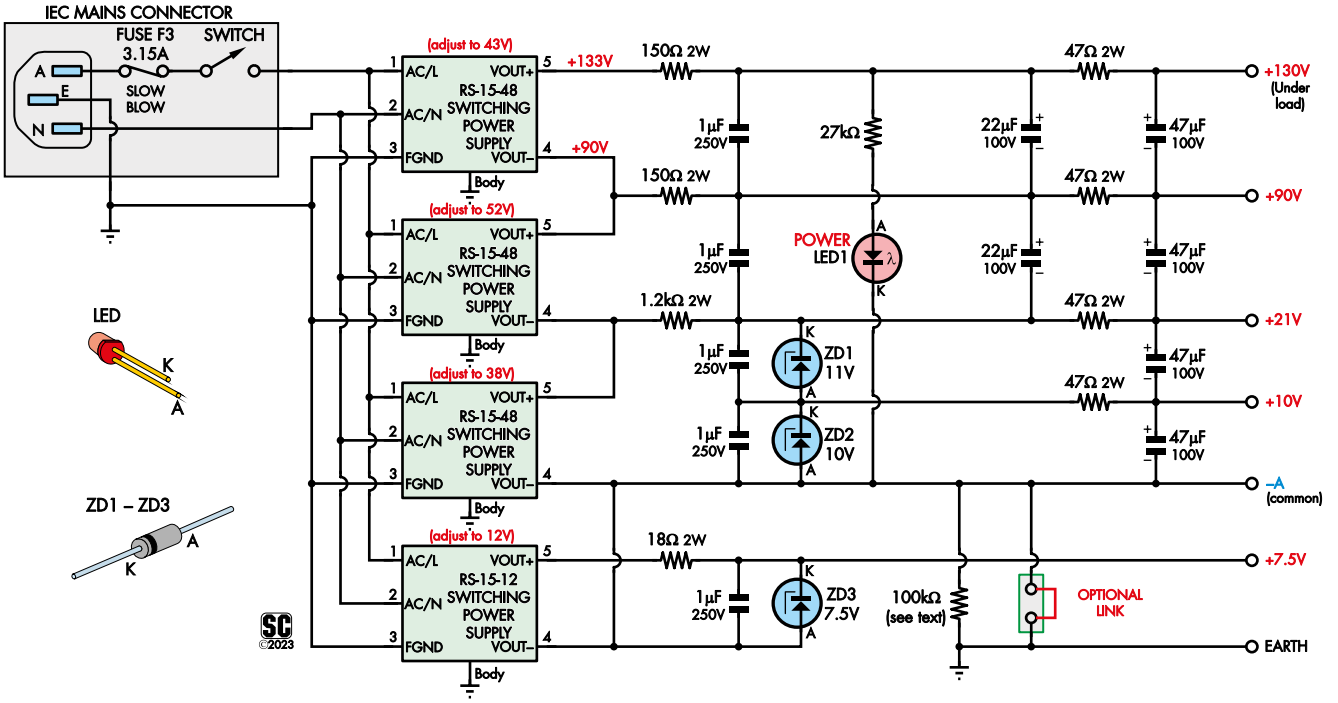
Kiedy replika nadajnika z Manipulatorem działała i obciążała zasilanie, wyregulowałem poziomy napięć 90 V i 130 V na wyjściu zasilaczy do poprawnych wartości, wspomagając się niekiedy wbudowanymi rezystorami szeregowymi. Wyjścia zasilań +7,5 V, +10 V i +21 V nie wymagały żadnych regulacji.

Wyjścia modułu zasilacza są „pływające" względem ziemi (pomijając pojemność 2 nF od obudowy), co w pewnym stopniu czyni je bezpieczniejszymi, ponieważ dotknięcie jedną ręką linii +90 V lub +130 V nie spowoduje przepływu przez nasze ciało znaczącego prądu. Mimo to dobrze jest „elektrostatycznie" połączyć wyjścia zasilacza z uziemieniem, aby ich potencjały elektryczne nie przybierały jakiejś nieznanej wartości. Zrealizowałem to rezystorem 100 kΩ. Wartość ta ogranicza maksymalny prąd płynący przy dotknięciu zacisku +130 V do około 1 mA, co jest całkiem bezpieczne.

Zdecydowałem się użyć „solidnych" diod Zenera o mocy 5 W, które jednak osiągają napięcie znamionowe już przy niewielkim prądzie.

W rezystorze 1,2 kΩ występują straty mocy 0,24 W, a w rezystorze 18 Ω/2 W – 1,25 W. 1,875 W mocy wytraca się w diodzie Zenera 7,5 V (spadając do 1,125 W pod obciążeniem). Łączne straty w diodach Zenera 10 V i 11 V wynoszą tylko 0,3 W. To sprawia, że całkowita moc strat użytych stabilizatorów na diodach Zenera wynosi w przybliżeniu zaledwie 3 W.

Stabilizowanie napięć z diodami Zenera jest bardzo korzystne również z innego powodu.



Rysunek 23. Schemat „eliminatora baterii", zasilającego Manipulator i nadajnik. „Eliminator" jest oparty na czterech zasilaczach impulsowych prądu stałego firmy MEAN WELL, zasilanych z sieci energetycznej oraz na diodach Zenera, rezystorach mocy i kondensatorach filtrujących tętnienia

eprasa.pl 7d549de066

Zdjęcie 22. „Eliminator baterii" czyli zasilacz sieciowy, wbudowany do bardzo ładnej obudowy. Wszystkie napięcia wymagane do zasilania Manipulatora i nadajnika są wyprowadzone na panel przedni na gniazda bananowe. Gniazdo sieciowe IEC, wyłącznik zasilania i bezpiecznik stanowią jeden element i znajdują się na tylnym panelu

Użyte zasilacze impulsowe mają znaczny poziom tętnień na wyjściach – według pomiaru około 80 mVpp. Tętnienia te pochodzą ze źródła o bardzo małej impedancji wyjściowej, co utrudnia filtrowanie. Na przykład dołączenie kondensatora 100 µF bezpośrednio na zaciskach wyjściowych zasilacza redukuje tętnienia tylko w niewielkim stopniu. Natomiast rezystancja szeregowa bocznika diody Zenera i mała rezystancja dynamiczna samej diody tworzą dzielnik napięcia, który tłumi większość tętnień bez stosowania dużych kondensatorów filtrujących. Dotyczy to wyjść +7,5 V, +10 V i +21 V. Wyjścia 90 V i 130 V wymagały użycia filtrów dolnoprzepustowych RC w celu uzyskania niskich tętnień – poniżej 3 mVpp.

Zmontowane urządzenie pokazano na **zdjęciu 22**.

Bezpieczeństwo zasilania z sieci

Zbudowałem eliminator baterii w bardzo wysokiej jakości obudowie z odlewanego i tłoczonego aluminium Takachi MS66-21-23G, którą sprowadziłem z Japonii.

Wybrałem wersję z wewnętrznym panelem montażowym (chassis) oraz z opcjonalnymi nóżkami umożliwiającymi ustawienie pod kątem.

Na tylnym panelu znajduje się gniazdo sieciowe IEC z wyłącznikiem i bezpiecznikiem (zdjęcie 22). Gniazdo pozwala uniknąć obecności przewodu zwisającego z urządzenia, gdy nie jest ono używane. Gniazdo sprawia również, że zbędne jest doprowadzanie zasilania sieciowego do wyłącznika na panelu przednim. Gniazdo IEC zawiera bardzo krótkie połączenie między stykiem fazowym sieci a bezpiecznikiem. Połączenie to można łatwo osłonić dodatkowym arkuszem izolacyjnym z otworami na trzy styki. Niektórzy konstruktorzy nakładają na ten metalowy styk gumę silikonową, ale ja nie jestem zwolennikiem tego rozwiązania, ponieważ guma może spaść. Inną opcją jest koszulka izolacyjna, ale jest ona nieco nieporęczna.

Do bolca uziemienia gniazda IEC są podłączone dwa przewody uziemiające. Jeden z nich łączy się bezpośrednio z metalową obudową poprzez podkładkę gwiazdową, zamocowaną w sposób odporny na wstrząsy. Drugi przewód uziemiający łączy się ze wszystkimi uziemieniami na listwach śrubowych zasilaczy RS-15. Zasilacze są również uziemione poprzez przykręcenie śrubami montażowymi do obudowy. Podwójne uziemienie daje niższą rezystancję i wyższą zdolność przewodzenia prądu i jest wytrzymalsze elektrycznie niż połączenie jednoprzewodowe.

Przylutowałem przewody do płaskich okrągłych oczek lutowniczych, pasujących do śrub w listwach zasilaczy RS-15, i nałożyłem izolację termokurczliwą. Złym pomysłem byłoby bezpośrednie przykręcanie przewodów śrubami, ponieważ żyły przewodów mogą z czasem pękać.

Zostawiłem plastikowe osłony na połączeniach śrubowych zasilaczy RS-15. Osłony zapobiegają kontaktowi palców z zaciskami pod napięciem podczas dokonywania manipulacji wewnątrz zasilanego urządzenia.

Zasilacze RS-15 można przykręcić bezpośrednio do metalowej powierzchni we wnętrzu obudowy. Dodałem jednak w pobliżu złączy czarny izolujący arkusz z włókna szklanego FR4, jak widać na **zdjęciu 23**. Arkusz nie izoluje obudów zasilaczy od obudowy urządzenia, dzięki czemu zasilacze są podwójnie uziemione.

Wymiary panelu przedniego i jego rozwiązanie graficzne widzimy na **rysunku 22**. Grafika panelu została wykonana przez firmę Stickerman w formie przezroczystej naklejki.

Otwory na gniazda bananowe 4 mm (firmy Hirschmann) nie są okrągłe, lecz podłużne, co zapobiega obracaniu się gniazda podczas dokręcania. Aby uzyskać odpowiedni kształt, musiałem wywiercić otwory o średnicy około 7 mm, spiłować płaskie powierzchnie do 7,4 mm, a następnie wygładzić otwory w przeciwnej osi okrągłym pilnikiem. Jedenaście zacisków lutowniczych to pojedyncze zaciski śrubowe 3 mm z izolacją teflonową. Jeden z nich to solidny, gwintowany, sześciokątny zacisk uziemiający o wysokości 10 mm dla rezystora 100 kΩ.

Korzystnym aspektem obudowy Takachi i stelaża jest to, że można zmontować wszystkie elementy – w tym stelaż, panel przedni i panel tylny – zanim zostaną one umieszczone w głównej obudowie. ■

dr Hugo Holden

Zdjęcie 23. W obudowie mieszczą się cztery zasilacze impulsowe. Trochę miejsca zabierają też rezystory, kondensatory i diody Zenera. Układ jest na tyle prosty, że płytka drukowana nie była konieczna

Zdjęcie 24. Wiązka kablowa na spodzie podstawy (której nie ma na zdjęciu 23). Zwróćmy uwagę na diodę Zenera na zasilaniu 7,5 V. Została ona dodana w celu ochrony żarników lamp przed przypadkowym podaniem zbyt wysokiego napięcia

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

eprasa.pl 7d549de066

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.

Wykład 32

Wyładowania elektrostatyczne (ESD)

Ze względu na to, że wiele elementów elektronicznych jest wrażliwych na wyładowania elektrostatyczne (ESD), każda osoba pracująca z elektroniką powinna dobrze znać ich właściwości i sposób oddziaływania.

ESD – wyładowania elektrostatyczne

Elektrostatyczne rozładowanie. ESD to skrót od *ElectroStatic Discharge*, czyli wyładowania elektrostatycznego. Pojęcie to odnosi się do rozładowań elektrycznych o stosunkowo niewielkiej energii. Z uwagi na ich niską energię, wyładowania te są nieszkodliwe dla człowieka – co najwyżej uciążliwe, jak w przypadku drobnego „kopnięcia" przy dotknięciu metalowej klamki drzwi lub karoserii samochodu.

Dla układów elektronicznych i ich podzespołów takie rozładowania mogą jednak mieć poważne konsekwencje. Inteligentne systemy mogą zacząć działać w sposób nieprzewidywalny, a poszczególne elementy mogą ulec trwałemu uszkodzeniu. Wrażliwość komponentów elektronicznych na ESD jest często bagatelizowana.

Dane zawarte w tabeli poniżej mają za zadanie brutalnie wyprowadzić Czytelnika z tej być może błogiej nieświadomości. Podane wartości napięć określają maksymalne napięcie, jakie może wystąpić pomiędzy wyprowadzeniami danego elementu.

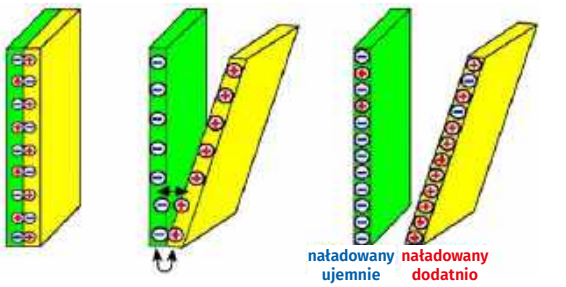
Odporność elementów elektronicznych na ESD. Maksymalne napięcie między dwoma wyprowadzeniami

Element	Maksymalne napięcie między wyprowadzeniami
Tranzystory FET	10 V – 100 V
Tranzystory mocy MOSFET	100 V – 300 V
Układy VLSI (sprzed 1990)	400 V – 1 000 V
Układy VLSI (nowoczesne)	1 000 V – 3 000 V
HCMOS	1 500 V – 3 000 V
CMOS, typ BE	2 000 V – 5 000 V
Tranzystory MOS liniowe	800 V – 4 000 V
Stare tranzystory bipolarne	600 V – 6 000 V
Nowoczesne tranzystory bipolarne	2 000 V – 8 000 V
Bipolarne tranzystory mocy	7 000 V – 25 000 V
Rezystory warstwowe ¼ W	1 000 V – 5 000 V

Wrażliwość elementów elektronicznych na wyładowania elektrostatyczne (ESD) (© 2018 Jos Verstraten)

Powstawanie wyładowań ESD

Ładunki elektrostatyczne powstają, gdy dwa nieprzewodzące powierzchnie zostają ze sobą zetknięte, a następnie rozdzielone. W momencie oddzielania tych powierzchni jedno z nich „zabiera" elektrony z drugiego. Proces ten przedstawiono na rysunku obok.



Powstawanie ładunku elektrostatycznego w materiałach nieprzewodzących (© 2018 Jos Verstraten)

eprasa.pl 7d549de066

Materiał, z którego zostały oderwane elektrony, zostaje naładowany dodatnio, natomiast materiał, który przejął elektrony – ujemnie. Ładunki te nazywamy ładunkami statycznymi.

W zależności od rodzaju materiałów, które zostają rozdzielone, ładunek statyczny może mieć bardzo różną wartość – od bardzo niskiej aż po bardzo wysoką. Zjawisko to jest dobrze znane z codziennego życia. Przykładowo, chodząc po wykładzinie zawierającej nylon, ładujemy się elektrostatycznie w momencie odrywania stopy od podłoża.

Elektryzowanie przez pocieranie

To zjawisko fizyczne znane jest jako *elektryzowanie przez pocieranie* (ang. *triboelectric charging*). Wszystkie materiały wokół nas zbudowane są z cząsteczek, czyli molekuł, które z kolei składają się z jeszcze mniejszych jednostek – atomów.

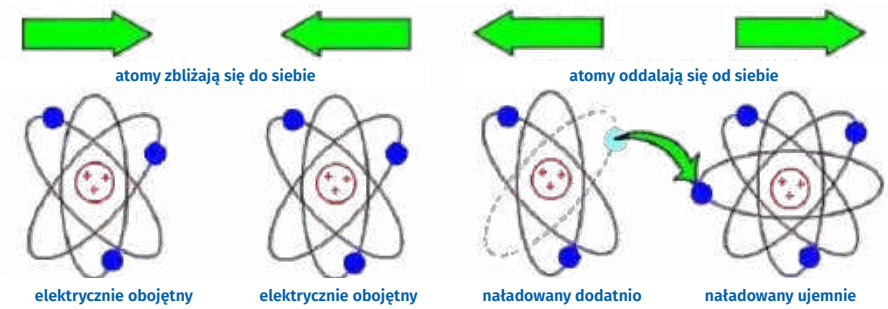
Każdy atom zawiera ładunki elektryczne: dodatnio naładowane protony i obojętne neutrony tworzące jądro atomowe, wokół którego krążą ujemnie naładowane elektrony.

W normalnych warunkach atom jest elektrycznie obojętny – liczba protonów w jądrze jest równa liczbie elektronów na orbitach.

W niektórych materiałach elektrony mogą się stosunkowo łatwo przemieszczać. Natomiast dodatnio naładowane jądro atomowe jest bardzo stabilne – oddzielenie protonów lub neutronów wymaga ogromnych ilości energii.

Gdy atom straci jeden elektron, staje się jonem dodatnim. Jeśli natomiast zyska dodatkowy elektron, staje się jonem ujemnym.

Na ilustracji przedstawiono dwa atomy, z których każdy ma trzy elektrony, a więc i trzy protony – oba są obojętne elektrycznie. Kiedy atomy zostaną zbliżone, zaczynają ze sobą oddziaływać, umożliwiając elektronom stosunkowo łatwe przechodzenie z jednego na drugi. Ponieważ proces ten zachodzi miliardy razy na sekundę, bilans ładunków pozostaje zerowy.



Ładunki elektrostatyczne powstają na skutek zjawiska elektryzowania przez pocieranie (© 2018 Jos Verstraten)

Jeśli jednak w pewnym momencie atomy zostaną rozdzielone, może się zdarzyć, że jeden z elektronów przeskoczy właśnie wtedy z jednego atomu na drugi – i nie zdąży już wrócić. W rezultacie lewy atom ma od tej chwili o jeden elektron za mało, a prawy – o jeden za dużo. Powstaje różnica ładunku o wartości dwóch elementarnych jednostek.

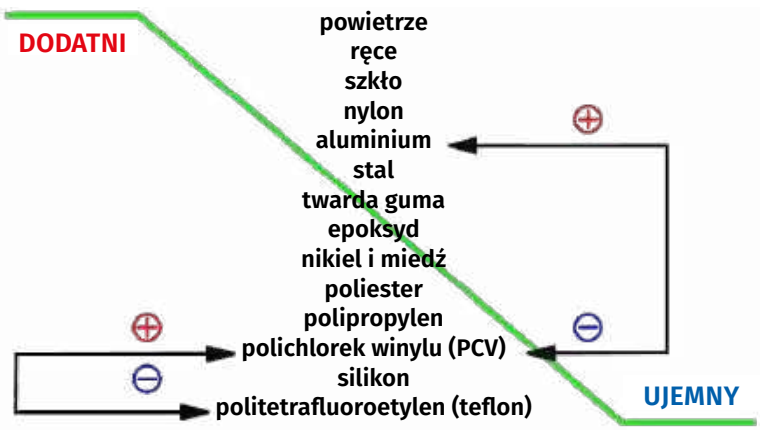
Szereg elektrostatyczny ciał stałych

Wielkość ładunku oraz jego biegunowość zależą od tego, jakie materiały zostają ze sobą zetknięte, a następnie rozdzielone. Na podstawie obserwacji tego zjawiska opracowano tzw. *szereg elektrostatyczny* (w uproszczonej postaci przedstawiony na rysunku).

Aluminium, po oddzieleniu od PVC, zostaje naładowane dodatnio, a PVC – ujemnie. Oznacza to, że aluminium oddało część swoich elektronów tworzywu PVC.

Z kolei to samo PVC po kontakcie z teflonem samo stanie się dodatnio naładowane, ponieważ teflon ma jeszcze większą zdolność przyciągania elektronów.

Im dalej od siebie znajdują się materiały w tym szeregu, tym większe napięcie elektrostatyczne może między nimi powstać.



Z szeregu elektrostatycznego można odczytać, jak duży ładunek może powstać przy rozdzieleniu dwóch materiałów (© 2018 Jos Verstraten)

Od ładunku do napięcia

Między dwoma rozdzielonymi materiałami może powstać różnica ładunków. W jednym z nich gromadzi się nadmiar elektronów, w drugim występuje ich niedobór.

Ładunek mierzymy w kulombach (C), jednak w praktyce objawia się on jako różnica napięć – zgodnie ze wzorem:

$$q = C \times U$$

gdzie:

q – ładunek (w kulombach),

C – pojemność (w faradach),

U – napięcie (w woltach),

eprasa.pl 7d549de066

Ładunek q zgromadzony na danym przedmiocie jest równy iloczynowi jego pojemności elektrycznej względem ziemi C i napięcia U, jakie względem niej występuje. Oznacza to, że jeśli na przedmiocie znajduje się ładunek elektrostatyczny, to względem potencjału ziemi musi występować również napięcie.

Z tego względu przy określaniu wielkości ESD (wyładowania elektrostatycznego) nie posługujemy się jednostką kulomba, lecz napięciem wyrażanym w woltach. To znacznie wygodniejsze i bardziej praktyczne. W mowie potocznej oraz w dokumentacji technicznej mówimy więc zazwyczaj o **napięciu elektrostatycznym**, a nie o **ładunku elektrostatycznym**.

Wartość napięcia elektrostatycznego

Wartość napięcia elektrostatycznego, jakie można zmierzyć na naładowanym przedmiocie względem punktu odniesienia (np. ziemi), zależy oczywiście od miejsca, jakie dane materiały zajmują w szeregu elektrostatycznym, ale również od wilgotności powietrza. To całkowicie zrozumiałe: wilgotne powietrze przewodzi ładunki znacznie lepiej niż suche, a im wyższa wilgotność, tym szybciej nadmiar elektronów może opuścić powierzchnię materiału i się rozproszyć. W tabeli na rysunku zestawiono przykładowe wartości napięć elektrostatycznych, jakie mogą powstać w wyniku codziennych czynności – przy dwóch poziomach wilgotności powietrza.

Napięcia elektrostatyczne a wilgotność powietrza

Czynność	Wilgotność względna 28%	Wilgotność względna 80%
Chodzenie po dywanie nylonowym	35 000 V	1 500 V
Zdejmowanie wełnianego swetra	25 000 V	1 900 V
Wstawanie z krzesła	18 000 V	1 800 V
Otwieranie plastikowej torby	17 000 V	1 600 V
Chodzenie po podłodze winylowej	12 000 V	250 V
Praca przy plastikowym stole	6 000 V	100 V

Wartości napięcia elektrostatycznego powstającego przy codziennych czynnościach (© 2018 Jos Verstraten)

Już na pierwszy rzut oka widać, jak duży wpływ ma wilgotność na poziom napięcia statycznego. Oczywiście, skrajne wartości – 28% i 80% – nie są typowe. W biurach i warsztatach przyjmuje się zazwyczaj wilgotność względną na poziomie około 50%. Jeśli jednak porównamy napięcia generowane w codziennych sytuacjach – nawet przy bardzo dużej wilgotności – z wartościami progowymi wrażliwości podzespołów, przedstawionymi wcześniej w artykule, łatwo zauważyć, że większość nowoczesnych komponentów elektronicznych **nie przetrwa zwykłego dotyku po spacerze po wykładzinie**.

Napięcie wymusza przepływ prądu

Jeśli potencjał twojego ciała względem ziemi wynosi 10 000 V i dotkniesz wyprowadzenia układu scalonego, który poprzez blat roboczy jest połączony z potencjałem ziemi, zamyka się ścieżka dla przepływu prądu.

Zgromadzone w twoim ciele napięcie elektrostatyczne powoduje przepływ prądu przez strukturę układu, prowadząc ten ładunek do ziemi. Na drodze między twoim ciałem a ziemią znajduje się szereg rezystancji, a napięcie 10 000 V rozkłada się na nich proporcjonalnie do ich wartości w całym obwodzie.

Może się więc zdarzyć, że między dwiema ścieżkami przewodzącymi wewnątrz układu, oddalonymi od siebie o zaledwie 1 μm, powstanie różnica potencjałów rzędu 2 000 V. Skutek jest łatwy do przewidzenia: nastąpi przebicie izolacji, przepływający prąd wytworzy lokalnie tak dużą moc, że fragment układu dosłownie wyparuje.

Dla lepszego zobrazowania skali zjawiska: bardzo szybkie rozładowanie napięcia 15 000 V może wyzwolić energię rzędu 20 MJ, co lokalnie oznacza moc sięgającą nawet 200 kW.

To właśnie podstawowy mechanizm, przez który wyładowania elektrostatyczne (ESD) powodują tak poważne uszkodzenia w układach i komponentach elektronicznych. Analogicznie działa też piorun – choć jest zjawiskiem na znacznie większą skalę, jego niszcząca siła również wynika z ogromnego, miejscowego natężenia prądu i mocy.

Niewidzialny wróg

Warto pamiętać, że wyładowania elektrostatyczne mogą pozostać całkowicie niezauważone – nie musisz ich czuć, słyszeć ani widzieć. Przeciętny człowiek **nie odczuwa wyładowań o napięciu poniżej 3 000 V**.

Przyjmuje się następujące orientacyjne progi:

- wyładowanie staje się **odczuwalne** jako impuls nerwowy od około **3 000 V**,
- jest **słyszalne** jako ciche trzaski od około **6 000 V**,
- i **widoczne** jako iskierka dopiero od około **9 000 V**.

Innymi słowy: nawet jeśli nie czujesz, nie słyszysz i nie widzisz żadnego wyładowania, możesz bezwiednie przyłożyć napięcie 3 000 V do układu scalonego.

Wnioski

Mamy nadzieję, że ten krótki wstęp uświadomił Ci, jak poważnym zagrożeniem dla elektroniki jest elektrostatyka.

W wielu internetowych dyskusjach problem ten bywa bagatelizowany. Typowa wypowiedź w stylu:

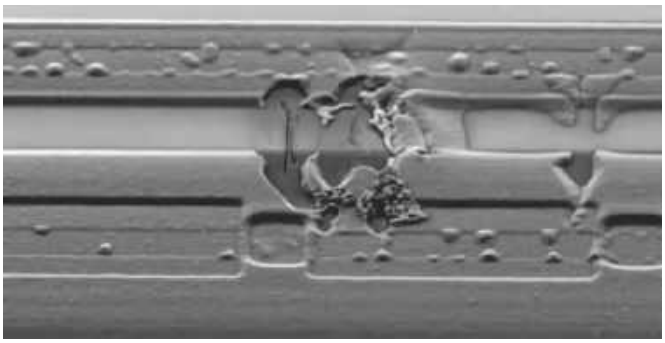
„Zanim dotknę płytki, opieram rękę o kaloryfer. W ten sposób się rozładowuję i mogę spokojnie pracować bez żadnych zabezpieczeń ESD” – jest całkowicie pozbawiona sensu.

Samo odejście od kaloryfera i powrót do stanowiska pracy wystarczy, by w twoim ciele ponownie zgromadził się tak duży ładunek elektrostatyczny, że może on dosłownie przesądzić o losie czułych komponentów.

eprasa.pl 7d549de066

Uszkodzenia wywołane przez ESD

Problem z uszkodzeniami spowodowanymi przez wyładowania elektrostatyczne (ESD) polega na tym, że są one niewidoczne gołym okiem. Na ilustracji pokazano wymowny przykład zniszczeń, jakie może spowodować ESD wewnątrz układu scalonego. W strukturze krzemowej doszło do mikroskopijnego wybuchu, w wyniku którego powstało zwarcie między dwiema sąsiednimi ścieżkami przewodzącymi. Z zewnątrz oczywiście nie widać żadnych śladów poważnych uszkodzeń – układ wygląda na zupełnie nienaruszony. Wraz z miniaturyzacją elektroniki i coraz wyższą częstotliwością pracy współczesnych układów scalonych, ich podatność na uszkodzenia ESD stale rośnie.



Układ scalony uszkodzony przez wyładowanie elektrostatyczne (ESD) (© Wikimedia Commons)

Różne skutki wyładowań ESD

W zależności od ilości energii uwolnionej w określonym czasie, wyładowanie elektrostatyczne (ESD) może uszkodzić element elektroniczny **natychmiast** lub **z opóźnieniem**. Aby sklasyfikować rodzaje uszkodzeń, wprowadzono kilka technicznych pojęć.

Uszkodzenie całkowite (katastroficzne)

Takie uszkodzenie oznacza, że element elektroniczny zostaje trwale zniszczony w wyniku pojedynczego wyładowania. Paradoksalnie, jest to **najlepszy scenariusz**, ponieważ usterkę można łatwo wykryć podczas kontroli jakości – zarówno samego elementu, jak i urządzenia, w którym został zamontowany.

Układ z uszkodzeniem opóźnionym (ang. *pregnant IC*)

Nie każdy układ uszkodzony przez ESD ulega natychmiastowej awarii. W wielu przypadkach miejsce uszkodzenia stopniowo ulega degradacji, zwłaszcza podczas długotrwałej pracy urządzenia. Takie układy określa się potocznie jako „*pregnant IC*", czyli „układ w ciąży" – defekt ujawni się dopiero po pewnym czasie działania.

Usterka utajona (*latent defect*)

Tego rodzaju uszkodzenie przypomina zjawisko opisane powyżej, ale z jedną różnicą: nie prowadzi do całkowitej awarii, tylko powoduje **pogorszenie parametrów technicznych** układu lub urządzenia.

Nietrudno sobie wyobrazić, że komponent z utajoną usterką to prawdziwa zmora dla każdego serwisu technicznego. Klient skarży się, że urządzenie nie spełnia deklarowanych parametrów. Ty potwierdzasz, że rzeczywiście coś jest nie tak – ale **jak znaleźć przyczynę**, skoro wszystko wydaje się działać?

Od ESD do ESDS

W takim przypadku ładunek elektrostatyczny zostaje przeniesiony z naładowanego źródła (ESD) na wrażliwy element elektroniczny (ESDS – *Electrostatic Discharge Sensitive*).

Typowy przykład: idziesz w kierunku stanowiska pracy, po drodze gromadzisz ładunki elektrostatyczne, a następnie sięgasz po układ scalony leżący na blacie. W tej chwili następuje rozładowanie – przez wyprowadzenia układu, blat roboczy, metalowe nogi stołu – aż do uziemienia.

Dla takich sytuacji opracowano model symulacyjny, tzw. **model ciała ludzkiego** (*Human Body Model*, HBM). Do tego modelu jeszcze wrócimy w dalszej części artykułu.

Przepływ ładunku z elementu ESDS do ciała

Możliwa jest również sytuacja odwrotna. Jeśli jesteś całkowicie rozładowany, a sięgniesz po czuły element elektroniczny (ESDS), leżący na **naładowanym blacie**, wówczas to **ładunek przepłynie z powierzchni stołu przez komponent – do twojego ciała**. Taka sytuacja również może doprowadzić do uszkodzenia elementu. Dla tego typu przypadków opracowano osobny model symulacyjny, znany jako **MM** (*Machine Model*). Warto uświadomić sobie, że tego rodzaju zdarzenie (przepływ ładunku **z ESDS do ciała**) może być **groźniejsze** niż odwrotny przypadek (czyli rozładowanie z ciała do elementu). Dzieje się tak dlatego, że **blat stołu może zgromadzić znacznie większy ładunek niż ludzkie ciało**, co skutkuje wyższym napięciem i silniejszym prądem rozładowania.

Wyładowania indukowane polem elektrostatycznym

Wokół naładowanego elektrostatycznie przedmiotu wytwarza się **pole elektrostatyczne**. Jeśli w jego zasięgu znajdzie się inny obiekt, pole to może **wzbudzić w nim ładunek elektrostatyczny**. Zjawisko to przypomina działanie transformatora: uzwojenie pierwotne wytwarza pole magnetyczne, które w uzwojeniu wtórnym indukuje napięcie. W analogiczny sposób pole elektrostatyczne może **wzbudzić w pobliskim obiekcie tak duży ładunek**, powodując, że pojawi się tam niebezpieczne napięcie statyczne. Jeśli ten obiekt ma niską impedancję względem ziemi, może dojść do wyładowania iskrowego, które z kolei **może spowodować uszkodzenia w czułych układach elektronicznych**.

eprasa.pl 7d549de066

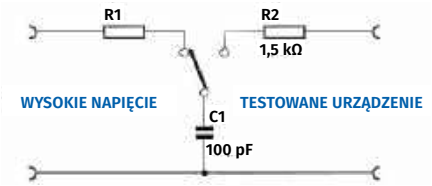
Modele wyładowań elektrostatycznych (ESD)
Model ciała ludzkiego (HBM)

Człowiek jest głównym źródłem uszkodzeń ESD. Aby móc wiarygodnie i powtarzalnie testować odporność elementów na wyładowania elektrostatyczne, opracowano międzynarodowy standard symulacyjny, który stanowi elektryczny odpowiednik naładowanego ciała człowieka. Model ten, znany jako HBM (Human Body Model), jest – co może dziwić – wyjątkowo prosty (rysunek obok).

Jeszcze ciekawsze jest to, że jego pierwowzór powstał już w połowie XIX wieku i pierwotnie służył do badania wyładowań iskrowych w kopalniach węgla – celem było zapobieganie eksplozjom pyłu węglowego.

Ciało człowieka odwzorowuje się w tym modelu jako kondensator o pojemności zaledwie **100 pF**. Kondensator ten ładowany jest przez wyłącznik i opornik ograniczający prąd R1 do napięcia testowego ESD. W momencie przełączenia wyłącznika kondensator rozładowuje się przez rezystor o wartości **1,5 kΩ** bezpośrednio na badany element elektroniczny (*device under test*).

Pomimo niewielkiej pojemności kondensatora, w czasie rozładowania może popłynąć **znaczący prąd**. Na wykresie poniżej przedstawiono typowy przebieg prądu podczas wyładowania HBM do testowanego układu. Zwróć uwagę na skalę czasu – **oznaczona jest w nanosekundach!** Wniosek jest prosty: **wyładowania elektrostatyczne to zjawiska ekstremalnie szybkie**, które rozgrywają się w ciągu zaledwie **kilkudziesięciu nanosekund**. Pod tym względem można je porównać do wyładowania atmosferycznego – piorun również **powstaje i zanika w ciągu kilkudziesięciu nanosekund**.

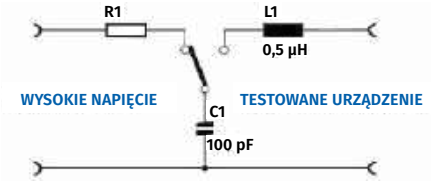


Zaskakująco proste schematyczne odwzorowanie naładowanego ciała człowieka (© 2018 Jos Verstraten)

Typowy przebieg prądu rozładowania w przypadku wyładowania modelu ciała ludzkiego (HBM) do testowanego elementu (© 2018 Jos Verstraten)

Model maszyny (*Machine Model*)

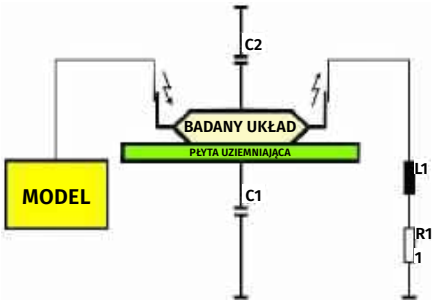
Model maszyny bazuje na założeniach modelu ciała ludzkiego (HBM), ale jego schemat wygląda nieco inaczej – co pokazano na rysunku poniżej. W tym przypadku kondensator ma pojemność 200 pF, a rezystor rozładowujący został zastąpiony cewką o indukcyjności 0,5 μH, która – w założeniu – nie wnosi żadnej rezystancji.



Model maszyny (Machine Model) (© 2018 Jos Verstraten)

Testowanie elementów za pomocą modeli ESD

Do badania odporności komponentów elektronicznych na wyładowania elektrostatyczne opracowano standardową procedurę pomiarową, której schemat przedstawiono na rysunku poniżej. Testowany element – w tym przypadku układ scalony w obudowie DIL – umieszcza się na metalowej płycie w taki sposób, aby jego wyprowadzenia były swobodnie uniesione (niepołączone z podłożem). Jedno z wyprowadzeń zostaje naładowane zgodnie z modelem ciała ludzkiego (HBM), natomiast inne jest rozładowywane do masy przez **rezystor o wartości 1 Ω** oraz niewielką indukcyjność. Kondensatory **C1** i **C2** odpowiadają za odwzorowanie **pojemności pasożytniczych** obecnych w rzeczywistym układzie testowym.



Często stosowana metoda pomiarowa do badania (nie)odporności elementów na ESD (© 2018 Jos Verstraten)

Klasyfikacja

Na podstawie wyników pomiarów każdemu elementowi można przypisać określoną **klasę odporności na ESD**. Klasa ta wskazuje **maksymalne napięcie wyładowania elektrostatycznego**, jakie dany komponent może wytrzymać bez uszkodzenia. W tabeli poniżej przedstawiono tę klasyfikację dla testów przeprowadzanych według **najczęściej stosowanego i najważniejszego modelu**, czyli **modelu ciała ludzkiego** (***Human Body Model***).

Klasyfikacja komponentów według odporności na ESD

Klasa	Zakres napięcia
CLASS 0	< 250 V
CLASS 1A	250 V – 500 V
CLASS 1B	500 V – 1 000 V
CLASS 1C	1 kV – 2 kV
CLASS 2	2 kV – 4 kV
CLASS 3A	4 kV – 8 kV
CLASS 3B	> 8 kV

Klasyfikacja elementów według ich (nie)odporności na napięcia wyładowań elektrostatycznych zgodnie z modelem ciała ludzkiego (HBM) (© 2018 Jos Verstraten)

Zabezpieczenia przed ESD

Jeśli pracujesz z elementami elektronicznymi – nawet jeśli tylko wyjmujesz je z opakowania – musisz zadbać o odpowiednie środki ochrony przed wyładowaniami elektrostatycznymi (ESD).

Ogólną zasadę tych zabezpieczeń można streścić w krótkim i trafnym haśle:

BRAK ŁADUNKU = BRAK WYŁADOWANIA

Jeśli dopilnujesz, by w miejscu pracy **nie mogły się gromadzić ładunki elektrostatyczne**, to tym samym **nie dojdzie do żadnych szkodliwych wyładowań**. Teoria jest prosta – **praktyka bywa znacznie trudniejsza**.

eprasa.pl 7d549de066

Kontrolowane rozładowanie

Aby zapobiec gromadzeniu się ładunków, należy doprowadzić do tego, by wszystkie przedmioty w miejscu pracy znajdowały się **na tym samym potencjale**. Oznacza to konieczność **połączenia ich ze sobą za pomocą przewodzących ścieżek elektrycznych** – również siebie samego. Jak łatwo się domyślić, **łatwiej to powiedzieć niż wykonać**. Co więcej, **nie wolno łączyć wszystkiego bezpośrednio z ziemią zwykłym przewodem**. Jeśli jakiś obiekt mimo wszystko zostanie naładowany, ładunek musi być **odprowadzony w sposób kontrolowany**. Przykładem może być **antystatyczna opaska na nadgarstek**, która zawiera wbudowany opornik o wartości około **1 MΩ**. Gdy dotkniesz naładowanego przedmiotu, napięcie elektrostatyczne zostanie odprowadzone właśnie przez ten opornik – dzięki czemu **prąd rozładowania nie będzie zbyt gwałtowny**. W kontekście ochrony przed ESD określenia takie jak „przewodzący" **nie należy rozumieć dosłownie** – chodzi raczej o **materiały o ściśle kontrolowanym, ograniczonym przewodnictwie**.

Strefa chroniona przed ESD (EPA)

W praktyce oznacza to konieczność wydzielenia tzw. **stref ESD**, czyli **EPA** (*Electrostatic Protected Area* – strefa chroniona przed wyładowaniami elektrostatycznymi). Takie obszary muszą być **wyraźnie oznaczone**, np. za pomocą specjalnych naklejek umieszczanych na drzwiach i oknach (rysunek obok). Strefa EPA może być **obsługiwana wyłącznie przez przeszkolony personel**. Typowa naklejka ostrzegawcza ma **żółte tło i czarne oznaczenia**.

Takie oznaczenia informują, że wchodzisz do strefy chronionej przed wyładowaniami elektrostatycznymi (EPA) (© Reece Safety)

Tego rodzaju strefy nie służą do tego, by całkowicie zapobiec powstawaniu ładunków elektrostatycznych, lecz po to, by **zapewnić ich kontrolowane odprowadzenie**. W obrębie strefy ochronnej stosuje się więc **przewodzącą i uziemioną wykładzinę podłogową**. Blaty robocze wyposażone są w **układy odprowadzające ładunki przez oporniki o określonej wartości**, tak aby rozładowanie nie następowało ani zbyt gwałtownie, ani zbyt wolno. Mobilne stanowiska pracy mają **przewodzące powierzchnie robocze i przewodzące kółka**, podobnie jak podstawy foteli. Również tapicerka i wypełnienie krzeseł wykonywane są z materiałów o właściwościach przewodzących.

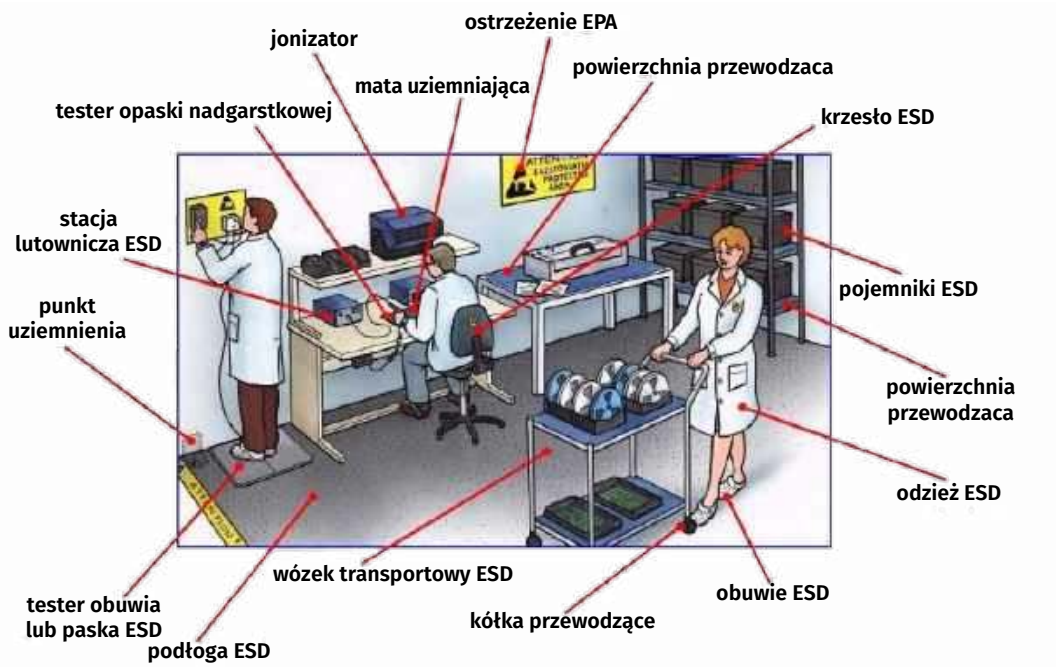
Dodatkowym problemem są **ładunki powstające wskutek tarcia**. Skuteczną ochronę zapewniają **uziemiające opaski na nadgarstek** oraz **specjalne obuwie antystatyczne**, którego właściwości przewodzące należy każdorazowo sprawdzić przed wejściem do strefy ESD. Dopełnieniem ochrony są **rękawiczki wykonane z materiałów przewodzących**.

W środowisku produkcyjnym zagrożenie związane z ESD udaje się obecnie **utrzymać pod kontrolą** dzięki zastosowaniu:

- kontrolowanego odprowadzania ładunków,
- jonizatorów,
- odpowiedniego doboru materiałów.

Wyposażenie strefy EPA

Prawidłowe przygotowanie strefy EPA to złożone zadanie – doskonale pokazuje to ilustracja poniżej, na której zebrano wszystkie najważniejsze elementy. Przedstawiona konfiguracja to oczywiście **modelowa strefa ochronna**, w której uwzględniono każdy detal.



Strefa robocza zabezpieczona przed ESD, zaprojektowana z uwzględnieniem wszystkich istotnych aspektów (© AC Supply)

eprasa.pl 7d549de066

Nie oznacza to, że wszystko musi wyglądać dokładnie tak samo, ale **pewne zasady są nieodzowne**. W szczególności należy zwrócić uwagę na:

- odpowiednie opakowania elementów wrażliwych na ESD,
- odzież antystatyczną,
- opaski uziemiające oraz specjalistyczne obuwie,
- urządzenia i akcesoria do uziemiania wrażliwych komponentów,
- systemy do uziemiania gotowych produktów,
- antystatyczne stoły robocze,
- fotele i krzesła ESD,
- wózki transportowe przystosowane do stref ESD,
- lutownice z uziemieniem przystosowane do pracy w strefach EPA,
- antystatyczne maty lub blaty robocze.

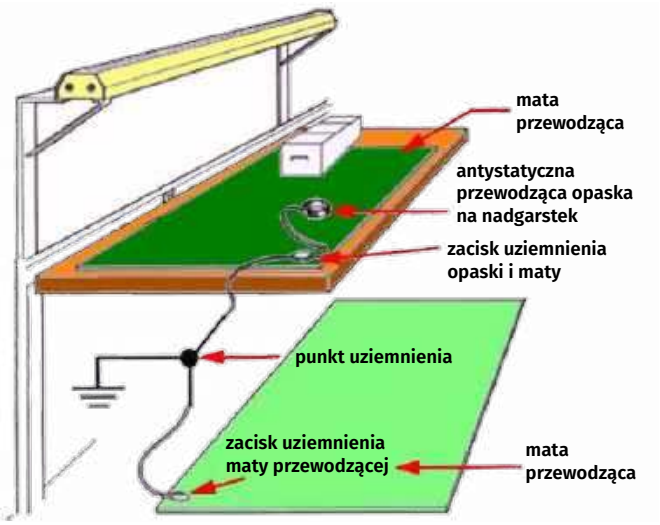
ESD a laboratorium hobbystyczne

ESD-bezpieczne stanowisko pracy, które pokazaliśmy na poprzednim rysunku, przeznaczone jest oczywiście dla firm, które na co dzień mają do czynienia z komponentami wrażliwymi na wyładowania elektrostatyczne (ESD). Wyposażenie takiego stanowiska w sposób profesjonalny wiąże się jednak ze sporymi kosztami. Co w takim razie powinien zrobić elektronik-hobbysta? Nic nie robić i liczyć na szczęście? To niezbyt rozsądne podejście, dlatego na poniższym rysunku zaproponowaliśmy minimalne wyposażenie chroniące przed ESD, które nie wymaga dużych nakładów finansowych, a zapewnia bardzo dobrą ochronę podczas typowych prac hobbystycznych.

Te podstawowe środki ochrony to:

- uziemiona mata podłogowa, która odprowadza ładunki elektrostatyczne z ciała do ziemi,
- uziemiona mata lub płyta robocza na stole,
- uziemiona opaska na nadgarstek.

Wszystkie trzy elementy należy podłączyć do wspólnego punktu uziemienia, tzw. **punktu uziemienia** (*Ground Point*).



Minimalne środki ochrony przed ESD, które powinien zastosować także elektronik-hobbysta (© Static Control Solutions)

Piktogram

Na zakończenie przedstawiamy na poniższym rysunku międzynarodowy, standaryzowany piktogram, który musi być umieszczany na wszystkich opakowaniach zawierających produkty wrażliwe na wyładowania elektrostatyczne (ESD). Piktogram ten ma żółte tło i czarny tekst.

W miejscu litery **X** mogą występować cztery różne oznaczenia:

S – ekranowanie przed wyładowaniami elektrostatycznymi (*Electrostatic Discharge Shielding*),
D – rozpraszanie ładunków elektrostatycznych (*Electrostatic Dissipative*),
L – ograniczone generowanie ładunków (*Low Charging*),
C – przewodzące elektrostatycznie (*Electrostatic Conductive*). ■

Międzynarodowy, standaryzowany piktogram ESD (© Statex)

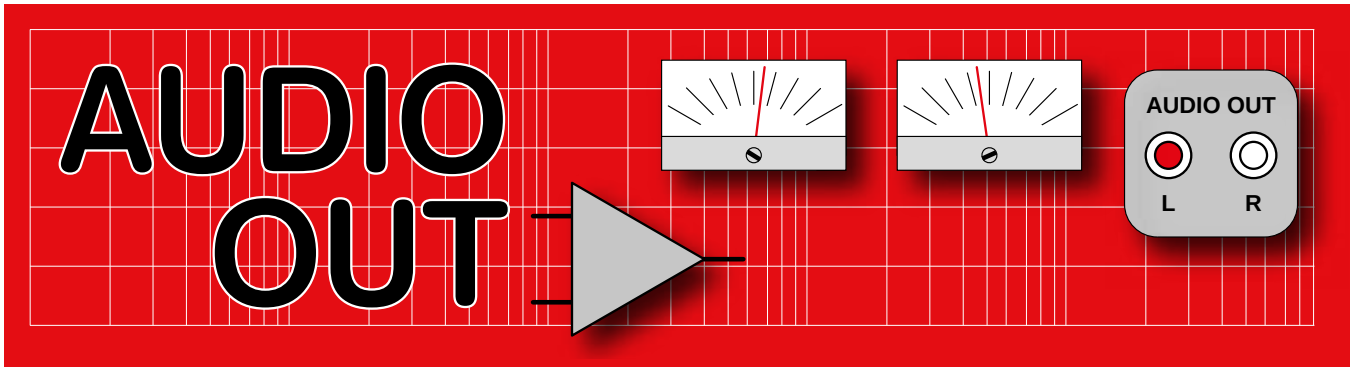
Jos Verstraten

REKLAMA

Publikujemy dla projektantów i programistów elektroniki

ELPORTAL.pl

eprasa.pl 7d549de066



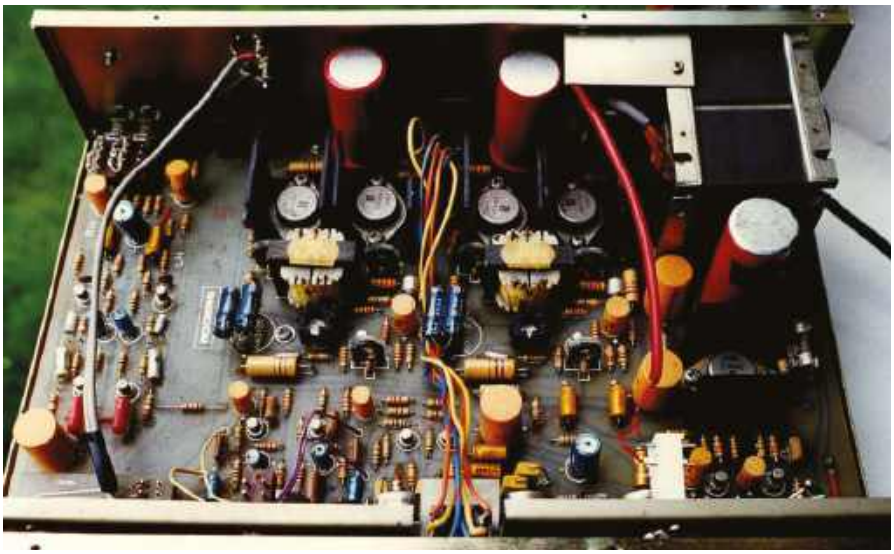
Transformatory w elektroakustyce, część 3

W części 2 tego artykułu pokazaliśmy niedoskonałości rzeczywistych transformatorów oraz wymogi i specyfikę ich pracy w sprzęcie elektroakustycznym. W bieżącej części skupimy się na dalszych zabiegach producentów samych transformatorów i sprzętu, w którym one pracują, tak aby zminimalizować fizyczne ograniczenia i zapewnić jak najlepszą pracę dla osiągnięcia wysokich walorów urządzeń elektroakustycznych.

Na początku jednak autor tego opracowania pokazuje kilka zdjęć urządzeń, których schematy zamieszczono w poprzednich częściach artykułu. Koryguje również błędy, które wkradły się na rysunkach w części 1 i 2. Większość błędów skorygowano w adaptacji do polskiego wydania. Jednak same rysunki przedrukowano wprost z oryginału. Sugestię zamieszczenia erraty zgłosili Czytelnicy, którzy dokładnie analizowali wcześniejsze rysunki.

Najistotniejszy błąd znajduje się na rysunku 14. To schemat w części drugiej, podobny do pokazanego na rysunku 6 w pierwszej części artykułu. Nietrudno zauważyć, że linia łącząca wyjście wzmacniacza z plusem zasilania jest błędem kreślarskim. Należy tu wstawić rezystor 820 Ω/1 W i podłączyć go do zasilania za filtr RC tak jak zostało to pokazane na rysunku 6. Rezystor ten kompensuje prąd pobierany przez obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego. Prąd ten nie jest pomijalny względem prądów spoczynkowych obu tranzystorów końcówki mocy i wprowadzałby asymetrię w tym zakresie. Zauważmy, że dodatkowy rezystor korygujący jest tej samej wartości, co rezystor feedbacku (820 Ω). Wobec faktu, że na wyjściu wzmacniacza panuje połowa zasilania, zabieg ten stanowi skuteczną korektę. Autor zwraca też uwagę na mniejsze błędy, jakimi są wartości rezystorów w obwodzie sterowania dolnego tranzystora końcówki mocy na rysunku 6. Tu jest także wymagana symetria z obwodem bazy górnego tranzystora. Zatem, potencjometr ma mieć wartość 100 Ω, a rezystor nad nim 2,2 kΩ.

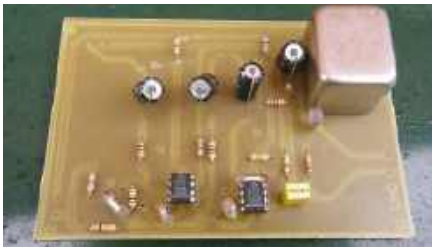
Autor podkreśla, że tego typu rozwiązanie z transformatorowym sterowaniem końcówki mocy ma jeszcze jedną zaletę, szczególnie w konstrukcjach amatorskich. Jeśli popełnisz jakiś błąd we wcześniejszym stopniu drivera, mniejsze jest prawdopodobieństwo uszkodzenia tranzystorów końcowych mocy, ponieważ transformator izoluje galwanicznie



Rysunek 23. Wnętrze wzmacniacza Rogers Ravensbrook z lat 70. XX wieku

Rysunek 24. Model lampowego wzmacniacza gitarowego z rysunku 17; zastosowano tu transformator o symbolu B18A011F firmy Carnhill Transformers

eprasa.pl 7d549de066



Rysunek 25. Prototyp transformatorowego przedwzmacniacza mikrofonowego; konstrukcja Steve-a Dove zmontowana przez studenta George'a Perakisa

Rysunek 26. Płyta czołowa policyjnego radia produkcji Pye Vanguarda; konstrukcja z roku 1965; radio to było z powodzeniem użytkowane jeszcze w latach 80. XX wieku

obie sekcje (mimo to, że całkowitej izolacji brak, ze względu na wspólną masę i zasilanie).

Na **rysunku 23** pokazano zdjęcie wnętrza takiego wzmacniacza. To konstrukcja Rogers Ravensbrook z lat 70. XX wieku. Zwróć uwagę na jeden istotny szczegół: transformatory driverów końcówek mocy (w środkowej części płyty wzmacniacza; dwa, bo to wzmacniacz stereo) nieprzypadkowo zamontowano tak, aby ich rdzenie były ustawione pod kątem prostym do rdzenia transformatora sieciowego (w prawym górnym rogu). Dzięki temu zminimalizowano przenikanie przydźwięku sieci za pośrednictwem rozproszonego pola magnetycznego.

Każde z prezentowanych rozwiązań zostało przetestowane w praktyce. W większości projektów elektronicznych – szczególnie analogowych – obliczenia teoretyczne stanowią jedynie punkt wyjścia do budowy układu, a po wykonaniu modelu lub prototypu zwykle konieczna okazuje się korekta wartości elementów.

Na **rysunku 24** widzimy model lampowego wzmacniacza gitarowego, którego schemat był pokazany na rysunku 17. Na **rysunku 25** z kolei pokazany jest transformatorowy przedwzmacniacz mikrofonowy, którego schemat znajdował się na rysunku 20.

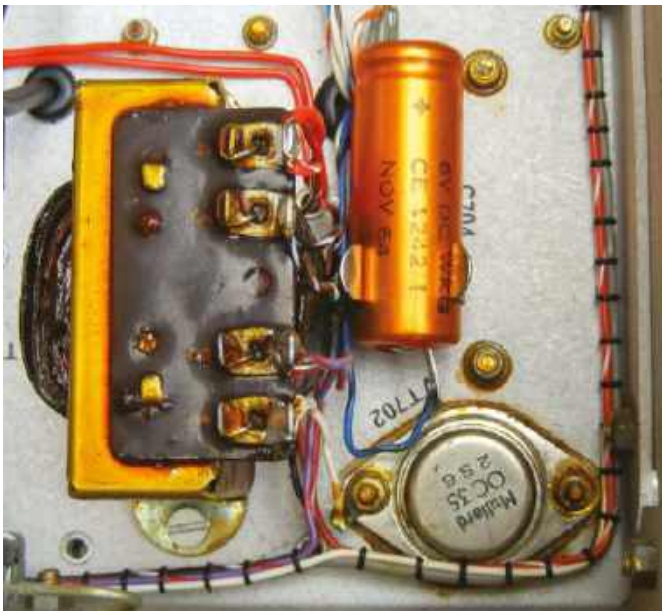
Ciekawy przykład historycznego rozwiązania znajduje się również na **rysunkach 26** i **27**. To radio używane przez policję, konstrukcja Pye Vanguard-a z roku 1964. Fragment schematu wzmacniacza był omówiony w części drugiej i pokazany na rysunku 19a.

W dalszej części artykułu omówimy zabiegi stosowane przez konstruktorów transformatorów dla urządzeń elektroakustycznych, które pozwalają na osiągnięcie wymaganego pasma częstotliwości oraz na minimalizację zniekształceń nieliniowych.

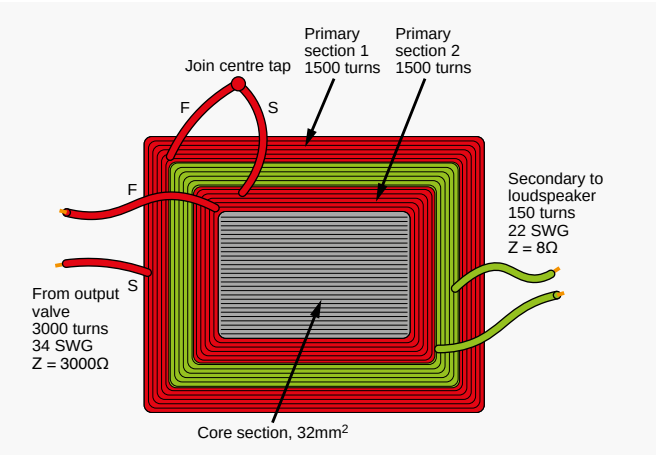
Problem rdzenia transformatora

Rdzeń transformatora audio ma konstrukcję zbliżoną do stosowanej w transformatorach sieciowych. Dla zminimalizowania prądów wirowych i związanych z tym strat, rdzeń transformatora wykonuje się z kształtek laminowanych blach transformatorowych. Problem w tym, że transformatory sieciowe pracują na częstotliwości 50 lub 60 Hz, tymczasem w sprzęcie elektroakustycznym zakres częstotliwości jest znacznie szerszy. Oczywista jest zasada, że czym cieńsze blachy tym lepiej. Mimo to, straty na prądy wirowe są bardziej dokuczliwe w zakresie wyższych częstotliwości. Kształtki blach rdzenia w transformatorach sieciowych mają standardowo grubość pół milimetra. Standard dla transformatorów audio to 0,35 mm. W calowych jednostkach miary, operuje się często jednostką milsa (jedna tysięczna cala, czyli 0,0254 mm). Tutaj standardem jest

Rysunek 28. Transformator CineMag zastosowany w mikrofonie pojemnościowym



Rysunek 27. Wnętrze policyjnego radia z rysunku 26; fragment ten pokazuje, iż pracuje tu stosunkowo dużej wielkości transformator ze szczeliną; dostarcza kilka wat mocy ze wzmacniacza klasy A wykonanego na germanowym tranzystorze widocznym również na tym zdjęciu; obciążeniem jest 5-cio calowy głośnik marki Celestion



Rysunek 29. Konfiguracja uzwojeń w transformatorze głośnikowym wzmacniacza lampowego

eprasa.pl 7d549de066

Rysunek 30. Wygląd zewnętrzny transformatora Sowter 5069; żółty przewód łączy zewnętrzną i wewnętrzną sekcję uzwojenia pierwotnego

15 milsów, czyli 0,38 mm. W droższych transformatorach audio stosuje się blachy o grubości 0,1 mm. Wykorzystanie rdzenia w transformatorach audio jest mniej efektywne. Przeważają względy minimalizacji zniekształceń nieliniowych, co wymusza ograniczenie gęstości strumienia magnetycznego z dala od poziomu nasycenia rdzenia. Tym samym gabaryty transformatora są większe, aniżeli mogłyby być, gdyby można było złagodzić te kryteria. Pożądane są materiały o dużej przenikalności magnetycznej, co pozwala zwiększyć indukcyjność przy zadanej liczbie zwojów. Ponadto materiał rdzenia musi być odpowiedni do pracy w szerokim zakresie częstotliwości. Istotnym kryterium jest minimalizacja pojemności międzyzwojowych, co pozwoli osiągnąć szerokie pasmo przenoszonych przez transformator częstotliwości. Rdzeń z materiału zwanego mumetalem osiąga aż dwudziestokrotnie większą przenikalność od standardowej stali krzemowej M6. Jednak, wykazuje szybszy poziom nasycenia (o około 1/4 względem M6 z FeSi). Jest zatem odpowiedni dla transformatorów o stosunkowo niewielkich mocach. Często właściwym wyborem jest materiał z 49-procentową zawartością niklu lub materiał zwany radiometalem. Takie rdzenie stanowią dobry kompromis między kosztami, zniekształceniami i mocą, które transformator oferuje. Takie rdzenie znajdziemy w transformatorach audio ze średniej półki cenowej, jak na przykład w serii VTX-A Vigortronixa.

Cenne informacje pozyskałem od (83-letniego już; w czasie pisania oryginalnego tekstu) specjalisty w tym zakresie – Briana Sowtera, który wciąż jest autorytetem i konsultantem w firmie Sowters Transformers. Dowiedziałem się od niego, iż np. w transformatorze Sowter 5069 stosowano równocześnie blachy transformatorowe z mumetalu i M6. Naprzemiennie wsuwane są kształtki blach z jednego i drugiego materiału. Uzyskano dzięki temu wymierną korzyść. Kiedy mumetal się nasyca, rolę koncentracji strumienia magnetycznego przejmują kształtki z M6, przez co udaje się uzyskać płynne przejście i liniową charakterystykę. Tę technologię nazwano Dolby mix. Dodatkowy stopień swobody w projektowaniu transformatora stanowi kształt blaszek rdzenia. W małych transformatorach najczęściej znajdziemy kształtki T i U. W szczególnych konstrukcjach, jak np. w transformatorach mikrofonowych znajdziemy kształtki oznaczone jako „Es". Poprzez dobór materiałów i kształtu blaszek transformatorowych, uzyskuje się zwykle pożądany kompromis między przenikalnością magnetyczną i poziomem gęstości strumienia magnetycznego skutkującego nasyceniem. Nietypową konstrukcję pokazano na **rysunku 28**. To mikrofonowy transformator firmy CineMag.

Widzimy tu jedynie kształtki typu U, bez zamknięcia magnetycznego. Wygląd transformatora sugeruje obecność szczeliny powietrznej w obwodzie magnetycznym. Jest to jednak błędne wrażenie, bo nie o to tu chodzi. Na rysunku tym widzimy także dwa uzwojenia ulokowane na rdzeniu symetrycznie. Taka konfiguracja ma na celu zapewnienie, aby indukowane zakłócenia w obu częściach uzwojenia miały przeciwne fazy. To skuteczna redukcja przydźwięku, co jest szczególnie ważne w przedwzmacniaczu mikrofonowym. Podobną technikę stosuje się w głowicach gitar elektrycznych.

Jest jeszcze problem ze skutecznym ściśnięciem blach transformatorowych rdzenia. W transformatorach sieciowych często wykonuje się to śrubami przepuszczonymi przez otwory przygotowane w blachach. W transformatorach audio unika się takiego rozwiązania, gdyż nieciągłości w obwodzie magnetycznym mogą powodować koncentrację strumienia i zwiększać zniekształcenia. Aby tego uniknąć, rdzenie są zazwyczaj zaciskane lub zalewane.

Bywają jednak szczególne przypadki, gdzie niewielkie zniekształcenia są pożądane. Tak jest np. we wzmacniaczach gitarowych, dla osiągnięcia specyficznego brzmienia tonu gitary.

Technika sekcjonowania uzwojeń

Najprostsza konfiguracja to dwa oddzielne uzwojenia na oddzielnych ramionach rdzenia. To bardzo popularna konfiguracja, która ma liczne zalety, ale w niektórych zastosowaniach ujawnia również istotne ograniczenia. Sprzężenie magnetyczne obu uzwojeń nigdy nie jest stuprocentowe. Strumień magnetyczny koncentruje się w rdzeniu, ale istnieje też pole rozproszone (o czym była już mowa w części omawiającej niedoskonałości

Rysunek 31. Częściowo rozcięte stare transformatory firmy Belclere; widoczne jest połączenie lutowane wykonane w celu uziemienia ekranu; zwróć także uwagę na kolor blach rdzenia wskazujący, że zawiera on 49% niklu

rzeczywistego transformatora). Taka konstrukcja w zastosowaniach audio wykazuje szczególnie duże ograniczenia w zakresie wysokich częstotliwości. Na **rysunku 29** pokazano jakie środki zaradcze można poczynić. Na rysunku tym pokazano przykład transformatora głośnikowego we wzmacniaczu lampowym. Dopasowanie impedancji warunkuje dużą liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego i stosunkowo małą w uzwojeniu wtórnym. Oba uzwojenia nawinięte są na tym samym ramieniu rdzenia i dodatkowo uzwojenie pierwotne podzielono na dwie sekcje. Na rysunku 29 pokazano, że najpierw nawinięto połowę uzwojenia pierwotnego, potem uzwojenie wtórne i następnie drugą połowę pierwotnego. Taka konstrukcja skutkuje niemal idealnym sprzężeniem magnetycznym. Nie jest natomiast pożądana w zasilaczach, gdy względy bezpieczeństwa wymagają dobrej separacji galwanicznej. Autor podaje, że w tym transformatorze uzyskano poprawę przenoszenia wysokich częstotliwości w okolicy 10 kHz o około 9 dB.

Na **rysunku 30** przedstawiono fotografię innego transformatora, na której po zewnętrznych połączeniach można zauważyć, w jaki sposób połączone są poszczególne sekcje.

Technikę dzielenia uzwojeń na sekcje można rozszerzyć na wiele sekcji. Na przykład, w 50-cio watowym transformatorze KT88 firmy Sowter dla wzmacniacza GEC, sekcji jest aż 14. To znacząco podnosi koszty, ale uzyskano pasmo przenoszenia aż do 40 kHz. Charakterystyka transformatora jest kluczowa, jeśli wzmacniacz pracuje z silnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. A takie rozwiązanie jest standardem, gdyż feedback jest panaceum na wiele bolączek. Charakterystyka częstotliwościowa transformatora powinna być płaska i wnosić niewielkie przesunięcie fazowe. W przeciwnym razie w układzie mogą wystąpić oscylacje.

Ogólnie rzecz biorąc, większe trudności (w zakresie charakterystyki częstotliwościowej) stanowią transformatory dużych

eprasa.pl 7d549de066

mocy, o dużej indukcyjności i dużej przekładni. O wiele trudniej jest uzyskać pożądaną charakterystykę w 20-to watowym transformatorze głośnikowym dla wzmacniacza lampowego dopasowującego impedancję 8 Ω do 4 Ω głośnika, aniżeli w 50 mW transformatorze międzystopniowym o impedancji wejścia i wyjścia na poziomie 600 Ω.

Problem izolacji między warstwami uzwojeń

Zwarcia międzyzwojowe oznaczają oczywiście uszkodzenie transformatora. Ale klasa izolacji podyktowana jest przede wszystkim względami bezpieczeństwa. Problem dotyczy zarówno transformatorów w zasilaczach jak i transformatorów głośnikowych w sprzęcie audio z nieizolowaną obudową. Nikt przecież nie chce napięcia 400 V na wyjściowym złączu wzmacniacza i na głośniku. Standardowa technika nakazuje owinięcie każdego uzwojenia taśmą poliestrową. Kiedyś stosowano papier impregnowany woskiem. W starych urządzeniach lampowych znajdziemy nawet tak zwane kondensatory papierowe. Miały one krótką żywotność z powodu zatrzymywania wilgoci i w konsekwencji upływu prądu. Charakterystyczną cechą są widoczne wycieki wosku, który się topił. Innym rozwiązaniem była specjalna impregnowana lakierem taśma z włókna szklanego o nazwie „Empire Cloth". Zdawała ona egzamin całkiem dobrze. Nazwa Empire jest nadal znana. Empire Tapes produkuje charakterystyczną żółtą taśmę, którą często widzimy we współczesnych transformatorach. Jest to cienka taśma klejąca o wysokim napięciu przebicia i odporna na wysoką temperaturę. Alternatywą jest taśma typu 56 ze znanej firmy 3M. W rozwiązaniach prototypowych niskonapięciowych transformatorów audio, autor tego opracowania stosował taśmę PTFE przeznaczoną dla instalacji gazowych. Nie ma ona tak dobrych własności izolacyjnych, ale jest dobra do „ściągania wszystkiego".

Technika uzwojeń bifilarnych

Technika bifilarna polega na równoczesnym nawijaniu uzwojeń pierwotnego i wtórnego za pomocą dwóch przewodów prowadzonych równolegle. Z oczywistych względów znajduje zastosowanie głównie w transformatorach o przekładni 1:1. Taki sposób nawijania sprawia, że obydwa uzwojenia zajmują niemal identyczną przestrzeń w obwodzie magnetycznym, co zapewnia bardzo silne sprzężenie magnetyczne. Rozwiązanie to nie jest jednak pozbawione wad. Najczęściej wskazywanymi ograniczeniami są wysoka pojemność międzyzwojowa oraz niskie napięcie przebicia izolacji. W niektórych aplikacjach, zwłaszcza niskonapięciowych, uzyskiwane parametry są jednak bardzo korzystne. Technikę bifilarną można rozszerzyć na nawijanie trój- lub czteroprzewodowe, gdy zachodzi potrzeba uzyskania większej liczby uzwojeń o bardzo silnym sprzężeniu magnetycznym. Takie rozwiązania stosowano między innymi w wysokiej klasy wzmacniaczach firm Ravensbrook i Ravensbourne.

W praktyce ręczne nawijanie bifilarne z dwóch oddzielnych przewodów może być trudne i czasochłonne. Dlatego stosuje się fabrycznie zespolone przewody wielożyłowe (multifilarne), przeznaczone do tego typu aplikacji. Warto dodać, że technika bifilarna nie ogranicza się jedynie do przypadków wymagających silnego sprzężenia między uzwojeniem pierwotnym a wtórnym. Stosuje się ją również w transformatorach sterujących (driverach) końcówek mocy wzmacniaczy audio, w których uzwojenia wtórne muszą być bardzo symetryczne. Przykładem są układy z wtórnym uzwojeniem z odczepem środkowym lub z dwoma izolowanymi uzwojeniami wtórnymi, stosowane do sterowania parą tranzystorów mocy jednego typu przewodnictwa — najczęściej germanowych tranzystorów PNP w starszych konstrukcjach klasy B.

Impregnacja uzwojeń

W dawnych czasach (w erze układów lampowych, do wczesnych lat 60.) stosowało się lakierowanie przewodów. Lakierowana izolacja na emaliowanym przewodzie uzwojenia była gorsza od jednolitej powłoki poliuretanowej stosowanej obecnie. Konieczne było zaizolowanie każdej warstwy uzwojenia papierem, a następnie zaimpregnowanie całości woskiem, aby transformator i urządzenie, w którym został zamontowany było odporne na wilgoć. Jednak, wosk topił się wskutek wzrostu temperatury i kapał na pobliskie elementy. W nowszych konstrukcjach wosk zastąpiono poliuretanem, który jest znacznie lepszy. Trudniej jednak rozmontować transformator, gdy wymaga on naprawy. Jeszcze trwalsza i sztywniejsza jest żywica epoksydowa. Przesadna sztywność może powodować pękanie przewodów wyprowadzeniowych, a przesadna trwałość uniemożliwia rozbiórkę transformatora i jego naprawę. Impregnaty są potrzebne dla redukcji dźwięku emitowanego przez transformator, podobnie jak solidne skręcenie lub ściśnięcie blach rdzenia. Działają jednak jak dielektryk przyczyniając się do wzrostu pojemności międzyzwojowych. Mimo tych zabiegów, często można dostrzec, że transformator brzęczy lub wydaje inne niezdefiniowane dźwięki. We wzmacniaczach lampowych zdarzało się, że wzmacniacz pozostawał słyszalny, mimo odłączenia głośnika.

Ekrany międzyuzwojeniowe

Stosowanie ekranów jest typowym zabiegiem walki z zakłóceniami. Zarówno po stronie emisji zakłóceń jak i indukowania ich w torze audio. Zasilacze impulsowe przez długi czas były omijane w sprzęcie audio głównie ze względu na generowane przez nie zakłócenia elektromagnetyczne. Ekrany umieszczone między uzwojeniami skutecznie ograniczają sprzężenia zakłóceń elektromagnetycznych (EMI). Ekranowanie transformatorów w stopniach wejściowych torów elektroakustycznych ogranicza zakłócenia indukowane przez rozproszone pole elektromagnetyczne.

Ekran między uzwojeniami wykonuje się zwykle jako jeden zwój folii miedzianej. Trzeba zadbać, aby nie powstał zwój zwarty, dlatego folia miedziana musi być zaizolowana przynajmniej z jednej strony (można wykorzystać tą samą folię izolacyjną, którą izoluje się warstwy uzwojeń). Ekran powinien być uziemiony (podłączony do masy), ponieważ w przeciwnym razie nie tylko nie spełni swojej funkcji, ale dodatkowo zwiększy pojemność międzyuzwojeniową. Tego typu ekranowanie nazywane jest często ekranem Faradaya. W transformatorach wyjściowych ekranowanie nie jest zazwyczaj konieczne. Jeśli jednak zostanie zastosowane, ekran należy uziemić lub połączyć z masą odniesienia, o ile galwaniczną izolację całego układu zapewnia zasilacz. Jest to szczególnie ważne, jeśli urządzenie jest sterowane ze źródła nieizolowanego. Na **rysunku 31** pokazano zdjęcie rozciętego transformatora, gdzie widać ekran pod uzwojeniem pierwotnym. Ekran ten jest także połączony z rdzeniem w transformatorze. W ferworze rozmontowywania, autor rozebrał na części pierwsze transformator międzystopniowy firmy Greenweld, gdzie widać dużą ilość cienkiego drutu (**rysunek 32**). Transformator ten miał 1770 zwojów w uzwojeniu pierwotnym i 330 we wtórnym, co odpowiada przekładni 5:1. W praktyce uzyskana wartość była nieco niższa, co wynika z nieuniknionych strat.

Zastosowanie ekranu wprowadza jednak pewną pojemność względem uzwojenia pierwotnego. Może to skutkować niestabilnością pracy wzmacniacza. Aby temu zaradzić, zaleca się umieszczenie rezystora (typowo 39 Ω) w obwodzie uziemienia ekranu. Jeśli jedyną dostępną masą jest masa sygnałowa, tu należy podłączyć ten rezystor. Jeśli obudowa urządzenia połączona jest z bolcem uziemiającym

eprasa.pl 7d549de066

Rysunek 32. Rozebrany międzystopniowy transformator Greenweld X7920 ujawnia dużą ilość cienkiego drutu nawojowego, nylonowy karkas oraz blachy transformatorowe rdzenia

Rysunek 33. Przedwzmacniacz mikrofonowy będący negatywnym przykładem w zakresie skuteczności ekranowania transformatorów wejściowych; ekrany z cienkiej blachy stalowej nie chronią skutecznie przed zewnętrznym zakłócającym polem magnetycznym

sieci energetycznej, ekran transformatora należy połączyć z tym potencjałem.

Zastosowanie rezystora w celu izolacji pojemności wejścia wzmacniacza względem ekranu jest rozwiązaniem kompromisowym. Lepiej, aby był to dwójnik LR. W sprzedaży dostępny jest taki dwójnik jako jeden element (występuje np. w ofercie firmy Jensen pod numerem JT-OLI-3). Jest to cewka owinięta na rezystorze. Rezystor węglowy o nominale 39 Ω, 1 W (15 mm długości i 5,5 mm średnicy), na którym nawinięto 40 zwojów cienkiego drutu 30 AWG). Taka cewka stanowi indukcyjność około 3,7 μH. Czasem jest to wartość niewystarczająca i Autor zaleca dołożenie oddzielnej cewki o wartości 10 do 82 μH.

Puszki ekranujące

W przypadku transformatorów na wejściu wzmacniacza (lub przedwzmacniacza) uzwojenia mogą działać jak anteny odbiorcze. Zbierane i wzmocnione zakłócenia powodują wówczas przydźwięk. Rozwiązaniem jest ekranowanie całego transformatora przez zamknięcie go w metalowej puszce. W tym celu zwykła stal nie sprawdza się najlepiej. Najlepszym materiałem okazuje się mumetal. Skuteczne ekranowanie nie jest zadaniem łatwym. Trzeba także unikać pętli masy podczas podłączania ekranu do masy. Na **rysunku 33** pokazano zdjęcie przedwzmacniacza mikrofonowego, który jest przykładem niedoróbek w tym zakresie. Jest to chińska podróbka markowego brytyjskiego sprzętu, w którym występuje przydźwięk z powodu nieskutecznego ekranowania i istnienia pętli masy na płycie PCB. W urządzeniu tym, prawdopodobnie z chęci ograniczenia kosztów, puszki ekranujące wykonano ze zwykłej stali. W konsekwencji przydźwięk może być szczególnie dokuczliwy, gdy przedwzmacniacz znajduje się w jednej obudowie z innymi urządzeniami generującymi zakłócenia elektromagnetyczne.

Czasem nie jest konieczne stosowanie szczelnych puszek ekranujących, a jedynie obwiednia z taśmy miedzianej obejmującej cały rdzeń transformatora. Tego rodzaju ekranowanie spotykamy często w transformatorach sieciowych w celu ograniczenia rozpraszania pola magnetycznego. Z kolei w wysokiej klasy transformatorach wejściowych, stosowanych w markowych urządzeniach audio, można znaleźć kilka warstw materiału ekranującego.

Puszkę ekranującą można wykonać we własnym zakresie, jednak w ofercie wielu producentów znajdują się również gotowe produkty katalogowe. Dobry przykład pokazano na **rysunku 34**. Występuje w ofercie firmy Vigortronix pod numerem VTX-102-000. To puszka o wymiarach 30 mm długości, 25,5 mm szerokości i głębokości, która wynosi 23,75 mm. Okazuje się, że jest ona bardzo ciasna dla standardowego rozmiaru transformatorów wejściowych. Pewne trudności sprawia już samo osadzenie transformatora, a jeszcze większe pojawiają się w przypadku konieczności jego demontażu. Ułatwieniem może być użycie niewielkiej ilości smaru silikonowego. Wciskając transformator nie należy uderzać w puszkę. Zaleca się jego powolne wciskanie z użyciem imadła. Takie środki ostrożności są konieczne w przypadku mumetalu, ponieważ zginanie lub uderzanie wyżarzonego materiału powoduje spadek jego przenikalności magnetycznej. Przywrócenie pierwotnych właściwości jest możliwe, ale trudne do przeprowadzenia w warunkach amatorskich. Procedura ponownego wyżarzania wymaga nagrzania do temperatury 1150°C na czas około czterech godzin oraz powolnego chłodzenia z szybkością około 250°C na godzinę.

Umieszczenie transformatora w puszce ekranującej to nie wszystko. Puszka musi być uziemiona (lub podłączona do masy układu). Jak to poprawnie zrobić pokazują **rysunki 35** i **36**. Zaznaczony na rysunku 35 pin połączony jest w transformatorze z ekranem międzyuzwojeniowym i z rdzeniem transformatora, i w tym miejscu pin ten należy zlutować z podstawą puszki. Czynność tą, jak również zlutowanie górnej części puszki z jej podstawą trzeba wykonać przed montażem całości na płytce PCB. Firma Vigortronix jest producentem transformatorów jak i komponentów takich jak ekrany. Taki komplet (transformator wraz z puszką ekranującą) jest najlepszym rozwiązaniem, jeśli zachodzi potrzeba skutecznego ekranowania. Na przykład transformator o numerze VTX-101-003 występuje również w wersji VTX-102-003, wyposażonej fabrycznie w puszkę ekranującą.

W kolejnym odcinku

Na tym kończymy część trzecią. W przyszłym miesiącu zaprezentujemy kompletne informacje na temat pozyskiwania transformatorów audio, a także bardzo przydatny zestaw dwóch płytek PCB do montażu transformatorów marki Vigortronix. ■

Jake Rothman

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

Rysunek 34. Puszka ekranująca dla transformatorów serii VTX-A firmy Vigortronix

Rysunek 35. Zdjęcie pokazuje pin uziemiający transformatora, który należy zlutować z podstawą puszki ekranującej

Rysunek 36. Górna część ekranu także musi być (na krótko) zwarta z podstawą i uziemieniem

eprasa.pl 7d549de066

Ekscytacje Maxa

Migające diody LED i śliniący się inżynierowie (23)

O rety! Nie do wiary, ale znów jest Gwiazdka. Nie wiem, jak to będzie – brak mi przygotowanego przemówienia i nie mam się w co ubrać... Jednym z problemów jest to, że jest tak wiele fajnych rzeczy do zrobienia, ale tak mało czasu, aby je wszystkie zrobić. Problemem pokrewnym jest to, że robię tyle fajnych rzeczy, iż mój biedny stary mózg jest zapchany „różnościami" – na przykład...

Transformacje toroidalne

Z powodów, które wyjaśnię w odpowiednim czasie, rozmyślam nad matematyką związaną z tematem torusa, zwanego też (co prawda rzadko) „pączkiem z dziurką". Ale pełnowymiarowy torus to dopiero przyszłość. Zanim do niego dojdziemy, najpierw wyobraźmy sobie, że wycięliśmy z papieru pasek. Nazwijmy narożniki na jednym końcu paska A i C, a odpowiadające im narożniki na drugim końcu A' i C'. Teraz zaginamy pasek tak, aby utworzył okrąg (**rysunek 1a**). Jeśli połączymy dwa końce „jeden do jednego", bez skręcania paska, tak że narożnik A' jest połączony z A, a narożnik C' – z C, to otrzymamy zwykły pierścień, który ma dwie krawędzie (na rysunku: górną i dolną) oraz dwa boki (zewnętrzny i wewnętrzny).

A teraz zobaczmy, co się stanie, jeśli przed połączeniem obu końców paska jeden z nich zostanie przekręcony o pół obrotu (180°). Narożnik A' zostanie połączony z C, a C' z A. Utworzyliśmy wstęgę Möbiusa (zwaną też „pętlą Möbiusa"), który ma tylko jedną krawędź i jeden bok (A → A' → C → C' → A). Tę figurę na pewno widzieliście już wcześniej, a jeśli nie, to może spróbujcie zrobić ją samemu – po prostu, żeby się przekonać.

Gdybyśmy przed połączeniem obu końców wykonali pełny skręt (360°), to znów otrzymamy dwa boki i dwie krawędzie. I tak dalej – skręty 0, 1, 2, 3... dają dwa boki i dwie krawędzie, podczas gdy skręty ½, 1½, 2½, 3½... dają jeden bok i jedną krawędź.

Jak dotąd wszystko idzie dobrze. Załóżmy teraz, że dodajemy coś, co można nazwać „paskiem poprzecznym" (**rysunek 1b**). W tym przypadku narożniki na jednym końcu możemy nazwać A, B, C i D, a odpowiadające im narożniki na drugim końcu A', B', C' i D'. Ponownie zacznijmy od wygięcia naszego paska w celu utworzenia kółka i połączenia dwóch końców „jeden do jednego" bez skręcania paska w taki sposób, że A' jest połączony z A, B' jest połączony z B, C' jest połączony z C, a D' jest połączony z D. W tym przypadku otrzymujemy cztery krawędzie (A → A', B → B', C → C' i D → D') i cztery boki (obie strony płaszczyzny ograniczonej przez A, C, C', A i obie strony płaszczyzny ograniczonej przez B, D, D', B).

A teraz pytania. Zacznijmy od prostego: ile krawędzi i boków będziemy mieli, jeśli jeden koniec paska zostanie skręcony **całkowicie** (360°) przed połączeniem dwóch końców (A' będzie nadal połączone z A, B' z B, C' z C i D' z D)? Pytanie drugie – trudniejsze, ale tylko trochę: ile krawędzi i boków będziemy mieć, jeśli przed połączeniem końców jeden z nich zostanie skręcony w **połowie** (180°) – czyli A' będzie połączone z C, B' z D, C' z A, a D' z B? Pytanie trzecie (przyprawiające już o ból głowy): ile krawędzi i boków będziemy mieć, jeśli przed połączeniem jeden koniec skręcimy o **ćwierć obrotu** (90°) (A' do B, B' do C, C' do D, a D' do A)?

Odpowiedzi znajdziecie na końcu artykułu.

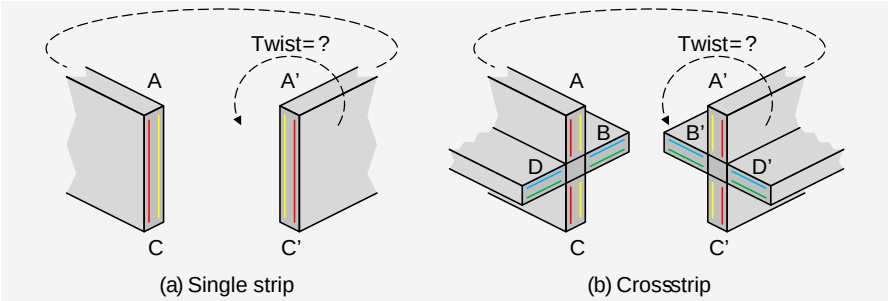
Elektronika, która działa

Tak bez związku z czymkolwiek – gdy piszę te słowa, mój kumpel Steve Leibson opublikował właśnie recenzję całkiem interesującej książki zatytułowanej Designing Electronics that Work (Projektowanie elektroniki, która działa) autorstwa Huntera Scotta – patrz https://bit.ly/3qk3qBq. Darzę Steve'a dużym szacunkiem, więc jeśli on mówi, że ta książka jest warta przeczytania, to ja mu wierzę. Steve posuwa się nawet tak daleko, że mówi: „Wersja PDF tej książki jest bezpłatna. A więc – czy jesteś hobbystą, czy początkującym inżynierem, czy też weteranem, który wie pod jakim kątem trzymać język podczas dostrajania układów elektronicznych – egzemplarz tej książki powinieneś ściągnąć sobie jeszcze dziś".

Lutownica gazowa

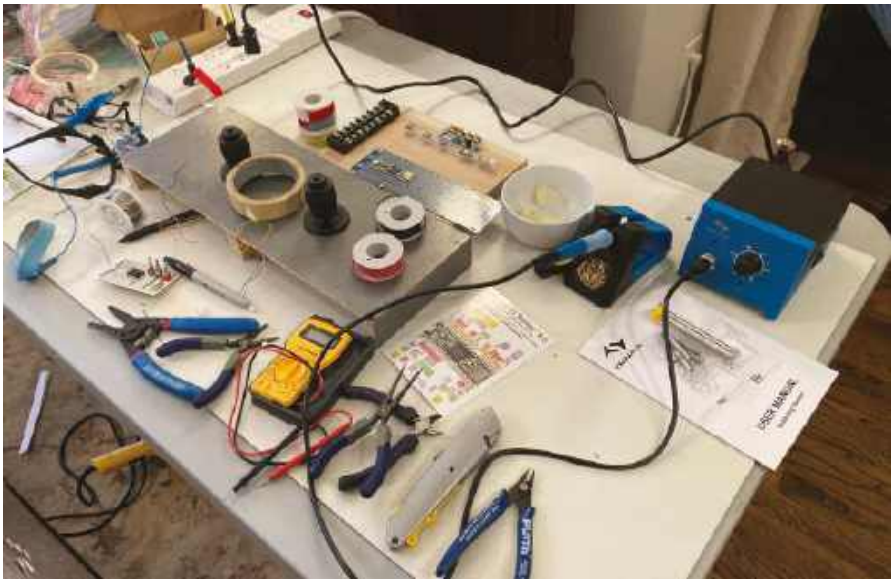
Czy kiedykolwiek słyszeliście o lutownicy gazowej? Zauważcie, że nie powiedziałem „zasilanej gazem", co mogłoby przywołać obraz wspaniałego urządzenia steampunkowego. Rzecz, o której mówię, to moja pierwsza lutownica. Była to stalowa rurka, na jednym końcu przechodząca w czubek. Drugi koniec był połączony z drewnianą rączką, trzymaną przez użytkownika (w moim przypadku nie mającego większego pojęcia, co robi). Było to około 1969 roku. Miałem wtedy 12 lat.

Nie mam pojęcia, skąd pochodziła ta lutownica ani kto mi ją dał. Myślę, że oryginalnie była przeznaczona do lutowania metali, a nie elektroniki. Nie dysponowałem jednak inną i byłem szczęśliwy, że ją mam. Podgrzewałem tę lutownicę nad największą fajerką naszej kuchenki gazowej w kuchni, aż rozżarzała się do czerwoności. Następnie biegłem po schodach do mojego pokoju i starałem się zlutować jak najwięcej połączeń, zanim lutownica nie ostygnie. Było to świetne ćwiczenie – zarówno fizyczne (bieganie po schodach w górę i w dół), jak i umysłowe (próba zrozumienia,



Rysunek 1. Zwykły pasek papieru – bardziej skomplikowany niż się wydaje!

eprasa.pl 7d549de066



Rysunek 2. Rozpoczynam pracę nad nową głową robota ze stacją lutowniczą Tilswall (prawy górny róg)

dlaczego mój układ, pełen zimnych lutów, nie działa).

Kiedy w końcu udało mi się zebrać wystarczająco dużo kieszonkowego na zakup lutownicy elektrycznej, zdecydowałem się na niedrogi model zasilany z sieci, wyposażony w małą metalową podstawkę zapewniającą należyty odstęp gorącego końca lutownicy od powierzchni roboczej – w moim przypadku podłogi.

Z wyjątkiem krótkiej przygody ze stacją lutowniczą – przygody, która zakończyła się, kiedy stacja ta spadła na podłogę, w wyniku czego nadawała się już tylko na przycisk do papieru – byłem zawsze wierny lutownicom sieciowym. Zmieniło się to dosłownie kilka dni temu. Mili ludzie z firmy Tilswall natknęli się na mój blog Cool Beans (https://bit.ly/2ZY4waZ) i wysłali mi e-mail z pytaniem, czy chciałbym dostać jedną z ich stacji lutowniczych (https://bit.ly/3BuhbiW) do wykorzystania w moich projektach hobbystycznych. Złapali mnie w odpowiednim momencie, ponieważ – jak wspomniałem w innym artykule („Practical Electronics", grudzień 2021 oraz EdW, lipiec 2025) – przygotowywałem się akurat do rozpoczęcia prac nad nową głową robota z serwomechanizmami i odpowiednim systemem sterowania. Po kilku dniach dotarła do mnie nowiutka stacja lutownicza Tilswall i mogłem zabrać się do pracy (**rysunek 2**).

Rysunek 3. „Lampion głupka" (źródło zdjęcia: Bad Dog Designs)

Używam tego cacuszka dopiero od kilku dni, ale muszę powiedzieć, że jestem pod wielkim wrażeniem. Stacja ta, zabezpieczona antystatycznie (ESD), jest świetnym urządzeniem, oferującym moim zdaniem niesamowitą jakość w stosunku do ceny. W zestawie znajduje się pięć różnych grotów oraz rolka cyny bezołowiowej. Aczkolwiek, jeśli mam być szczery, to będę nadal używał mojego wypróbowanego lutowia srebrno-ołowiowego 63:37. Jak to mówią: „stara miłość nie rdzewieje"...

Wracamy do lat siedemdziesiątych

Chciałbym zaznaczyć, że pamiętam lata 70. jakby to było wczoraj, chociaż od tego czasu wiele misiów-patysiów przepłynęło pod mostem... To, co pamiętam, to mnogość odjazdowych czcionek tekstowych i psychodelicznych schematów kolorystycznych. W tamtych czasach jednym z wielkich efektów świetlnych, które rzucały się w oczy na dyskotekach, były „koła olejowe". Właśnie znalazłem filmik na stronie Funky Parrot (https://bit.ly/3qidtHe), na którym widać zestaw sześciocalowych „kół olejowych" do oświetlenia dyskotekowego z lat 70. Film niemal dosłownie przeniósł mnie w czasie (https://bit.ly/3qkNgYr).

Rzecz w tym, że – już kilka razy w ciągu ostatnich kilku lat – widziałem na trójkolorowych matrycach diod LED wirujące efekty, które przypominały mi te stare „koła olejowe". Za każdym razem, gdy coś takiego widziałem, myślałem „chciałbym coś takiego zrobić", ale nie wiedziałem, od czego zacząć. I wtedy, gdy najmniej się tego spodziewałem, mój kolega Paul Parry, właściciel firmy Bad Dog Designs (https://bit.ly/3BWMjb9), wysłał mi e-mail z linkiem do filmu na YouTube (https://bit.ly/3H6GMCv) przedstawiającego jedną z jego najnowszych kreacji, którą nazwał Fool's Lantern („lampion głupka"; przypis redaktora). Linkowi towarzyszyła wiadomość o treści: „zrobiłem to w tym tygodniu i pomyślałem, że spodoba Ci się z różnych względów". Zasadniczo jest to jeden ze słynnych zegarów lampowych Nixie Paula, umieszczony w zabytkowej drewnianej szafce i uzupełniony matrycą 16×16 trójkolorowych diod LED WS2812B (**rysunek 3**).

Na filmiku widać wiele różnych efektów świetlnych, ale jeden przykuł moją uwagę – efekt wirującego koła olejowego, który w filmie zaczyna się około 1:00. Kiedy zapytałem Paula o niego, odpowiedział „program jest dość prosty i działa całkiem dobrze na zwykłym Arduino Nano. Jeśli na GitHubie poszukasz biblioteki FastLED, znajdziesz tam przykład o nazwie »Noise«, który objaśnia działanie tego efektu znacznie lepiej niż ja mógłbym to zrobić. Skopiowałem sobie ten kod i usunąłem fragmenty, których nie potrzebowałem. Istnieje tam kilka zmiennych, którymi można ustawić prędkość i poziom głębokości. Ja, aby w czasie rzeczywistym zmieniać skalę efektu, użyłem zwykłego potencjometru dołączonego do wejścia analogowego".

Przy tej okazji przypomniałem sobie o mojej tablicy piłeczek pingpongowych 12×12, w której każda piłka zawiera trójkolorowy LED. Niejasno przypominam sobie, że wtrącałem ten temat w kilku moich artykułach (Practical Electronics, czerwiec 2020 – styczeń 2021 oraz kwiecień 2021 – lipiec 2021, odpowiednio EdW styczeń 2024 – sierpień 2024 oraz listopad 2024 – luty 2025). Chodzi o to, że jak tylko znajdę wolną chwilę, pobiorę program przykładowy, o którym mówił Paul, i przystosuję go do działania na moim wyświetlaczu z piłeczek pingpongowych. Oczywiście zdam z tego relację w jednym z przyszłych artykułów.

eprasa.pl 7d549de066

Rysunek 4. Wasz niżej podpisany z zapasem miedzianego oplotu, który w licznych projektach ochroni okablowanie przed wyładowaniami elektrostatycznymi

Rysunek 5. Joystick czteroosiowy JH-D400X-R4 10K

Chwile, w których można się czegoś nauczyć

Jeśli masz już pewną wprawę w konstruowaniu elektronicznych gadżetów, to możesz przeskoczyć niniejszy temat. Dostaję jednak wiele e-maili od Czytelników, którzy dopiero rozpoczynają swoją przygodę z elektroniką. Gdy zaczynałem pracę nad moją nową głowicą robota, wynotowałem kilka uwag, które mogą zainteresować początkujących.

Zacznijmy od pojęcia elektryczności statycznej. Kiedy przemieszczamy się lub ocieramy się o coś, z jednego obiektu na drugi mogą być przenoszone elektrony, pozostawiając jedną ze stron z nadmiarem ładunku dodatniego, a drugą z nadmiarem ujemnego. Nazywamy to „elektrycznością statyczną". Jeśli taki ładunek zgromadzimy, a następnie przybliżymy obiekt do przewodnika połączonego z Ziemią, to skutkiem będzie wyładowanie elektrostatyczne (ESD). Może mieć ono postać fascynującej iskry. Jeśli ścieżka przepływu ładunku przechodzi przez wyprowadzenie przyrządu półprzewodnikowego, np. diody, LED-a, tranzystora czy układu scalonego, to – podobnie jak w skeczu Monty Pythona z martwą papugą – może się okazać, że ten element przestanie już być przyrządem półprzewodnikowym, a po naszych policzkach popłyną łzy...

Aby takiego niebezpieczeństwa nie było, musimy się upewnić, zanim czegokolwiek dotkniemy, że wszystko – elementy elektroniczne, narzędzia (np. lutownica), a także my sami – ma ten sam potencjał elektryczny. Przypomnę, że wcześniej opisywałem stację lutowniczą Tilswall jako antystatyczną i bezpieczną pod względem ESD. Teraz już wiecie, dlaczego jest to taki ważny atrybut stacji lutowniczej.

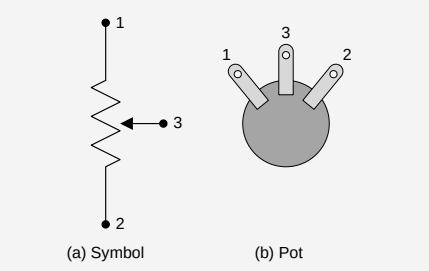
Popatrzcie raz jeszcze na rysunek 2. Przedstawia on rozkładany stół, który do pracy ustawiam w rogu naszego salonu. Moja żona (Gina Wspaniała) pozwala mi na to z niekłamaną radością, pod warunkiem, że do końca dnia wszystko zostanie uprzątnięte. Tak bardzo chciałbym mieć swój własny warsztat... Jest kilka rzeczy, które na tym zdjęciu warto zauważyć. Zacznijmy od maty antystatycznej pokrywającej stół. Mata jest uziemiona do listwy zasilającej poprzez żółtą wtyczkę bananową. Uziemiona niebieską wtyczką bananową do listwy jest również antystatyczna opaska na nadgarstek (na środku po lewej stronie zdjęcia). Zwróćcie teraz uwagę na małą płytkę prototypową z 18-pinową podstawką na układ scalony i trzema przełącznikami – obok niebieskich cążek do ściągania izolacji. Używanie podstawek do układów scalonych jest zalecane z dwóch powodów. Po pierwsze, pozwala nam łatwo wymienić krzemowe kostki, jeśli zostaną uszkodzone z jakiegokolwiek powodu – na przykład właśnie przebite elektrycznością statyczną... Po drugie, pozwolą nam łatwo potwierdzić, że linie zasilania i masy są dołączone do właściwych pinów, zanim eksplozja układu scalonego nie przekona nas, że jednak nie były...

Nawet jeśli działamy z płytką, na której nie ma jeszcze układów scalonych ani innych elementów półprzewodnikowych, dobrą zasadą jest pracować zawsze na macie antystatycznej i nosić antystatyczną opaskę na nadgarstku. Jeśli będziecie tak robić zawsze i stanie się to Waszą „drugą naturą", zaoszczędzicie sobie w przyszłości wiele zmartwień. Zaufajcie mi, bo wiem, co mówię. Jest takie stare powiedzenie: „doświadczenie chroni przed popełnianiem błędów, ale to popełnianie błędów daje doświadczenie". A prawdziwą sztuką jest uczenie się na błędach cudzych.

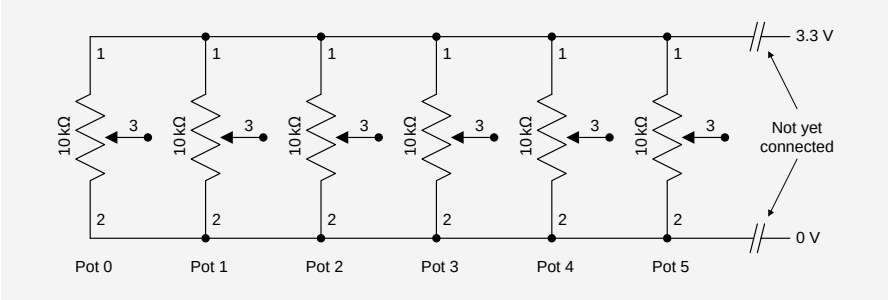
Tak na marginesie – gdy w ramach hobby buduję jakiś większy projekt, na przykład mój Silnik Prognozujący („Practical Electronics" z marca 2020 roku oraz EdW z października 2023 roku), to, jeśli tylko się da, osłaniam moje kable miedzianym oplotem, którego końce są dołączone do uziemienia. Przewlekam wiązkę przewodów przez oplot, a następnie ściągam jego końce, przez co kurczy się on i ciasno obejmuje przewody. Problem w tym, że taki oplot jest horrendalnie drogi. Ale w moim przypadku było tak, że mój kumpel Rick Curl pracował kiedyś w firmie, w której zdejmowano taki oplot z dużych kabli zasilających i – co niewiarygodne – wyrzucano go, ponieważ potrzebowano tam tylko izolowanych żył z wnętrza kabla. W rezultacie kilka lat temu Rick podarował mi dożywotni zapas oplotów (**rysunek 4**).

Kiedy pierwszy raz uruchamiacie jakąś płytkę, to przed włożeniem jakichkolwiek układów scalonych i podłączeniem zasilania sprawdźcie multimetrem, czy wszystko jest w porządku. To znaczy: czy wszystkie elementy, które mają być podłączone do masy, są rzeczywiście podłączone do masy; czy wszystkie elementy, które mają być podłączone do zasilania, są rzeczywiście podłączone do zasilania, oraz – co najważniejsze – czy zasilanie i masa nie są ze sobą zwarte. Następnie, jeszcze bez układów scalonych włożonych do podstawek, podłączcie do płytki zasilanie. Bądźcie jednak gotowi do natychmiastowego wyłączenia go,

eprasa.pl 7d549de066



Rysunek 6. (a) Symbol potencjometru, (b) widok potencjometru z tyłu



Rysunek 7. Sześć potencjometrów 10 kΩ połączonych równolegle

jeśli usłyszycie dziwne dźwięki, zobaczycie dym lub poczujecie charakterystyczny zapach palącej się elektroniki. Z tymi wszystkimi zjawiskami miałem przez lata sporo do czynienia. Jeśli dziwne zjawiska nie występują, to nadszedł idealny moment na ponowne sprawdzenie – według kart katalogowych układów scalonych – czy piny zasilania i masy znajdują się tam, gdzie powinny, oraz na zmierzenie multimetrem, czy piny te są na płytce prawidłowo podłączone. Dopiero teraz można wyłączyć zasilanie płytki, włożyć układy scalone, ponownie załączyć zasilanie i znów sprawdzić, czy wszystko jest w porządku.

Poczuj radość!

Powrócę jeszcze raz do rysunku 2. Zwróćcie uwagę na szarą podstawę drewnianą w środku zdjęcia. Dwa czarne elementy to czteroosiowe joysticki JH-D400X-R4 10K, które można kupić niemal wszędzie, np. na Amazonie czy eBay-u (**rysunek 5**). Niestety, zazwyczaj są one dostarczane bez dokumentacji, co początkującym na dostarcza niezapomnianych wrażeń... Zanim wyrzucicie opakowanie, w którym dostarczono joystick, poszukajcie torebeczki zawierającej cztery małe śrubki mocujące. Znalezienie pasujących odpowiedników będzie uciążliwe. Po raz kolejny mówię z doświadczenia.

Twardy pierścień plastikowy z czterema otworami można zdjąć. Mniej oczywisty jest fakt, że miękką wewnętrzną plastikową osłonę z pofałdowaniami można przesunąć w górę joysticka w kierunku gałki (może być ciasno, ale się przesunie). Odsłania to cztery małe otwory w rogach obudowy, przez które można przymocować joystick do konsoli (w moim przypadku do szarej podstawy). Wiercimy w konsoli otwór o średnicy około 4 cm otoczony czterema małymi otworami na śruby. Jako szablonu używamy pierścienia plastikowego. Przeciskamy gałkę joysticka przez duży otwór od dołu w górę, jednocześnie ściskając miękką plastikową osłonę tak, aby również przeszła przez otwór i znalazła się w górnej części konsoli. Unosimy joystick, dociskając go do dolnej części konsoli, zsuwamy miękką plastikową osłonę w dół, aż spocznie na górnej części konsoli, umieszczamy na górze plastikowy pierścień i przykręcamy go czterema małymi śrubkami.

Są to joysticki rzekomo czteroosiowe. Tak naprawdę są jednak tylko trójosiowe. Składają się z trzech potencjometrów liniowych 10 kΩ i przycisku normalnie otwartego (NO) na górze. Producent używa chyba jakiejś licencji literackiej, by nas przekonać, że przycisk reprezentuje czwartą oś sterowania.

Przypomnijmy, że potencjometr ma trzy końcówki, z których dwie są podłączone do końców ścieżki rezystancyjnej (w tym przypadku o rezystancji 10 kΩ), a trzeci do ruchomego ślizgacza (**rysunek 6a**).

Potencjometr może być używany jako reostat (zmienny rezystor) lub jako dzielnik napięcia. Potencjometrów w joysticku będziemy używać jako dzielników napięcia. Oznacza to, że podłączymy zasilanie do zacisku (1), a masę (0 V) do zacisku (2). Lub odwrotnie – nie ma to znaczenia, ponieważ odczytaną wartość napięcia możemy zawsze skorygować w programie. Zasilanie będzie wynosić 3,3 V lub 5,0 V w zależności od rodzaju mikrokontrolera, który stosujemy. Jeśli będzie to np. Arduino Uno, zasilany napięciem 5 V, z wejściami obsługującymi napięcia od 0 do 5 V, wówczas dla potencjometrów użyjemy zasilania 5 V. Ja używam Teensy 3.6, który jest co prawda zasilany z 5 V, ale którego wejścia tolerują tylko od 0 do 3,3 V. Dla potencjometrów używam zatem zasilania 3,3 V ze stabilizatora na płytce Teensy 3.6. Potencjometry, które na rysunek 5 widzimy z dwóch stron joysticka, reagują na ruchy joysticka do przodu/tyłu i w lewo/prawo. Trzeci potencjometr, ukryty w środku, reaguje na przekręcanie drążka zgodnie lub przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Gdy zdejmiemy rękę z drążka, powraca on do pozycji środkowej, co dotyczy wszystkich trzech potencjometrów.

Do potencjometrów przód/tył i lewo/prawo musimy przylutować własne przewody. Trzeci (wewnętrzny) potencjometr jest dołączony do wiązki pięciu przewodów wychodzących z podstawy joysticka. Dwa z nich, podłączone do przycisku, są tego samego koloru. U mnie są żółte, ale na przykład w joystickach zakupionych w Wielkiej Brytanii przez mojego wspólnika Steve'a Manleya są niebieskie. Wszystko, co trzeba z nimi zrobić, to podłączyć jeden z nich do masy, a drugi do wejścia mikrokontrolera. W moim przypadku będzie jeszcze użyty specjalny układ scalony do debouncingu przełączników (odfiltrowywania drgań styków; przypis redaktora), ale o tym opowiem więcej w przyszłym odcinku. Jeśli przewód przełącznika podłączamy bezpośrednio do wejścia mikrokontrolera, musimy albo dać zewnętrzny rezystor podciągający około 10 kΩ albo zadeklarować w programie to wejście jako INPUT_PULLUP – zakładając, że używamy zintegrowanego środowiska programistycznego Arduino (IDE).

Pozostałe trzy przewody są dołączone do wewnętrznego potencjometru. Ich kolory również mogą być różne w zależności od pochodzenia joysticka. W moim przypadku były to przewody biały, czarny i czerwony. Moim odruchowym założeniem było, że do ślizgacza jest dołączony przewód biały, ale okazało się, że jednak czarny. Cieszę się, że to sprawdziłem. A skoro już mowa o sprawdzaniu...

Testować, testować i jeszcze raz testować

Zwróćmy uwagę, że mamy teraz sześć potencjometrów, z których każdy powinien mieć rezystancję 10 kΩ. Jeśli przyjmujecie mantrę „nie ufaj niczemu, wszystko sprawdzaj", to Wasze życie będzie rozjaśniał blask mojego uśmiechu. Główna kwestia, na którą należy zwrócić uwagę, jest taka: o wiele łatwiej jest przetestować potencjometry oddzielnie niż po dołączeniu ich do układu.

Na rysunku 6b pokazano, że zacisk ślizgacza jest umieszczony pośrodku. Tak będzie w przypadku ponad 99% potencjometrów, z którymi się zetkniecie. Możliwe jest jednak napotkanie innych konfiguracji.

eprasa.pl 7d549de066

Oto jak ja to sprawdziłem. W każdym potencjometrze zmierzyłem moim zaufanym multimetrem rezystancję między zaciskami 1 i 2, aby dopilnować, by jej wartość rzeczywiście wynosiła mniej więcej 10 kΩ. Wiedząc, że w przypadku tego joysticka drążek automatycznie powraca do pozycji środkowej, w każdym potencjometrze sprawdziłem, czy rezystancja między zaciskami 1 i 3 wynosi około 5 kΩ; podobnie między zaciskami 2 i 3. Na koniec zmierzyłem, czy rezystancja między zaciskami 1 i 3 zmienia się między 0 a 10 kΩ, gdy joystick jest popychany lub obracany do oporu. Podobny test przeprowadziłem dla zacisków 2 i 3.

Może się Wam wydawać, że przesadzam z tym sprawdzaniem, ale – powtarzam – o wiele łatwiej jest zaobserwować i zidentyfikować problemy, gdy potencjometry są osobno, niż gdy są już ze sobą połączone.

Skoro mowa o łączeniu potencjometrów – połączymy teraz ze sobą jedną stronę wszystkich potencjometrów (nazwiemy ją „zaciskiem 1"). W odpowiednim czasie podłączymy ten zacisk do zasilacza. Podobnie połączymy drugą stronę wszystkich potencjometrów („zacisk 2"). Tę stronę podłączymy w odpowiednim momencie do masy. W rezultacie sześć naszych potencjometrów będzie połączonych równolegle (**rysunek 7**). Pamiętajcie, że ja używam Teensy 3.6, więc zasilanie oznaczyłem jako 3,3 V, ale w Waszym przypadku może to być 5 V. Na tym etapie nie ma to jednak znaczenia, ponieważ nie podłączyliśmy jeszcze naszych potencjometrów do zasilania. Ponadto nie dołączyliśmy jeszcze ich ślizgaczy do analogowych pinów wejściowych mikrokontrolera.

Gdybyśmy teraz ustawili multimetr na pomiar rezystancji i podłączyli jedną jego sondę do „zacisku 2", a drugą do dowolnego ślizgacza, to jaką rezystancję spodziewalibyśmy się zobaczyć?

Czy bylibyście zaskoczeni, gdybym powiedział, że powinniśmy zmierzyć coś w okolicy 2,92 kΩ? Ponadto po obróceniu mierzonego potencjometru w jedną stronę do oporu zobaczylibyśmy 0 kΩ, a po obróceniu go do oporu w drugą stronę – 1,67 kΩ.

Kto w tym momencie powie „to przecież jasne!", ten nie musi czytać dalej. Pozostałym Czytelnikom, którzy zapewne marszczą teraz czoło i drapią się po głowie, z przyjemnością wszystko bym tutaj dokładnie wyjaśnił. Niestety, nasz znakomity Redaktor Naczelny twierdzi, że nie mamy na to czasu ani miejsca. Opisałem więc to wszystko w formie blogu Cool Beans (https://bit.ly/3omhAzC).

W następnym odcinku

Mam nadzieję, że w kolejnym odcinku będę mógł pokazać program, który tworzy wirujące efekty „koła olejowego" na moim wyświetlaczu z piłeczek pingpongowych. Poeksperymentujemy też z dalszymi efektami na tablicach SMAD. I oczywiście będziemy nadal pracować nad realizacją ruchu głowy mojego robota, a ostatecznym celem tych prac będzie zapewnienie głowie możliwości obracania się. Będzie ona mnie śledzić, gdy poruszam się po pokoju albo reagować na nieoczekiwane dźwięki.

Na razie, jak zawsze, czekam na Wasze komentarze, pytania i sugestie. ■

Max Maxfield

Odpowiedzi dotyczące przekształceń toroidalnych

1. Nadal będą cztery boki i cztery krawędzie. Ścieżki krawędzi można oznaczyć A → A', B → B', C → C' oraz D → D'.
2. Są teraz dwa boki i dwie krawędzie. Ścieżki krawędzi można oznaczyć A → A' → C → C' oraz B → B' → D → D'.
3. Jest tylko jeden bok i jedna krawędź. Ścieżkę tej krawędzi można oznaczyć A → A' → B → B' → C → C' → D → D'.

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

REKLAMA

eprasa.pl 7d549de066

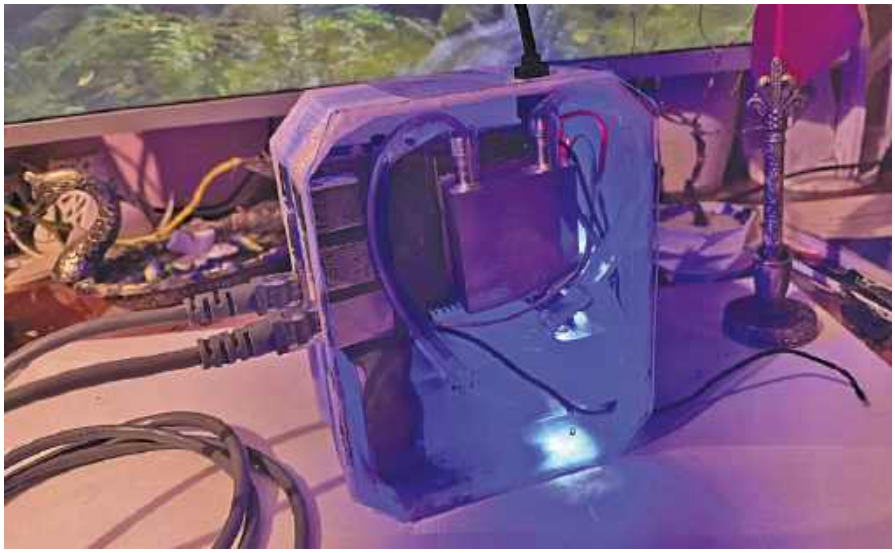
Twój własny superkomputer

Istnieją takie dziedziny zastosowań małych komputerów, gdzie pewna ich liczba działa razem, tworząc superkomputer. Przekonajmy się, jak zrobić taki system.

Większość superkomputerów ma pewną liczbę połączonych ze sobą i współdziałających procesorów oraz procesor główny, który rozdziela duże zadanie obliczeniowe na mniejsze zadania. Są one przypisywane do procesorów w taki sposób, że zadanie zostaje wykonane w znacznie krótszym czasie.

Zaprojektujmy nasz własny superkomputer – system podstawowy (klaster), do którego można podłączyć dowolną liczbę węzłów, stosownie do potrzeb obliczeniowych. Użyjemy komputerów jednopłytkowych Raspberry Pi. Połączymy je ze sobą i uczynimy jeden z nich węzłem głównym. Węzeł główny będzie rozdzielał zadania i kontrolował wszystkie pozostałe komputery.

Elementy do tego projektu są wymienione w liście elementów. Autorski prototyp widzimy na **rysunku 1**.



Rysunek 1. Prototyp Autora

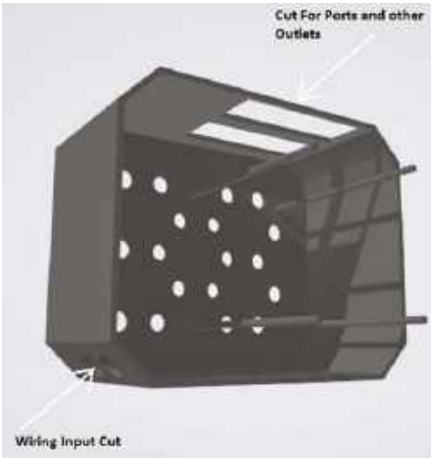
Każdy węzeł naszego superkomputera będzie wymagał kompletu podzespołów wymienionego w liście elementów. A zatem, aby stworzyć superkomputer o mocy 100 Raspberry Pi, potrzebnych będzie 100 zestawów.

Projekt sprzętu

System można zaprojektować albo w prosty sposób, umieszczając węzły superkomputera w jednej szafie „rackowej", albo rozmieszczać węzły w osobnych obudowach. Zobaczmy, jak zrobić superkomputer z bloków, z których każdy będzie miał dwa procesory z własnymi systemami zarządzania energią i chłodzenia. Taka konstrukcja zapewnia elastyczność, bo umożliwia dodawanie dowolnej liczby pojedynczych bloków. Przy odpowiedniej ich ilości można uzyskać wręcz gigantyczną moc obliczeniową.

Zaprojektujemy obudowę dla jednego bloku. Pomieści ona dwa komputery jednopłytkowe Raspberry Pi oraz cylindryczny zbiornik chłodzenia wodnego. W obudowie należy wykonać dwa wycięcia z przodu dla portów USB i Ethernet. W części dolnej należy wykonać otwory do poprowadzenia przewodów i dla złączy zasilacza, a także kilka otworów wentylacyjnych, aby dzięki cyrkulacji powietrza system utrzymywany był w chłodzie. Patrz **rysunek 2**.

Po zaprojektowaniu obudowy według powyższych wskazówek drukujemy ją na drukarce 3D. Można stworzyć swój własny, niestandardowy projekt obudowy albo nawet zdecydować się na system ze stelażem „rack", a system chłodzenia i procesory dostosować do tej konfiguracji.



Rysunek 2. Projekt obudowy dla jednego bloku

Układ chłodzenia

Sprawny system chłodzenia superkomputera jest niezbędny, ponieważ procesory wykonują złożone zadania i mogą się mocno nagrzewać. Zalecany jest podwójny system chłodzenia, wykorzystujący najpierw chłodzenie termoelektryczne (ogniwem Peltiera), a następnie wodne. Aby uzyskać lepsze wyniki, zamiast wody można użyć ciekłego chłodziwa.

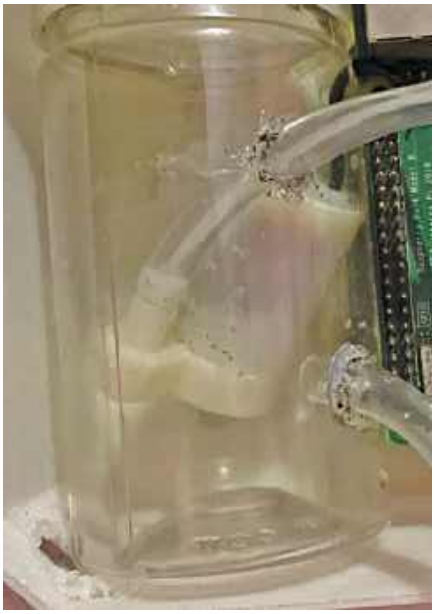
Jako zbiornik wody/chłodziwa można użyć hermetycznego przezroczystego cylindrycznego pojemnika ze szkła lub plastiku, mieszczącego się w zaprojektowanej wcześniej obudowie. Zbiornik musi być szczelny, aby nie doszło do uszkodzenia pobliskich elementów elektronicznych lub do zwarcia.

Jak pokazano na **rysunku 3**, w zbiorniku należy wykonać otwory na rury wlotowe i wylotowe wody oraz otwór na kable zanurzeniowej pompy wodnej. Dołączamy rury wodne i przewody elektryczne, a następnie uszczelniamy otwory klejem na bazie gumy, tak aby woda nie wyciekała ze zbiornika. Szczegóły widać na **rysunkach 4**, **5** i **6**.

Aby zapobiec gromadzeniu się kropel wody wewnątrz pojemnika z powodu wilgoci,

Rysunek 3. Rury wlotowe i wylotowe umocowane w zbiorniku wody

eprasa.pl 7d549de066



Rysunek 4. Otwory wlotowe i wylotowe wody. Rury umocowane i uszczelnione klejem

Rysunek 5. Pokrywka zbiornika wody

Rysunek 6. Zbiornik wypełniony cieczą

należy przykryć elementy elektroniczne arkuszem plastiku lub taśmą klejącą. Umieszczamy rury wlotowe i wylotowe wewnątrz aluminiowego bloku wodnego (patrz **rysunki 7** i **8**) i podłączamy pompę wodną oraz przewody elektryczne do zasilania 5 V DC.

Montaż

Kiedy zbiornik pompy wody chłodzącej i cały system chłodzenia będzie gotowy, można rozpocząć montaż bloku superkomputera. Najpierw mocujemy wewnątrz obudowy jeden komputer jednopłytkowy Raspberry Pi, jak pokazano na **rysunku 9** i montujemy na nim pierwszy blok chłodzący. Następnie montujemy drugi komputer RPi, upewniając się, że porty komputera są odsłonięte przez wycięcia w obudowie. Drugi RPi przykręcamy śrubami, a następnie mocujemy do niego termoelement i drugi blok chłodzący. Nakładamy teraz górną część obudowy. Aby całość wyglądała atrakcyjnie i aby można było zobaczyć przepływającą wodę, jako górnej części obudowy dobrze jest użyć przezroczystego arkusza akrylu. Szczegóły można zobaczyć na **rysunkach 10**, **11**, **12**.

Pompę wodną i chłodnicę termoelektryczną podłączamy do zasilacza napięcia stałego 5...12 V/2 A według schematu z **rysunku 13**. Raspberry Pi zasilamy z 5 V/2 A.

Oprogramowanie

Na RPi należy zainstalować najnowszy system operacyjny Raspbian. Utworzymy jednostkę nadrzędną, która, jak w superkomputerze, będzie dla celów przetwarzania rozdzielać elementy zadań na wszystkie węzły składowe i kontrolować ich pracę. Aby to zrobić, otwieramy terminal Linuksa, instalujemy pakiet MPICH oraz bibliotekę MPI i konfigurujemy węzeł nadrzędny – odpowiedzialny za rozdzielanie i kontrolowanie zadań przetwarzanych przez wszystkie węzły klastra.

Zmieniamy hasło użytkownika „pi”:

```
sudo passwd pi
```

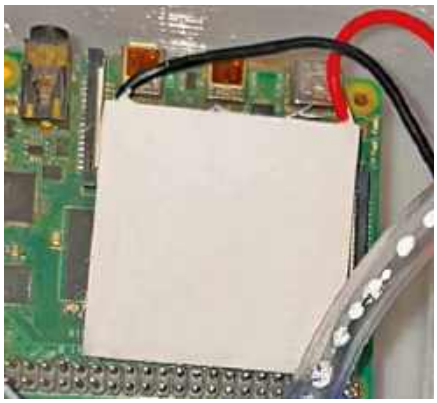
Aktualizujemy źródła pakietów:

```
sudo apt-get update
```

Dodawanie wpisów w pliku dhcpcd.conf nie jest bezwzględnie konieczne (przydzielaniem odpowiednich adresów IP w sieci LAN na bazie adresów fizycznych MAC mógłby zająć się poprawnie skonfigurowany router z serwerem DHCP). Jednak statyczna adresacja jest bardzo

Lista Elementów

element	ilość	opis
Raspberry Pi 4GB	co najmniej 2 węzły	węzły superkomputera
Zasilacz	co najmniej 2 na węzeł	2 A
chłodzący blok wodny	co najmniej 2 na węzeł	40 × 40 × 12 mm
Karta SD 16 GB lub SSD 120...500 GB	karta SD: co najmniej 2/SSD: 1	zapis/odczyt 100 MB/s
Chłodnica termoelektryczna (element Peltiera)	co najmniej 2 na węzeł	40 × 40 × 12 mm
Rurka o średnicy 7 mm	co najmniej 4 na węzeł	kryza 7 mm/5 mm
Woda lub płyn chłodzący	200 ml	
Zbiornik wody	200 ml	szczelny pojemnik cylindryczny
Mikropompka wodna	1 na węzeł	3...5 5 V, kryza 3 mm
Kabel Ethernetowy	2 na węzeł	15 cm
Obudowa drukowana w 3D	1 na węzeł	PLA/ABS
Switch Ethernetowy	1	2 lub więcej portów



Rysunek 7. Moduł termoelektryczny umieszczony na procesorze w RPi

eprasa.pl 7d549de066

zalecana w przypadku projektów takich jak klaster Raspberry Pi, gdzie komunikacja między węzłami odbywa się po adresach IP oraz potrzebujesz, by adresy IP były zawsze takie same po restarcie.

Dalsza część artykułu zakłada, że system operacyjny Raspberry Pi do zarządzania siecią wykorzystuje mechanizm dhcpcd. I rzeczywiście, Raspbian (obecnie Raspberry Pi OS) przez długi czas domyślnie do zarządzania siecią używał dhcpcd. Przejście na NetworkManager jako domyślne narzędzie nastąpiło stosunkowo niedawno.

- **Do wydania: Raspberry Pi OS Bullseye (wydanie z 2021 roku)**
  Domyślnym menedżerem sieci był dhcpcd.
- **Od wydania: Raspberry Pi OS Bookworm (wydanie z października 2023)**
  NetworkManager stał się domyślnym narzędziem do zarządzania siecią, zastępując dhcpcd.
- **Tym samym:**
  Raspbian Buster i starsze → dhcpcd
  Raspberry Pi OS Bullseye → dhcpcd
  Raspberry Pi OS Bookworm → NetworkManager

Jeśli Twój system ma zainstalowany NetworkManager, a plik /etc/dhcpcd.conf jest pusty lub nieużywany, najprawdopodobniej korzystasz z Raspberry Pi OS Bookworm lub nowszego.

Dlatego (w przypadku mechanizmu dhcpcd) w sekcji „Networking" zmieniamy nazwę hosta na NodeX, gdzie X jest unikatowym numerem (Node1, Node2 itd.). Naszą jednostką główną będzie Node1.

Co bardzo wygodne, ciekawe i godne pochwały zarazem, nazwę hosta, jak również nazwę użytkownika oraz hasło użytkownika można wprowadzić do zakładki Ogólne programu Raspberry Pi Imager już na etapie tworzenia karty SD z systemem operacyjnym!

Rysunek 8. Aluminiowy blok wodny do chłodzenia

Rysunek 9. RPi zmontowany w obudowie

Będziemy też potrzebowali serwera SSH. Serwer SSH jest w Raspbianie domyślnie zainstalowany, niemniej należy go uruchomić:

```
sudo systemctl enable ssh
sudo systemctl start ssh
```

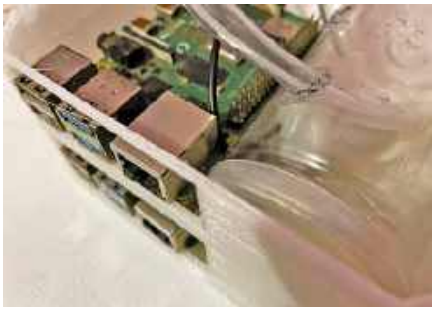
Co bardzo wygodne, można to zrobić również na etapie tworzenia karty SD z systemem Raspberry PI OS za pomocą programu Raspberry Pi Imager:

Nie da się jednak graficznie „wyklikać" konfiguracji sieci LAN, zatem:

W przypadku mechanizmu dhcpcd:

Po zalogowaniu się do konsoli Raspberry Pi OS na przykład za pomocą SSH konfigurujemy sieć Ethernet:

```
sudo nano /etc/dhcpcd.conf
```



Rysunek 10. Zbiornik przymocowany w obudowie obok RPi

Rysunek 11. Widok z góry

Rysunek 12. Mocowanie modułu chłodzenia wodnego

Przechodzimy do końca pliku i dodajemy następujące elementy:

```
interface eth0
static ip_address=10.0.0.1/24
```

W przypadku mechanizmu Network Manager:

Statyczne IP możemy ustawić za pomocą nmcli:

Najpierw sprawdzamy nazwę połączenia sieciowego:

```
nmcli con show
```

Polecenie to zwróci zawartość podobną do:

eprasa.pl 7d549de066

Kity pokrewne tematycznie, dostępne na stronie: https://sklep.avt.pl:
TIDex - komputer dla samochodów z silnikiem diesla, PCB i mikroprocesor do projektu AVT5395
https://sklep.avt.pl/pl/products/tidex-komputer-dla-samochodow-z-silnikiem-diesla-pcb-i-mikroprocesor-do-projektu-avt5395-167248.html

NAME	UUID	TYPE	DEVICE
Wired connection 1	xxxxxxxx-xxxx-xxxx-xxxx-xxxxxxxxxxxx	Ethernet	eth0
lo	xxxxxxxx-xxxx-xxxx-xxxx-xxxxxxxxxxxx	loopback	lo

Następnie stosując odnalezioną nazwę (tu: Wired connection 1).

Konfigurujemy statyczne IP:

```
nmcli con mod „Wired connection 1” ipv4.
method manual \
ipv4.addresses 10.0.0.2/24 \
ipv4.gateway 10.0.0.1 \
ipv4.dns 8.8.8.8
```

Po skonfigurowaniu sieci tworzymy unikatową tożsamość:

```
ssh-keygen -t rsa
Setup master node
ssh-copy-id 10.0.0.1
```

Węzeł główny jest już gotowy.

Wszystkie czynności powyżej wykonujemy również dla pozostałych hostów.

Otwieramy terminal drugiego węzła, łączymy oba RPi przez Ethernet i powtarzamy powyższe kroki.

Owszem, pamiętając jednak, że każdy host musi posiadać unikalny adres IP. Adresem głównego hosta ma być 10.0.0.1, kolejnym należy przypisać statyczne adresy 10.0.0.2, 10.0.0.3, ..., 10.0.0.n,
gdzie n jest numerem porządkowym ostatniego hosta i jest liczbą mniejszą od 255.

Dalsze węzły (mogą ich być tysiące) dodajemy, tworząc obraz startowy powyższej konfiguracji RPi i przygotowując kartę SD z tym obrazem dla wszystkich węzłów.

Można, choć to spowoduje, że wszystkie hosty będą posiadały taki sam adres IP i należy pamiętać o zmodyfikowaniu statycznych adresów IP zgodnie z sugestią powyżej, co może być kłopotliwe, jeśli będziemy chcieli zrobić to po SSH. Uzysk czasowy na takim rozwiązaniu raczej marny. Sporządzenie świeżych obrazów Raspberry Pi OS z użyciem Raspberry Pi Imager wydaje się być ostrożniejszym (potencjalnie mniej kłopotliwym) podejściem.

Podłączamy wszystkie węzły przez Ethernet, wszystkie uruchamiamy i konfigurujemy je jako węzły podrzędne względem mastera, korzystając z poniższych poleceń i ustawień.

Otwieramy terminal i uruchamiamy poniższe polecenia na każdym węźle superkomputera:

```
sudo apt install mpich
python3-mpi4py
```

Po zakończeniu test MPI działa na każdym węźle:

```
mpiexec -n 1 hostname
```

Z węzła Node1 (10.0.0.1) uruchamiamy następujące polecenie:

```
mpiexec -n 4 --hosts 10.0.0.1,10.0.0.2,1
0.0.0.3,10.0.0.4 hostname
```

albo

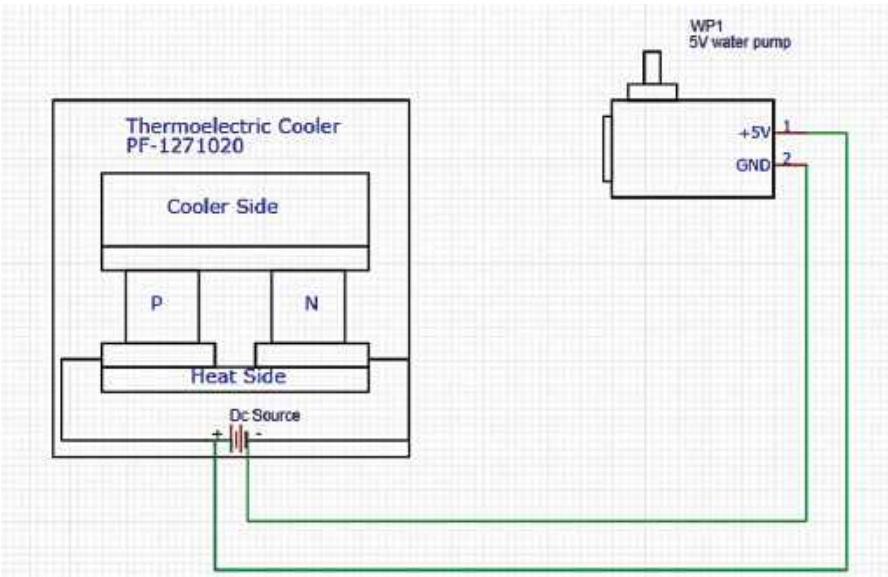
```
mpiexec -n 4 -hosts
node1,node2,node3,node4 hostname
```

Po prawidłowo ukończonej konfiguracji system można przetestować. Podłączamy wszystkie węzły i zasilamy je. Pobieramy program ze strony https://github.com/mrpjevans/cluster-prime. Otwieramy terminal węzła głównego i w terminalu Linux uruchamiamy następujące polecenie:

```
mpiexec -n 1 python3 prime.py 1000
```

Po uruchomieniu tego programu, między wszystkie węzły w systemie jest rozdzielane skomplikowane zadanie znalezienia liczb pierwszych aż do 1000 (może ich być też np. 4000 czy nawet 100 000). Węzły razem przetwarzają zadanie i znajdują wynik. Efekt działania programu widać na rysunku 14. ■

Ashwini Kumar Sinha



Rysunek 13. Schemat połączeń

Rysunek 14. Uruchamianie programu

Film: https://youtu.be/UYbw8vNcYzw

Ten artykuł był wcześniej opublikowany na łamach „EFY”, kwiecień 2023 (efymag.com)

eprasa.pl 7d549de066

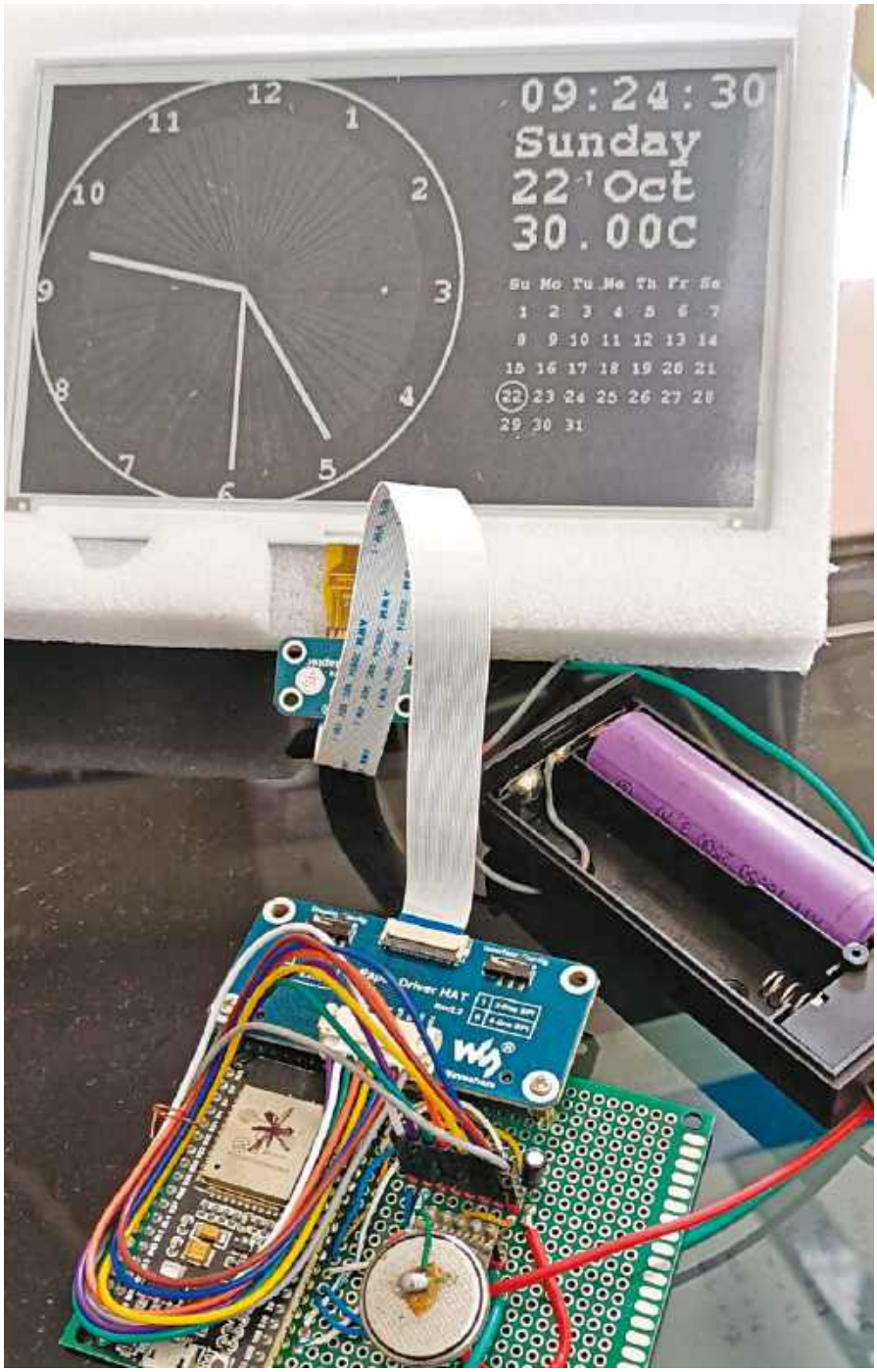
E-papierowy zegar z mikrokontrolerem ESP32

Technika elektronicznego papieru stale się rozwija. Niedaleki jest dzień, w którym e-papier zastąpi dzisiejsze wyświetlacze OLED w telefonach komórkowych i innych urządzeniach przenośnych. Doprowadzi to do znacznego zmniejszenia zużycia energii i wydłużenia czasu użytkowania.

Cechą e-papieru – zarówno czarno-białego, jak i kolorowego – jest wyraźny obraz, który pozostaje widoczny także po odłączeniu zasilania. W wersji kolorowej uzyskuje się ponadto żywe barwy. Dodatkową zaletą jest kąt widzenia – ponad 170 stopni. E-papier może być używany bez podświetlenia (odbija wtedy padające na niego światło otoczenia), co skutkuje wyjątkowo niskim zużyciem energii.

Istotną wadą e-papieru jest jednak bardzo długi okres odświeżania, wynoszący od 3 do 8 sekund. Jest to główny powód, dla którego e-papier nie trafił jeszcze na dobre do urządzeń przenośnych. Jego zastosowania ograniczają się obecnie głównie do czytników e-book'ów oraz wyświetlaczy w zegarach pokazujących tylko godziny i minuty.

Rysunek 1 przedstawia prototyp zegara Autora. Podzespoły użyte w projekcie są wymienione w liście elementów.



Rysunek 1. Prototyp Autora

Układ i działanie

Rysunek 2 przedstawia schemat zegara. Konstrukcja składa się z modułu ESP32 (MOD1), czarno-białego wyświetlacza e-papierowego o przekątnej 19 cm (MOD2), modułu zegara czasu rzeczywistego (RTC) DS3231 (MOD3), stabilizatora 3,3 V HT7333A (IC1) i kilku innych elementów.

Głównym elementem układu jest wyświetlacz o przekątnej 19 cm i rozdzielczości 800×480 pikseli. Wyświetlany jest obraz analogowego zegara ze wskazówkami, w tym sekundową, która jednak nie porusza się co sekundę, lecz co dwie lub trzy sekundy – ze względu na ograniczenia prędkości odświeżania e-papieru.

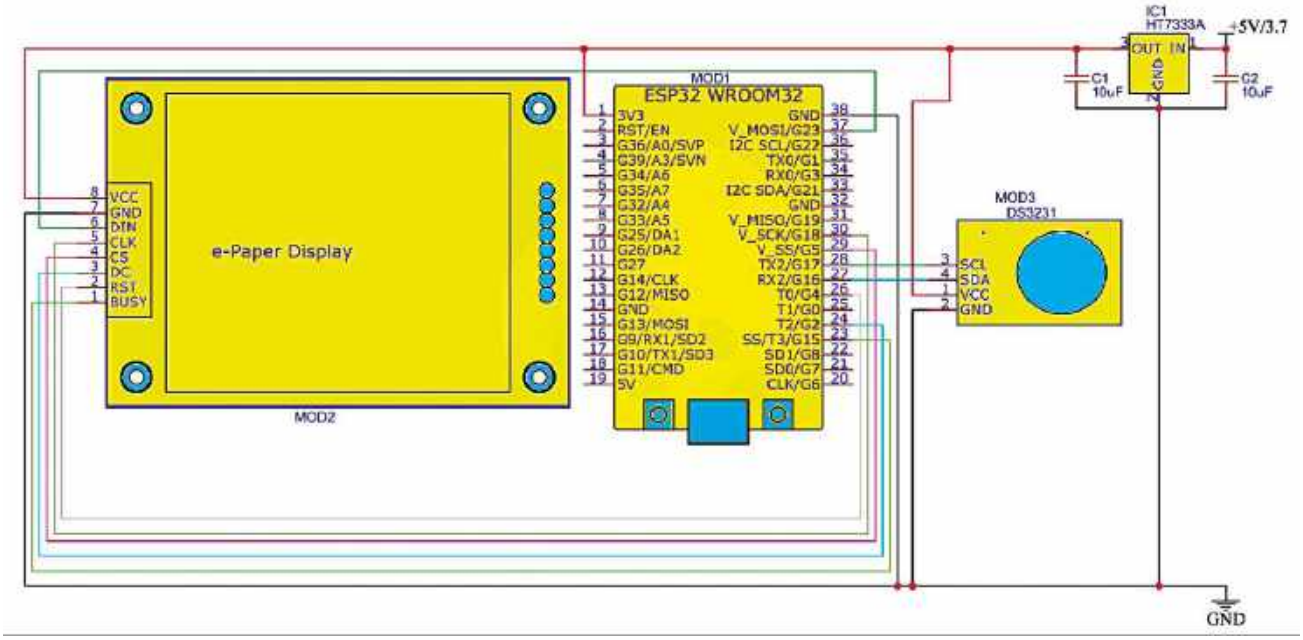
W przypadku zaniku zasilania sieciowego układ pobiera prąd około 60 mA z ogniwa LiPo 3,7 V, które umożliwia nieprzerwane działanie zegara przez ponad dwa dni. Jest to więcej niż wystarczające!

Oprogramowanie

Do programu wymagane są pliki biblioteczne, które należy zainstalować w katalogu bibliotek Arduino. Pliki te wraz z programem

eprasa.pl 7d549de066

Kity pokrewne tematycznie, dostępne na stronie: https://sklep.avt.pl:
Zegarek biurkowy OLED, KIT AVT5805
https://sklep.avt.pl/pl/products/zegarek-biurkowy-oled-kit-avt5805-185497.html



Rysunek 2. Schemat układu

można znaleźć na stronie www.electronicsforyou.com. Jeśli używany jest wyświetlacz e-papierowy inny niż proponowany, wystarczy „odkomentować" wiersz z odpowiednim sterownikiem wyświetlacza. Do odmierzania czasu i daty jest używany układ RTC, a jego adres I²C jest wpisany w programie. Domyślny adres I²C dla większości RTC to 0x68.

W przeciwieństwie do typowego programu na Arduino, gdzie wszystkie czynności powtarzają się wewnątrz jakiejś pętli, w programie obsługującym e-papier nie wszystko można powtarzać. W e-papierze wyświetlacz jest podzielony na dwie strony: pierwotną i następną. Na stronach tych trzeba pisać w przeciwnych kolorach, aby po wygaśnięciu strony pierwotnej i rozpoczęciu następnej przeciwne kolory zniosły się nawzajem. Wtedy wszystko zostanie wyświetlone poprawnie. Jeśli na stronie pierwotnej piszemy białym kolorem na czarnym tle, to na następnej stronie musimy napisać tę samą grafikę lub tekst czarnym kolorem na białym tle. W ten sposób zapewniamy, że treść wyświetlacza będzie się prawidłowo zmieniać w pętli, w naszym przypadku co sekundę. Niezastosowanie się do tej zasady spowoduje pojawienie się na ekranie migoczącego „ducha", zmieniającego się w sposób ciągły.

Rysunek 3 przedstawia fragment kodu źródłowego.

```
void thickRect(int x0,int y0, int x1, int y1, int thk,int clr, int color){
thickline(x0,y0+clr+clr/2,x1-clr,y0+clr+clr/2,thk,color);
thickline(x1-clr,y0+clr,x1-clr,y1-clr,thk,color);
thickline(x1-clr,y1-clr,x0+clr,y1-clr,thk,color);
thickline(x0+clr,y1-clr,x0+clr,y0+clr,thk,color);
}

void thickline(int x, int y, int x1, int y1, int size, int color) {
  float dx = (size / 2.0) * (y - y1) / sqrt(sq(x - x1) + sq(y - y1));
  float dy = (size / 2.0) * (x - x1) / sqrt(sq(x - x1) + sq(y - y1));
  display.fillTriangle(x + dx, y - dy, x - dx,  y + dy,  x1 + dx, y1 - dy, color);
  display.fillTriangle(x - dx, y + dy, x1 - dx, y1 + dy, x1 + dx, y1 - dy, color);
}
void thickcircle(int16_t x0, int16_t y0, int16_t r, int pixel, uint16_t color) {
  for(int i=r;i<=r+pixel;i++){
   display.drawCircle(x0, y0, i, color);
  }
}

 void drawClockFace(){
  display.fillCircle(ccenterx - hshift, ccentery-vshift, cradius-10, GxEPD_WHITE);  //blue
  display.fillCircle(ccenterx - hshift, ccentery-vshift, cradius-14, GxEPD_BLACK); //black
  // Draw 12 lines
  for(int i = 0; i<360; i+= 30) {
    hr = i/30;
    if(hr==0) hr=12;
    // Serial.println(hr);
    sx = cos((i-90)+scosConst);
    sy = sin((i-90)+scosConst);
    x0 = sx*(cradius-4-10)+ccenterx;
    yy0 = sy*(cradius-4-10)+ccentery;
    x1 = sx*(cradius-11-10)+ccenterx;
    yy1 = sy*(cradius-11-10)+ccentery;
    display.drawLine(x0, yy0-vshift, x1, yy1-vshift, GxEPD_WHITE);  //blue
    display.setTextColor(GxEPD_WHITE,GxEPD_BLACK);
   int x00 = sx*(cradius-4-10-10)+ccenterx;
   int yy00 = sy*(cradius-4-10-10)+ccentery;
```

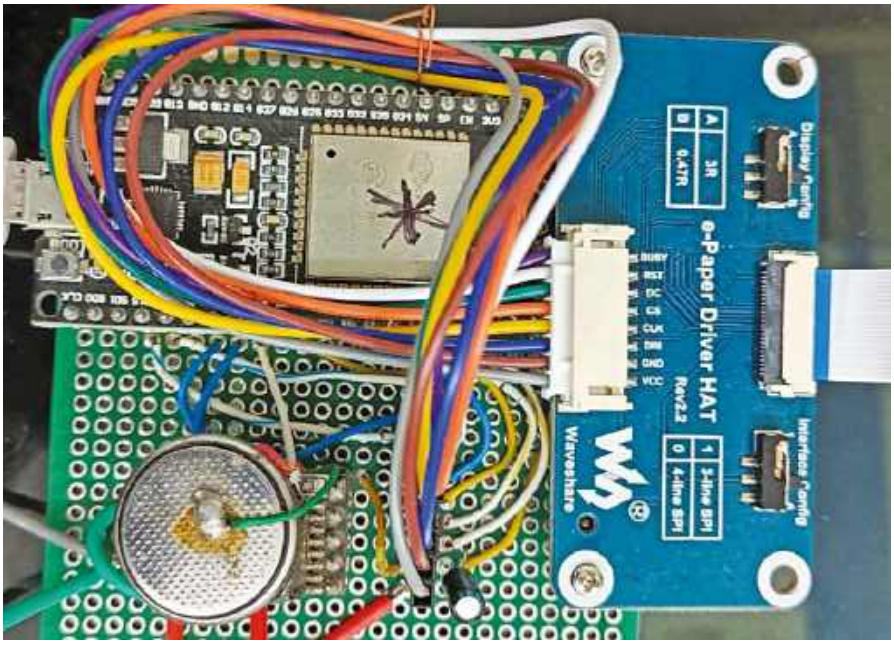
Rysunek 3. Fragment programu

Konstrukcja i testy

Montujemy i łączymy wszystkie elementy zgodnie z rysunkiem 2. W przypadku sterownika HAT (patrz oznaczenie z tyłu wyświetlacza) należy zadbać o to, by przełącznik SPI był ustawiony na „4-wire", a przełącznik konfiguracji – na „B". W przeciwnym razie wyświetlacz może nie zadziałać! Tasiemka połączeniowa między e-papierem a sterownikiem jest bardzo delikatna. Starajcie się nią nie poruszać, ponieważ może to trwale uszkodzić e-papierowy wyświetlacz.

Następnie podłączamy moduł RTC do magistrali I²C zgodnie ze schematem.

eprasa.pl 7d549de066



Rysunek 4. Płytka drukowana z połączeniami przewodowymi

Dla uzyskania napięcia 3,3 V zastosowano stabilizator HT7333A o niskim poborze mocy i małym spadku napięcia (LDO). Jego prąd spoczynkowy wynosi tylko 4 µA. Wejściowe napięcie zasilania wynosi 3,47 V...12 V. Nawet przy najniższym napięciu z tego zakresu uzyskamy prawidłowe 3,3 V wymagane dla zegara.

Pobór prądu przez układ wynosi około 60 mA z ogniwa 3,7 V. Na ogniwie LiPo bardzo starego typu (18650) zegar może działać nieprzerwanie przez 2,5 dnia. Układ najlepiej nada się jako zegar halowy, uliczny lub parkowy, zasilany energią słoneczną. Kilka dni bez światła słonecznego nie wpłynie na jego działanie. Kąt widzenia e-papieru wynosi ponad 170 stopni. Wyświetlacz jest dobrze widoczny w świetle dziennym, nie będzie jednak czytelny w ciemną noc czy w cieniu – potrzebuje światła, a sam nie zawiera żadnego podświetlenia! W przypadku korzystania z panelu słonecznego konieczne jest dołączenie bloku ładowania, co nie zostało uwzględnione na schemacie.

Podłączamy zasilanie i e-papierowy zegar jest gotowy. Zegar i kalendarz pokazują czas rzeczywisty i datę. ■

Somnath Bera

Lista elementów
- ESP32 – MCU (MOD1) – mikrokontroler
- stabilizator napięcia 3,3 V (IC1) – HT7333A
- E-papier czarno-biały, przekątna 19 cm=7,5 cala (MOD2) – wyświetlacz
- Przewody, płytka drukowana, złącza
- Kondensatory elektrolityczne 10 µF/16 V (C1, C2) 2 szt.
- Moduł RTC (MOD3) – DS3231

Ten artykuł był wcześniej opublikowany na łamach „EFY", styczeń 2024 (efymag.com)

REKLAMA

eprasa.pl 7d549de066

ELEKTRONIKA dla wszystkich
nr 8/2025 (14)
JUNIOR

Karol. Młodzi Entuzjaści Elektroniki, Szkoła Podstawowa nr 86, Wrocław

Półmetek wakacji już za pasem, a letnia aura potrafi być naprawdę gorąca. Choć zdarzają się też chłodniejsze dni – takie, że aż chciałoby się rozpalić w kominku! A skoro mowa o pogodzie i stopniach, mam dla Ciebie propozycję: zbudujmy razem… termometr. Ale nie byle jaki! Tym razem niech będzie to urządzenie, które nie tylko mierzy temperaturę, ale robi to w wyjątkowy sposób. Zamiast jednostek w stopniach Celsjusza, wskaźnik będzie operował… kolorami odpowiadającymi emocjom! Co więcej, całość będzie animowana: skala zacznie „płynąc w górę", gdy temperatura zacznie wzrastać – albo „opadać w dół", gdy powietrze wokół zacznie się ochładzać. Brzmi intrygująco? No to zaczynajmy!

Omówienie układu

Bohaterem dzisiejszego spotkania jest zestaw do samodzielnego złożenia o nazwie **TermoEmotek** i kodzie handlowym **AVTEDU630**. Jak już zdradziłem we wstępie, jest to całkiem intrygujący termometr. Został on zaprojektowany z wykorzystaniem popularnych i łatwo dostępnych elementów: mikrokontrolera ATTiny2313, termometru cyfrowego DS18B20, dziesięciu diod LED w różnych kolorach oraz pewnej niewielkiej liczby elementów dyskretnych.

Po włożeniu do koszyczka trzech baterii AA (standardowe „paluszki") na skali pojawią się animacje zależne od temperatury otoczenia. Do wyboru jest kilka animacji i wybiera się je za pomocą zworek J1 i J2 i więcej opowiem Ci o tym już za kilka chwil. Zestaw przed i po zmontowaniu pokazano na **fotografiach 2a** oraz **2b**.

Omówienie schematu

TermoEmotek jest kolejnym, w ramach cyklu EdW Junior, układem opartym na mikrokontrolerze. Podobnie jak w układzie *UFOled-ka* (AVTEDU632) z EdW 10/2024 wykorzystano tu mikrokontroler ATtiny2313 o dwudziestu wyprowadzeniach. Choć mikrokontroler zastosowany w *TermoEmotku* jest identyczny jak ten w *UFOled-ku*, oba zostały zaprogramowane zupełnie innym oprogramowaniem układowym (ang. firmware), z związku z czym nie mogą być używane zamiennie.

Podobnie jak w kilku wcześniej zbudowanych w ramach cyklu EdW Junior układach opartych na mikrokontrolerach, ten również będzie sterował diodami LED. Tym razem jednak sterowane będą one na podstawie temperatury otoczenia odczytywanej z cyfrowego czujnika temperatury.

Schemat *TermoEmotka* przedstawia **rysunek 1** natomiast na **rysunku 2** znajduje się schemat montażowy, który ułatwi lokalizowanie elementów na płytce, ale przede wszystkim może pomóc w weryfikacji poprawności połączeń, gdyby pojawiła się wątpliwość, czy jakieś położone blisko siebie pady lub ścieżki powinny być ze sobą połączone, czy tez nie.

Zaraz za złączem zasilania, prąd z baterii trafia w pierwszej kolejności na **diodę D1**. To świadomy zabieg konstrukcyjny – dioda została tu umieszczona szeregowo, by pełnić funkcję zabezpieczającą.

Zabezpieczenie przed odwrotną polaryzacją

Podstawową cechą diod prostowniczych – takich jak ta użyta w naszym układzie – jest to, że pozwalają na przepływ prądu głównie w jednym kierunku. Jeśli przypadkowo podłączysz baterię odwrotnie, dioda nie dopuści do przepływu prądu w złym kierunku i tym samym ochroni układ przed uszkodzeniem. Bez niej taki błąd mógłby doprowadzić do zniszczenia wrażliwych elementów elektronicznych – na przykład kosztownego mikrokontrolera.

Błędna polaryzacja może doprowadzić także do uszkodzenia kondensatora elektrolitycznego C1 – i to w dość widowiskowy sposób. W najlepszym razie rozszczelni się, a w najgorszym… po prostu wybuchnie. To jeden z powodów, dla których **podczas uruchamiania układów elektronicznych należy bezwzględnie zakładać gogle ochronne**. Błędy montażowe zdarzają się nawet najbardziej doświadczonym konstruktorom – więc tym bardziej mogą przytrafić się osobom początkującym czy średniozaawansowanym. I nie ma w tym nic dziwnego!

Fotografia 1. Karol. Montaż zestawu *TermoEmotek* (kod handlowy AVTEDU630)

W tym projekcie jako zabezpieczenie przed odwrotnym podłączeniem zasilania zastosowano diodę Schottky'ego – popularny model 1N5819, który często spotyka się w zestawach do nauki elektroniki. Diody tego typu nie mają klasycznego złącza p–n. Zamiast tego wykorzystują specjalne złącze metal–półprzewodnik. Dzięki temu działają wyjątkowo szybko i charakteryzują się niższym spadkiem napięcia podczas przewodzenia. To oznacza mniejsze straty energii, co jest szczególnie ważne w układach zasilanych z baterii.

Co oznacza „spadek napięcia na diodzie"? Kiedy prąd przepływa przez diodę w kierunku przewodzenia (czyli „we właściwą stronę"), **część napięcia zostaje „zużyta" na samej diodzie**. To napięcie już **nie trafia dalej do układu**, tylko zostaje stracone – jakby dioda pobierała „opłatę" za wpuszczenie prądu.

Dlaczego czasem zależy nam, by spadek napięcia był niższy niż w klasycznej diodzie prostowniczej?

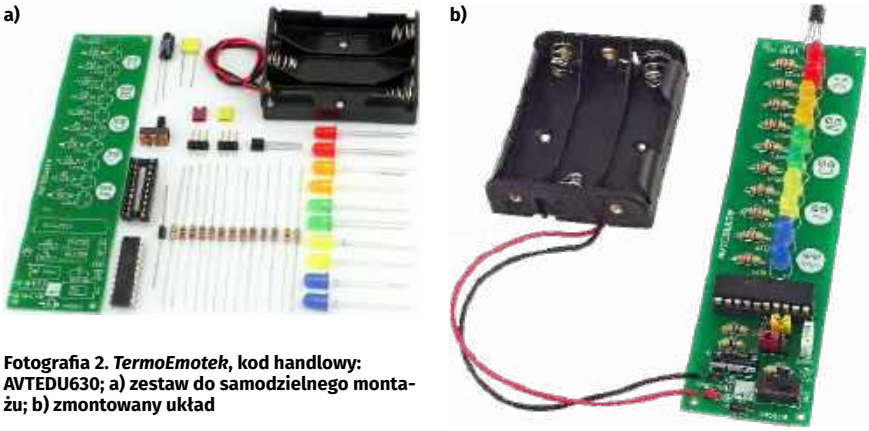
Dla klasycznej diody prostowniczej (np. 1N4007) spadek napięcia wynosi około **0,6…0,7 V**. Dla diody Schottky'ego (np. 1N5819) jest to tylko około **0,3…0,4 V**.

W naszym przypadku układ zasilany jest z **trzech baterii AA**, co daje sumaryczne napięcie około **4,5 V** (3×1,5 V). Jeśli zastosujesz klasyczną diodę krzemową, to do reszty układu dotrze już tylko około **3,8 V…3,9 V**. Natomiast z diodą Schottky'ego będzie to około **4,1…4,2 V**. Ta różnica może wydłużyć czas działania układu na bateriach i poprawić jego niezawodność, zwłaszcza przy elementach wrażliwych na zbyt niskie napięcie (na przykład mikrokontroler).

Podsumowując: dioda D1 to niewielki, ale bardzo ważny element, który chroni układ przed błędnym podłączeniem zasilania a zastosowanie diody Schottky'ego pozwala uzyskać nieco wyższe napięcie za diodą niż w przypadku użycia klasycznej diody prostowniczej.

Filtracja zasilania

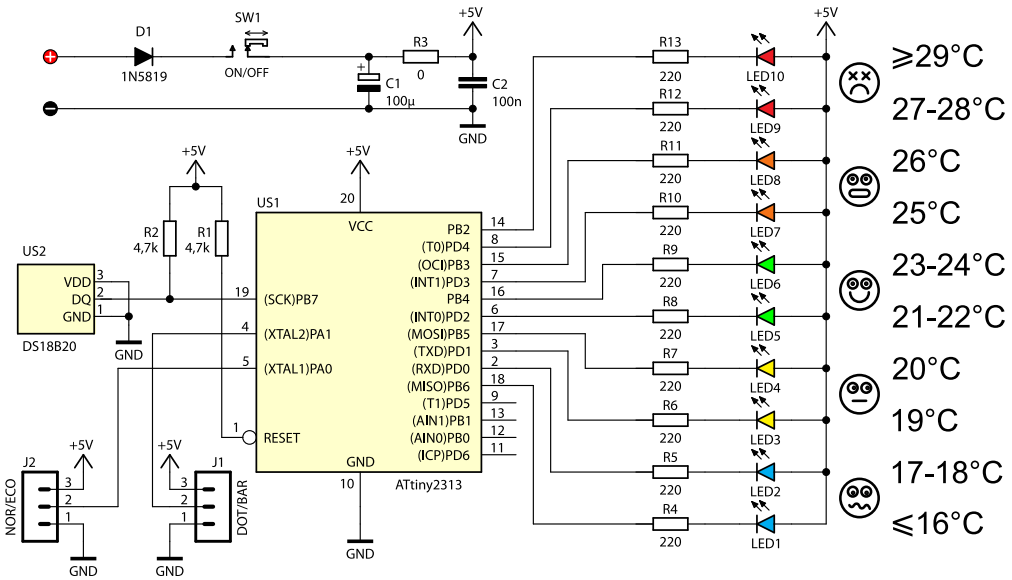
Kondensatory C1 i C2 służą tu do filtracji napięcia zasilającego, co pozwala zapewnić stabilną pracę mikrokontrolera. Kondensator ceramiczny C1 o małej pojemności (100 nF) tłumi zakłócenia o wysokich częstotliwościach – zarówno te pochodzące ze środowiska zewnętrznego, jak i generowane wewnątrz układu. Z kolei kondensator elektrolityczny C2 o większej pojemności (100 µF) przeciwdziała wolniejszym zmianom napięcia, stabilizując zasilanie w przypadku chwilowych spadków napięcia lub wahań poboru prądu. Warto pamiętać, że zakłócenia mogą pochodzić nie tylko z zewnątrz – źródłem impulsów zakłócających bywa także sam mikrokontroler, zwłaszcza podczas szybkiego przełączania stanów logicznych.



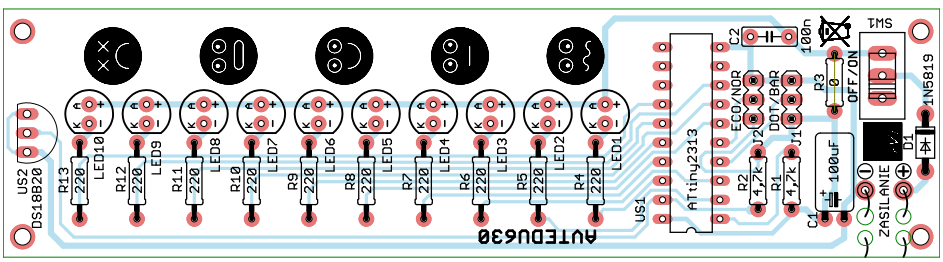
Fotografia 2. *TermoEmotek*, kod handlowy: AVTEDU630; a) zestaw do samodzielnego montażu; b) zmontowany układ

Zworka w postaci rezystora

Jeśli spojrzysz na schemat z **rysunku 1**, zauważysz, że dodatnie wyprowadzenia kondensatorów C1 i C2 zostały od siebie oddzielone za pomocą **rezystora R3 o zerowej wartości**. Pewnie pamiętasz z wcześniejszych spotkań, że rezystor o zerowej wartości to w zasadzie zwora, którą można zastąpić drutem, na przykład obciętym wyprowadzeniem innego komponentu albo srebrzanką. Jeśli jednak spojrzysz na **rysunek 2**



Rysunek 1. Schemat ideowy układu



Rysunek 2. Schemat montażowy układu

eprasa.pl 7d549de066

pod rezystorem R3 dostrzeżesz miedzianą ścieżkę prowadzącą masę z baterii (lub zasilacza) do mikrokontrolera US1 (oraz kondensatora C2 i zworek J1 i J2). Ze względu na przebieg tej ścieżki oraz ograniczoną ilość miejsca na małej płytce drukowanej, trudno byłoby doprowadzić dodatnie napięcie zasilania (wychodzące z przełącznika SW1) do mikrokontrolera – i do kilku innych elementów po drodze. Na szczęście zastosowanie rezystora R3 (lub zworki) pozwoliło wygodnie „przeskoczyć" nad kłopotliwą ścieżką masy i doprowadzić plus zasilania na drugą jej stronę. Ten popularny w praktyce inżynierskiej zabieg pozwala tworzyć całkiem złożone układy połączeń nawet na niewielkich płytkach jednostronnych, czyli pokrytych miedzią tylko z jednej strony. To rozwiązanie jest bardzo opłacalne pod względem kosztów, a jednocześnie szeroko stosowane w przemyśle. W elektronice konsumenckiej spotyka się dziesiątki, a czasem nawet setki rezystorów SMD pełniących funkcję zworek. Dzięki nim można znacznie uprościć projektowanie i wykonanie bardziej złożonych układów elektronicznych.

Zworkę w postaci rezystora (zwłaszcza w wersji do montażu powierzchniowego) można w dowolnym momencie łatwo wylutować – bez fizycznego przecinania, a tym samym bez niszczenia ścieżki – co pozwala odłączyć część układu od drugiej, na przykład w celach diagnostycznych, podczas poszukiwania usterki lub w trakcie prac nad rozwojem projektu.

Włącznik zasilania

Włącznik oznaczony na schemacie i płytce jako **SW1** pozwala odłączyć pakiet baterii od układu w momencie, gdy z tego układu nie korzystamy. Dzięki temu układ pobiera prąd z baterii wyłącznie wtedy, gdy jest to konieczne, co zapobiega ich przedwczesnemu rozładowaniu. W wielu tanich zestawach – w wyniku oszczędności i cięcia kosztów – eliminuje się takie „dodatki" jak włącznik zasilania, a osoba korzystająca z danego urządzenia musi pamiętać, by po skończonej zabawie wyciągnąć z koszyczka przynajmniej jedną z szeregowo połączonych baterii. Choć daje to ten sam efekt (rozłączenie jednego z elementów w szeregu przerywa obwód, dzięki czemu jakikolwiek prąd przestaje płynąć) to jednak przesunięcie hebelka przełącznika jest znacznie prostsze i wygodniejsze.

Etykiety

Na schemacie z rysunku 1, nad kondensatorem C2, widnieje skierowana ku górze strzałka oznaczona napisem „+5V". Taką samą strzałkę znajdziesz jeszcze w pięciu innych miejscach (zasilanie mikrokontrolera, „górne" wyprowadzenia rezystorów R1 i R2, piny numer 3 złączy J1 i J2 oraz wspólna anoda diod LED LED1…LED10). Ta strzałka to symbol równoważny wspominanej na poprzednich spotkaniach etykiecie, która oznacza wspólny net „+5V" (wspólne połączenie „+5V"). Umożliwia zachowanie czytelności i przejrzystości schematu, informując o połączeniu bez konieczności rysowania długich linii. Jeśli spojrzysz na rysunek montażowy (rysunek 2) i prześledzisz ciągłość ścieżki, z pewnością zauważysz, że elementy R3, C2, R1, R2, US1, J1, J2, oraz wszystkie diody LED1…LED10 są ze sobą połączone. Na schemacie znajduje się jeszcze jeden symbol tego typu – pogrubiona pozioma linia opisana jako „GND", na przykład pod kondensatorem C2. Pełni on tę samą funkcję co opisany powyżej symbol „+5V", tyle że „odprowadza" napięcie z wybranych elementów – również w sposób wirtualny, czyli bez widocznej linii połączeniowej na schemacie – do ujemnego bieguna zasilania.

Błędy czy rozbieżności?

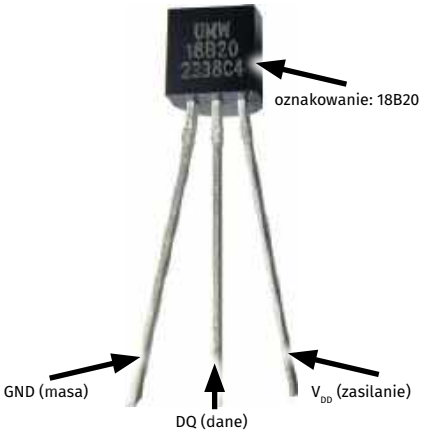
Być może, analizując net „+5V", zauważysz drobną rozbieżność między schematem a płytką. Jeśli nie – podpowiem: na płytce, w przeciwieństwie do tego, co pokazano na schemacie, napięcie z przełącznika SW1 najpierw dociera do kondensatora C2 oraz anod diod LED, a dopiero potem – przez rezystor R3 – do kondensatora C1, złącza J1, rezystora R2, złącza J2, rezystora R1 i układu US1. Ponieważ R3 to w rzeczywistości tylko zworka, temat nie ma większego znaczenia praktycznego. Mimo to chcę Cię uczulić – zaszczepić w Tobie uważność i czujność, ponieważ rozbieżności między schematem a rzeczywistą płytką drukowaną (które w innych przypadkach mogą mieć duże znaczenie) występują nierzadko – w zestawach jednych producentów częściej, u innych rzadziej.

W takich przypadkach można by się na siłę doszukiwać złośliwości bądź celowego „wprowadzania w błąd", by taki zestaw trudniej było „skopiować", „podrobić" i sprzedawać pod własną marką. Kilka dekad temu taka praktyka mogła mieć nawet sens. Niemniej w rzeczywistości do takich sytuacji dochodzi głównie wtedy, gdy projekt nie jest tworzony w jednym oprogramowaniu od początku do końca, a zamiast tego jest „ręcznie malowany" – niczym niespodzianka z wnętrza popularnego czekoladowego jajka, o czym przypominało głośne hasło tego słodkiego produktu w reklamach telewizyjnych z lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Formuła „każda figurka ręcznie malowana" dotyczyła ręcznego zdobienia postaci z jajek niespodzianek, szczególnie serii kolekcjonerskich (np. hipopotamki, żółwiki, pingwinki itd.). Miała na celu podkreślić jakość i unikalność zabawek, szczególnie w kontekście ich kolekcjonerskiej wartości. W przypadku projektowania elektroniki jest jednak nieco inaczej. „Ręczne malowanie" projektów w dzisiejszych czasach jest w zasadzie absurdalne. Po pierwsze – ze względu na dostępność znakomitych narzędzi projektowych, dostępnych dla każdego. Po drugie, z uwagi na symboliczne koszty wykonania profesjonalnych prototypów PCB przez całą mnogość dostawców z Chin. Co najbardziej istotne jednak, „ręczne projektowanie" niesie ze sobą nieporównywalnie większe ryzyko popełniania błędów oraz mniej lub bardziej świadomego generowania rozbieżności między schematem a płytką.

Kiedyś oprogramowanie do tworzenia płytek drukowanych nie było powszechnie dostępne i dokumentacje do urządzeń elektronicznych, w tym schematy i płytki drukowane, rzeczywiście powstawały na kartkach papieru. Nawet jeśli dedykowane do tego celu oprogramowanie (EDA, ang. Electronic Design Automation) istniało – lub też zaczynało się ono pojawiać na rynku, to z uwagi na cenę mogli z niego korzystać tylko nieliczni. Dziś oprogramowanie wspierające projektowanie płytek drukowanych jest szeroko dostępne, a jednym z najpotężniejszych, całkowicie darmowych (również do użytku komercyjnego!) środowisk służących do tego celu jest bez wątpienia KiCad. Sam go używam na co dzień i z czystym sumieniem polecam każdemu elektronikowi konstruktorowi. Kiedy nastąpi ów piękny dzień, w którym postanowisz opublikować swój pierwszy autorski projekt na łamach naszego wspólnego czasopisma, koniecznie użyj tego programu! Ułatwi to pracę redakcyjną nad przygotowaniem materiału do druku i przyspieszy publikację artykułu.

Podsumowując: kiedy w jednym programie (albo na kartce) rysuje się schemat a później oddzielnie tworzy się do tego płytkę i na siłę próbuje się zgrać jedno z drugim, to do różnic między schematem a płytką naturalną koleją rzeczy dojść musi. Jesteśmy tylko ludźmi i prędzej czy później popełnimy taki lub inny błąd. Zdecydowanie łatwiej uniknąć błędów, gdy najpierw tworzy się schemat w jednym module danego programu, a następnie generuje

eprasa.pl 7d549de066



Rysunek 3. Oznakowanie oraz opis wyprowadzeń układu DS18B20

netlistę i importuje połączenia do modułu projektowania PCB – również w tym samym środowisku. Proces „przenoszenia" schematu na płytkę odbywa się wtedy w sposób automatyczny, co znacząco ogranicza ryzyko błędów wynikających z pomyłek człowieka. Dzięki temu gotowy projekt PCB jest wiernym odwzorowaniem schematu – i odwrotnie.

Inicjalizacja mikrokontrolera

Podczas wkładania baterii do koszyczka na liniach zasilających mogą pojawiać się krótkotrwałe zakłócenia napięcia – tzw. stany nieustalone. Występują one np. wtedy, gdy styki baterii przesuwają się po blaszkach w koszyczku i chwilowo przerywają lub zmieniają opór połączenia. Tego typu zjawiska, choć trwają ułamki sekund, potrafią wprowadzić mikrokontroler w niepożądany stan. Układ scalony tego typu to dość złożone urządzenie, które może źle zareagować na niestabilne napięcie – np. niespodziewanie zawiesić się, wykonać błędne instrukcje, albo po prostu nie wystartować. Podobny problem może wystąpić przy zasilaniu z kiepskiej jakości zasilacza, którego napięcie po włączeniu narasta zbyt wolno lub jest niestabilne. W poważniejszych zastosowaniach – takich jak urządzenia medyczne, motoryzacyjne, lotnicze czy wojskowe – stosuje się w takich sytuacjach wyspecjalizowane układy nadzorujące zasilanie (ang. supervisory circuits), które generują sygnał RESET dopiero wtedy, gdy napięcie osiągnie bezpieczny poziom.

W naszym układzie wystarczy jednak proste, sprawdzone rozwiązanie – rezystor podciągający wejście RESET mikrokontrolera do napięcia zasilania. Na schemacie z rysunku 1 zobaczysz, że wyprowadzenie 1 mikrokontrolera US1 (oznaczone jako RESET z dodatkowym okręgiem) jest połączone z dodatnim biegunem zasilania **za pomocą rezystora R1**.

Wspomniany okrąg na wejściu RESET oznacza, że wejście to jest **aktywne w stanie niskim** – czyli przy 0 V. Podciągając je do plusa zasilania, zapobiegamy przypadkowemu zresetowaniu układu i umożliwiamy jego normalną pracę. Innymi słowy: obecność R1 sprawia, że po włożeniu baterii mikrokontroler uruchamia się automatycznie i zaczyna wykonywać swój program.

O obwodach resetu wspominam zawsze gdy omawiamy układ z mikrokontrolerem. Jeśli jesteś ciekaw, czy temat za każdym razem wygląda podobnie, możesz sięgnąć na przykład do archiwalnego wydania „Elektroniki dla Wszystkich" 10/2024 i zerknąć na stronie 85, w akapit „Układ resetu mikrokontrolera".

Cyfrowy termometr

W roli czujnika temperatury w opisywanym projekcie zastosowano popularny układ DS18B20, oznaczony na schemacie jako US2 i pokazany na **rysunku 3**.

To bardzo wygodny w użyciu czujnik cyfrowy, który komunikuje się z mikrokontrolerem za pomocą tylko jednej linii danych – pinu DQ (środkowa nóżka układu). Jest to możliwe dzięki specjalnemu protokołowi komunikacji 1-Wire, który pozwala przesyłać dane i sterować pracą czujnika właśnie przez jeden przewód. To ogromna zaleta – mniej kabli to mniejsze ryzyko pomyłki i bardziej przejrzysty układ.

DS18B20 ma trzy wyprowadzenia: zasilanie (VDD, nóżka 3), masę (GND, nóżka 1) oraz wspomniane wcześniej DQ (nóżka 2), które w naszym układzie połączone jest z pinem 19 mikrokontrolera ATtiny2313 (PB7).

Jak podaje nota katalogowa układu DS18B20: *Układ DS18B20 może być zasilany zewnętrznym napięciem podanym na wyprowadzenie VDD albo może pracować w trybie tzw. zasilania pasożytniczego (ang. parasite power), który umożliwia jego działanie bez lokalnego źródła zasilania. Tryb pasożytniczy jest szczególnie przydatny w aplikacjach wymagających zdalnego pomiaru temperatury lub w sytuacjach, gdy dostępna przestrzeń jest bardzo ograniczona. (…) wewnętrzny układ kontroli zasilania pasożytniczego DS18B20, „podbiera" energię z magistrali 1-Wire za pośrednictwem pinu DQ, gdy linia ta ma stan wysoki. Pobrany ładunek zasila układ DS18B20, gdy magistrala jest w stanie wysokim, a część tego ładunku jest gromadzona w kondensatorze zasilania pasożytniczego (CPP), aby zapewnić zasilanie również wtedy, gdy linia danych przechodzi w stan niski. W trybie zasilania pasożytniczego pin VDD musi być połączony z masą (GND).*

Widoczne na schemacie z rysunku 1 połączenie ze sobą linii zasilania układu (VDD) z masą (GND) jest informacją, że układ pracuje w, przytoczonym wyżej, trybie zasilania pasożytniczego. W tym trybie aby zapewnić prawidłowe działanie magistrali 1-Wire, konieczne jest dodanie rezystora podciągającego – w naszym przypadku **R2 o wartości 4,7 kΩ**. Rezystor ten łączy linię danych z dodatnim biegunem zasilania (+5 V), dzięki czemu linia DQ domyślnie znajduje się w stanie wysokim (logiczna „1") i może być odpowiednio sterowana zarówno przez mikrokontroler, jak i przez czujnik.

Układ DS18B20 jest całkiem inteligentny – nie tylko precyzyjnie mierzy temperaturę, ale też sam przelicza dane i wysyła wynik w postaci gotowych bajtów, bez potrzeby używania przetwornika ADC w mikrokontrolerze. Co więcej – można go zaprogramować w taki sposób, aby pracował z różną dokładnością, a nawet podłączyć kilka takich czujników do jednej linii danych i rozróżniać je po unikalnych numerach seryjnych.

Wielu początkujących elektroników zaczyna swoją przygodę z cyfrowym pomiarem temperatury właśnie od DS18B20 – i nie bez powodu. To niezawodny, tani i świetnie udokumentowany układ, który z powodzeniem sprawdza się nie tyko w tak prostym projekcie edukacyjnym, ale też w wielu o wiele bardziej zaawansowanych konstrukcjach.

Więcej informacji o układzie DS18B20 odnajdziesz w jego nocie katalogowej na stronie:

- https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf

Zerknij jeszcze na podlinkowane materiały:

- https://elportal.pl/kursy/arduinok/1629-czujnik-temperatury-18b-20-z-arduino
- https://elportal.pl/blog/sensory/4840-czujniki-temperatury-kompatybilne-zds18b20

Sterowanie diodami LED

Prawa część schematu (rysunek 1) przedstawia **dziesięć diod LED (LED1…LED10)**, z których każda została połączona z mikrokontrolerem za pośrednictwem rezystora ograniczającego prąd. Diody są podłączone do portów wejścia/wyjścia (ang. *Input/Output*, w skrócie I/O) mikrokontrolera.

Porty I/O są uniwersalne – ich funkcję (czy mają pracować jako wejścia, czy

eprasa.pl 7d549de066

jako wyjścia) określa programista w kodzie programu. W trybie wyjścia każdy z takich portów może zasilać podłączony do niego element lub – przeciwnie – stanowić dla niego „drogę powrotną” dla prądu.

W naszym przypadku źródłem napięcia dla wszystkich diod LED jest linia zasilająca oznaczona etykietą „+5V”. Napięcie to jest cały czas doprowadzone do anod diod LED, ale dopóki na katodzie nie pojawi się niższy potencjał (czyli tzw. stan niski – 0 V), prąd nie popłynie, a dioda pozostanie zgaszona.

Dopiero gdy mikrokontroler ustawi na danym wyprowadzeniu stan niski, powstaje różnica potencjałów między anodą a katodą – i dioda zaczyna świecić. Przykładowo: prąd popłynie z linii „+5V” przez diodę LED1, następnie przez rezystor R4, aż do portu PB6 (wyprowadzenie 18 mikrokontrolera US1), który w tym czasie znajduje się w stanie niskim. Stamtąd prąd trafia do masy (GND, wyprowadzenie 10), zamykając obwód.

Aby zgasić świecącą diodę, mikrokontroler musi przełączyć wyprowadzenie z powrotem na stan wysoki – czyli napięcie zbliżone do „+5V”. Wówczas różnica potencjałów pomiędzy anodą a katodą zanika, prąd przestaje płynąć, a dioda gaśnie.

Rezystory w szeregu z diodami LED

Ze schematu (rysunek 1) wynika, że z każdą diodą LED połączono szeregowo rezystor ograniczający prąd płynący przez tę diodę. Są to **rezystory oznaczone desygnatorami R4…R13**. Dlaczego to takie ważne? Co by się stało, gdyby tego rezystora nie było?

Między zasilaniem a masą układu występuje napięcie około 4,4 V – wartość ta wynika z nominalnych 4,5 V (trzy baterie AA po 1,5 V), pomniejszonych o spadek napięcia na diodzie prostowniczej D1 (około 0,4 V). W praktyce napięcie nowej baterii może sięgać nawet 1,6 V, co daje łącznie 4,8 V.

Zatem w punktach oznaczonych jako „+5V” można spodziewać się realnie około 4,4 V. W praktyce, napięcie baterii świeżo po zakupie może sięgać 1,6 V, co daje łącznie 4,8 V. Zatem w punktach oznaczonych jako „+5V” możemy spodziewać się realnie około 4,4 V.

Czy można zasilać diodę LED takim napięciem? Teoretycznie tak, ale w praktyce – absolutnie nie! Jeśli nie zastosujemy rezystora ograniczającego prąd, bardzo szybko doprowadzimy do przegrzania diody LED. Dioda zacznie się nadmiernie nagrzewać, a po chwili może ulec trwałemu uszkodzeniu: przestanie świecić, zacznie świecić znacznie słabiej niż pozostałe – albo w skrajnym przypadku… nawet wybuchnie. Dlaczego tak się dzieje? Bo przez diodę popłynie prąd znacznie większy, niż przewidział producent. A LED-y są na to bardzo wrażliwe.

Każda dioda LED ma określony prąd znamionowy – wartość, przy której świeci jasno i bezpiecznie. Jeśli prąd będzie zbyt mały – dioda będzie świecić słabo lub wcale. Jeśli zbyt duży – ulegnie uszkodzeniu. Dlatego w obwodzie zawsze powinien znaleźć się rezystor, który ograniczy prąd do bezpiecznego poziomu.

Warto wiedzieć, że zalecany prąd przewodzenia diody LED zależy od jej koloru. Wynika to z faktu, że różne kolory wymagają zastosowania różnych materiałów półprzewodnikowych – a te różnią się wartością tzw. przerwy energetycznej (ang. *bandgap*). Na przykład:

- dioda czerwona często świeci jasno już przy 10…15 mA,
- dioda zielona lub żółta potrzebuje zwykle 15…20 mA,
- diody niebieskie i białe bywają mniej czułe i wymagają prądu rzędu 20…25 mA, by świecić równie jasno.

Oznacza to, że przy tym samym prądzie diody LED różnych kolorów mogą świecić z różną intensywnością. Dzieje się tak, ponieważ kolor światła emitowanego przez diodę LED zależy od materiału półprzewodnikowego, z którego wykonano złącze P–N. Oto przykłady:

- arsenek-fosforek galu (GaAsP) – kolor czerwony (około 620…650 nm),
- fosforek galu (GaP) – kolor żółty lub żółtozielony (około 565…575 nm),
- azotek galu (GaN) lub azotek indowo-galowy (InGaN) – kolor zielony do niebieskiego (około 450…520 nm),
- azotek glinowo-galowy (AlGaN) – fiolet (poniżej 450 nm).

Jeśli chcesz zgłębić ten temat, zajrzyj do kursu podstaw elektroniki na elportalu – szczególnie do materiału: „Diody LED – napięcie diod o różnych kolorach” https://elportal.pl/kursy/podstawy-elektronikik/2030-diody-led-napiecie-diod-o-roznych-kolorach.

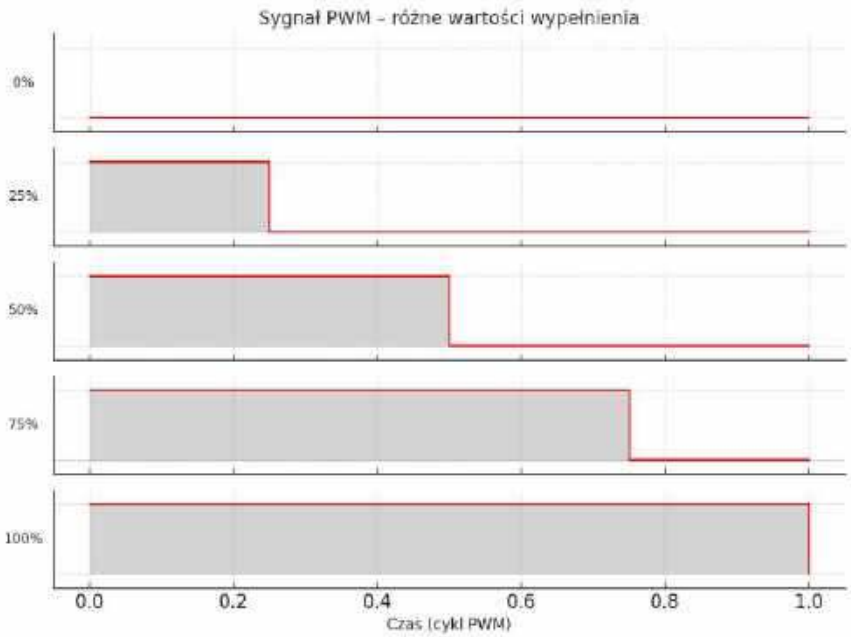
Polecam również wykład 28 pt. „Diody LED w praktyce”, opublikowany w EdW 3/2025 na stronach 58…68. Znajdziesz tam gotową tabelę, która pokazuje, jakie wartości rezystorów należy dobrać do diod różnych kolorów – w zależności od napięcia i prądu zasilania.

Wracając do *TermoEmotka*

Co można zauważyć na schemacie TermoEmotka (rysunek 1)? Mimo że zastosowano diody LED w różnych kolorach – czerwone, pomarańczowe, żółte, zielone i niebieskie – wszystkie rezystory szeregowe (R4…R13) mają jednakową wartość: 220 Ω. Czy to błąd? A może przeoczenie? Niekoniecznie.

Po uruchomieniu układu szybko zauważysz, że mikrokontroler nie tylko zapala diody w odpowiedzi na temperaturę, ale także generuje animacje świetlne. Dzięki nim *TermoEmotek* wygląda bardziej jak emocjonalny stworek niż zwykły, nudny czujnik temperatury!

Dzieje się tak dlatego, że mikrokontroler steruje diodami LED za pomocą sygnału



Rysunek 4. Sygnał PWM – różne wartości wypełnienia

eprasa.pl 7d549de066

PWM (*Pulse Width Modulation*) – czyli modulacji szerokości impulsu. Dzięki tej technice możliwe jest programowe sterowanie jasnością każdej diody LED z osobna. A skoro jasność można regulować programowo, konstruktor mógł skompensować różnice w intensywności świecenia wynikające z koloru diody LED (czyli z zastosowanego materiału półprzewodnikowego). W takim przypadku wszystkie rezystory mogą mieć jednakową wartość – pełnią wówczas jedynie rolę zabezpieczającą.

Podsumowując: identyczna wartość rezystorów (220 Ω) to najpewniej przemyślany wybór. Ułatwia montaż, upraszcza listę elementów, a dzięki sterowaniu PWM możliwe jest elastyczne dostosowanie jasności każdej diody już na poziomie programu.

Sygnał PWM

Poniższy wykres (**rysunek 4**) przedstawia, jak wygląda sygnał PWM (modulowany impulsowo) przy różnych wartościach wypełnienia: 0%, 25%, 50%, 75% i 100%.

Każdy z tych przebiegów może służyć do sterowania diodą LED. Im większe wypełnienie, tym dłużej dioda LED pozostaje w stanie „włączona" podczas każdego cyklu, co wizualnie przekłada się na jaśniejsze świecenie:

- 0% – dioda LED jest cały czas wyłączona, brak światła,
- 25% – dioda LED świeci słabo,
- 50% – dioda LED świeci ze średnią jasnością,
- 75% – dioda LED świeci jasno,
- 100% – dioda LED świeci z maksymalną jasnością (jest stale włączona).

Ponieważ w naszym układzie diody LED załączane są przez mikrokontroler stanem niskim, sytuacja wygląda odwrotnie niż w typowym przypadku:

- 100% wypełnienia (logiczne „1" przez cały czas) – dioda LED pozostaje wyłączona, brak światła,
- 75% – dioda LED świeci słabo,
- 50% – dioda LED świeci ze średnią jasnością,
- 25% – dioda LED świeci jasno,
- 0% (ciągły stan niski) – dioda LED świeci z maksymalną jasnością.

Rezystory szeregowe – ciąg dalszy

Rezystory szeregowe w układzie *TermoEmotka* chronią zarówno diody LED, jak i porty mikrokontrolera przed nadmiernym prądem – na przykład w sytuacji awaryjnej, gdy mikrokontroler ulegnie zawieszeniu i przestanie generować poprawny sygnał PWM. Gdyby w takim stanie na wyjściu stale utrzymywał się stan niski, a prąd nie był ograniczany przez rezystor, mogłoby dojść do uszkodzenia diody LED lub samego mikrokontrolera.

Znając napięcie zasilania diod LED, które zgodnie z wcześniejszymi obliczeniami wynosi 4,4 V, oraz wartość rezystora szeregowego (220 Ω), można na podstawie prawa Ohma oszacować, że maksymalny prąd w tej gałęzi (gdyby diodę LED zastąpić zwarciem) wyniósłby około 20 mA:

$$R = \frac{U}{I} \rightarrow I = \frac{U}{R} = \frac{4{,}4V}{220\Omega} = \\ = 0{,}02A = 20mA$$

Można przyjąć, że jest to bezpieczna wartość dla większości diod LED.

Warto również upewnić się, czy prąd rzędu 20 mA jest bezpieczny dla portu I/O mikrokontrolera sterującego diodą LED.

W tym celu należy otworzyć notę katalogową mikrokontrolera: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2543-AVR-ATtiny2313_Datasheet.pdf i wyszukać sekcję „Absolute Maximum Ratings".

Z tabeli wynika, że maksymalny prąd, jaki może przepłynąć przez pojedyncze wyprowadzenie (port I/O) mikrokontrolera ATtiny2313, wynosi 40 mA (**tabela 1**).

Należy pamiętać, że 40 mA to wartość graniczna – dopuszczalna tylko chwilowo – i nie jest przeznaczona do pracy ciągłej. Choć nota katalogowa mikrokontrolera ATtiny2313 nie podaje bezpośrednio zalecanej wartości prądu dla pojedynczego portu I/O, w praktyce uznaje się, że bezpieczne, długotrwałe obciążenie nie powinno przekraczać 20 mA. Taka wartość wynika z doświadczeń praktyków oraz ogólnych zaleceń producenta mikrokontrolerów AVR, który sugeruje pozostawienie marginesu bezpieczeństwa względem wartości granicznych. Zachowanie marginesu – względem granicznej wartości 40 mA – pozwala ograniczyć ryzyko przegrzewania, spadków napięcia na wyjściu czy spadku niezawodności, zwłaszcza gdy kilka wyjść jest obciążanych równocześnie.

Podsumowując: wartość 20 mA jest bezpieczna zarówno dla diod LED, jak i dla portów mikrokontrolera. W praktyce rzeczywiste prądy będą znacznie mniejsze i – jak wspomniano wcześniej – zależą zarówno od koloru diody LED (czyli materiału półprzewodnikowego użytego do jej budowy), jak również od wypełnienia sygnału PWM, którym sterowana jest dana dioda.

Absolute Maximum Ratings*

Operating Temperature	-55°C to +125°C
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Voltage on any Pin except $\overline{\text{RESET}}$ with respect to Ground	-0.5V to V_{CC}+0.5V
Voltage on $\overline{\text{RESET}}$ with respect to Ground	-0.5V to +13.0V
Maximum Operating Voltage	6.0V
DC Current per I/O Pin	40.0 mA
DC Current V_{CC} and GND Pins	200.0 mA

Tabela 1. Parametry graniczne mikrokontrolera ATtiny2313. Przedruk tabeli z noty katalogowej układu, dostępnej pod adresem: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2543-AVR-ATtiny2313_Datasheet.pdf

Animacje

Zastosowanie mikrokontrolera w prostym układzie termometru pozwoliło zaimplementować kilka animowanych trybów prezentacji wyników pomiaru temperatury. Zmiany sposobu prezentacji dokonujemy odpowiednio konfigurując zworki na złączach J1 i J2. Każda zworka służy do elektrycznego połączenia dwóch sąsiadujących pinów w złączu. Ze schematu (rysunek 1) wynika, że ustawienie zworki na złączu J1 w pozycji BAR powoduje podanie na wejście PA1 mikrokontrolera napięcia zasilania (etykieta „+5V"), a ustawienie jej w pozycji DOT podłączy wspomniane wyprowadzenie mikrokontrolera do masy (etykieta „GND").

eprasa.pl 7d549de066

Analogicznie, ustawienie zworki na złączu J2 w pozycji ECO powoduje podanie napięcia zasilania na wejście PA0, natomiast pozycja NOR łączy to wejście z masą.

Dzięki temu, sprawdzając napięcie na wejściach PA1 (wyprowadzenie 4) i PA0 (wyprowadzenie 5) mikrokontroler może się zorientować w jaki sposób ustawione są zworki J1 oraz J2 i w adekwatny do ich ustawień sposób sterować diodami LED.

Od strony mechanicznej złącza J1 i J2 to trzypinowe, jednorzędowe listwy typu goldpin o rastrze 2,54 mm. Na każde z nich można nałożyć zworkę w jednej z dwóch możliwych pozycji.

Zworka na złączu J1 umożliwia wybór sposobu wyświetlania temperatury:

- w pozycji **DOT** (kropka) świeci tylko **jedna dioda LED**, wskazująca aktualną temperaturę,
- w pozycji **BAR** (pasek) świeci **słupek diod** – od najniższej temperatury aż do tej, która odpowiada aktualnej wartości.

Zworka na złączu **J2** decyduje o trybie pracy diod:

- w pozycji **ECO** (tryb energooszczędny) diody **pulsują**,
- w pozycji **NOR** (normalny) diody świecą **ciągłym światłem**.

Montaż układu

Montaż układów elektronicznych warto rozpoczynać od komponentów o najniższym profilu – takich jak rezystory, diody czy małe kondensatory – a kończyć na tych najwyższych, jak złącza, przekaźniki czy duże elektrolity. Taka kolejność ułatwia pracę: płytka stabilnie leży na stole, a niskie elementy nie są zasłaniane przez wyższe, co pozwala na wygodne lutowanie i estetyczny montaż.

Choć ogólna zasada mówi, by zaczynać od najniższych komponentów i przechodzić stopniowo do wyższych, w praktyce zdarzają się wyjątki. Czasem trudno jednoznacznie ocenić, czy wyższy jest kondensator, czy dioda LED. W takich przypadkach warto kierować się zdrowym rozsądkiem i uwzględnić wygodę pracy. Dla zachowania estetyki i precyzji montażu, diody LED często lepiej jest przylutować wcześniej – zanim dostęp do ich wyprowadzeń utrudnią sąsiednie elementy o podobnych lub większych gabarytach. Taką zdroworozsądkową kolejność proponuję w opisie poniżej.

Montaż rezystorów

Zgodnie ze schematem i wykazem elementów w zestawie powinno znajdować się trzynaście rezystorów: dziesięć sztuk o wartości 220 Ω (zamontuj je na pozycjach R4…R13), dwie sztuki o wartości 4,7 kΩ (R1 i R2) oraz jeden rezystor 0 Ω – ten ostatni należy zamontować na pozycji R3.

Na początku warto podzielić rezystory na trzy grupy (220 Ω, 4,7 kΩ oraz 0 Ω), kierując się ich wyglądem – przede wszystkim kolorowym kodem paskowym. Następnie można odczytać wartości dla każdej grupy, posługując się kodem paskowym lub multimetrem. W pierwszej metodzie przyda się dobry wzrok oraz ściąga z zestawieniem kolorów pasków i odpowiadających im wartości. Druga metoda wydaje się nieco prostsza – pod warunkiem, że masz do dyspozycji multimetr uniwersalny i potrafisz się nim posługiwać.

Gdyby stanowiło to problem, skorzystaj z instrukcji dostępnej na stronie https://elportal.pl/do-pobrania – znajdziesz tam dokument „Pomiar wartości rezystorów za pomocą multimetru", przygotowany jako materiał uzupełniający do EdW 11/2024. Warto mieć go pod ręką – można go wydrukować i traktować jako praktyczną ściągę podczas każdego pomiaru.

Rezystor nie ma biegunowości – działa tak samo niezależnie od kierunku przepływu prądu. Dzięki temu jego montaż na płytce nie wymaga uwzględniania orientacji. Zgadzać się muszą jedynie lokalizacja i wartość montowanego rezystora. Kierunek montażu pozostaje dowolny. Na **fotografii 3** pokazano poprawnie zamontowane rezystory.

Fotografia 3. Rezystory są elementami bez polaryzacji i montujemy je na odpowiednich pozycjach, zgodnie z wykazem elementów, w dowolnym kierunku. Wartość każdego z rezystorów warto dla pewności zmierzyć za pomocą multimetru, lub sprawdzić, czy kolejność kolorów kodu paskowego jest zgodna z powyższą fotografią

Podczas naszego poprzedniego spotkania (EdW 7/2025, strona 85, śródtytuł *Montaż przyjazny naprawom*) zwróciłem uwagę na to, w jaki sposób warto lutować do płytki komponenty przewlekane, aby w razie potrzeby można je było łatwo wymienić. Podczas montażu warto mieć z tyłu głowy, że któryś z komponentów może się w przyszłości uszkodzić – albo już na etapie składania okaże się, że został użyty niewłaściwy element i konieczna będzie jego wymiana. Od tego, jak zamontujemy dany komponent, zależy, czy ewentualna naprawa okaże się udręką, czy raczej czystą przyjemnością. Dlatego będę do tego tematu regularnie wracał – wierzę, że konsekwentnie podpowiadany sposób montażu „przyjaznego naprawom" wejdzie Ci w nawyk, a każda przyszła wymiana elementu w zbudowanych przez Ciebie zestawach będzie szybka i bezproblemowa.

Jak wspominałem ostatnio, zaginanie wyprowadzeń elementów THT (czyli przeznaczonych do montażu przewlekanego) może wydawać się wygodne – stabilizuje je w otworach i zapobiega wypadaniu przed lutowaniem. Niestety, taki sposób montażu znacznie utrudnia późniejszy demontaż uszkodzonych lub błędnie zamontowanych komponentów. Szczególnie kłopotliwe bywa wylutowanie diod LED z twardymi wyprowadzeniami – często kończy się to uszkodzeniem samego elementu, a czasem nawet płytki drukowanej.

Aby tego uniknąć, po umieszczeniu elementu w otworach warto jego zagięte piny wyprostować przed lutowaniem – tak, by znów były ustawione prostopadle do płytki. Komponent nie wypadnie, bo po odwróceniu całości leży oparty o stół i przytrzymywany jest przez samą płytkę.

Taka technika montażu znacznie ułatwia ewentualną wymianę elementu – skrócone, niezablokowane piny łatwo przechodzą przez otwory po podgrzaniu lutu.

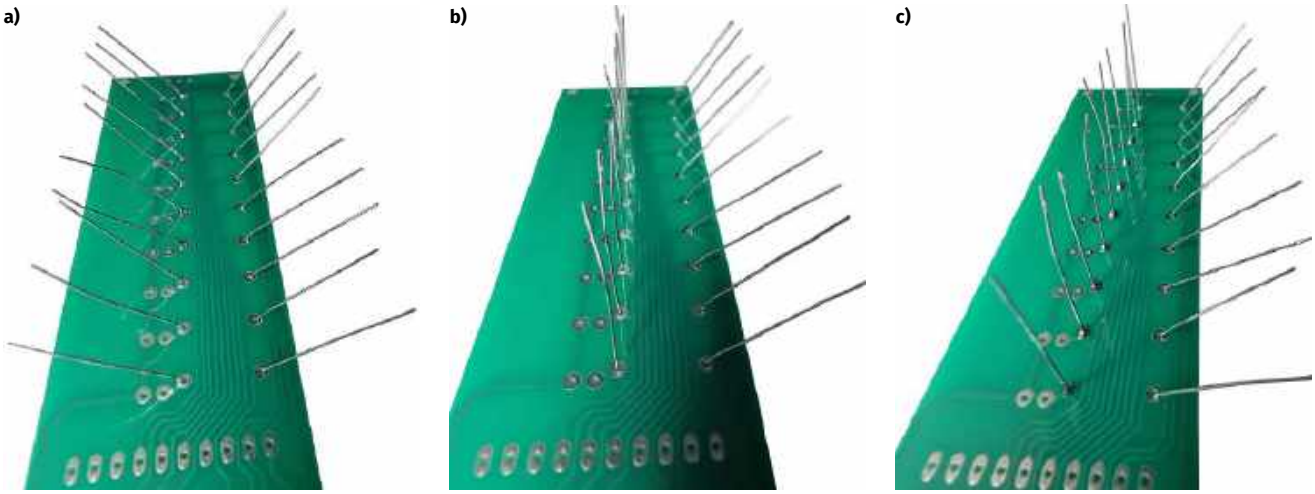
Na **fotografiach 4a**, **4b**, **4c** pokazano pierwsze trzy etapy zalecanego montażu rezystorów.

Nadmiar wyprowadzeń obetnij przy użyciu obcinaczek. Pamiętaj, aby nie ścinać lutu – cięcie wykonuj dopiero za miejscem, w którym kończy się spoina i wystaje samo wyprowadzenie (**rysunek 5**).

Montaż diody prostowniczej

Ponieważ każda dioda prostownicza przewodzi prąd tylko w jednym kierunku (w przeciwnym kierunku przepuszcza jedynie śladowy prąd wsteczny), wlutuj ją tak, aby srebrny pasek na obudowie diody był

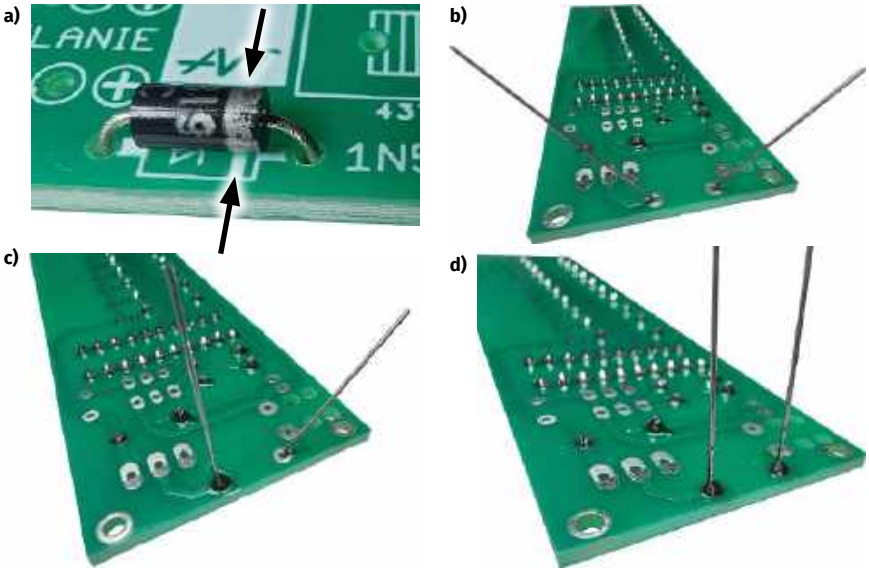
eprasa.pl 7d549de066



Fotografia 4. a) rezystory obostronnie zagięte, celem bezpiecznego obrócenia płytki o 180° i oparcia jej o blat; b) lewy rząd nóżek odgięty i prostopadły do płytki PCB, gotowy do przylutowania; c) lewy rząd prostopadłych do płytki nóżek rezystorów po przylutowaniu. Pozostaje postawić do pionu pozostałe wyprowadzenia i dopiero na końcu je przylutować

Rysunek 5. Właściwe miejsce cięcia nadmiaru wyprowadzeń po przylutowaniu komponentu. Po wykonaniu cięcia spoina powinna pozostać nienaruszona

zwrócony w tym samym kierunku, co biały pasek widoczny na symbolu diody na płytce PCB (**fotografia 5a**). **Fotografie 5b**, **5c** i **5d** pokazują, jak zamontować diodę D1 w sposób umożliwiający jej łatwą wymianę w przyszłości.



Fotografia 5. Poprawny montaż diody prostowniczej D1 na płytce PCB: a) kierunek pasków na diodzie oraz nadrukowanym na płytce symbolu diody musi być zgodny; etapy b), c) i d) pokazują, jak zamontować diodę D1 w sposób umożliwiający jej łatwą wymianę w przyszłości

Montaż podstawki pod układ scalony US1

Kolejnym elementem do zamontowania jest podstawka pod układ scalony. Zasada, jak zwykle, znacznik kierunku w podstawce (wybranie w podstawce) musi pokrywać się ze wskaźnikiem kierunku nadrukowanym białą farbą na warstwie opisowej płytki PCB (**fotografia 6a**). Po włożeniu podstawki do płytki PCB upewnij się, że wszystkie wyprowadzenia przeszły przez otwory, a następnie rozegnij na boki dwa skrajne wyprowadzenia po przekątnej, by podstawka nie wypadła z płytki po jej odwróceniu (**fotografia 6b**). Następnie przylutuj wszystkie prostopadłe do płytki wyprowadzenia, a po ich przylutowaniu wyprostuj (ustaw pionowo względem płytki) dwa pozostałe (**fotografia 6c**). Na koniec przylutuj dwa wyprostowane wyprowadzenia do płytki (**fotografia 6d**).

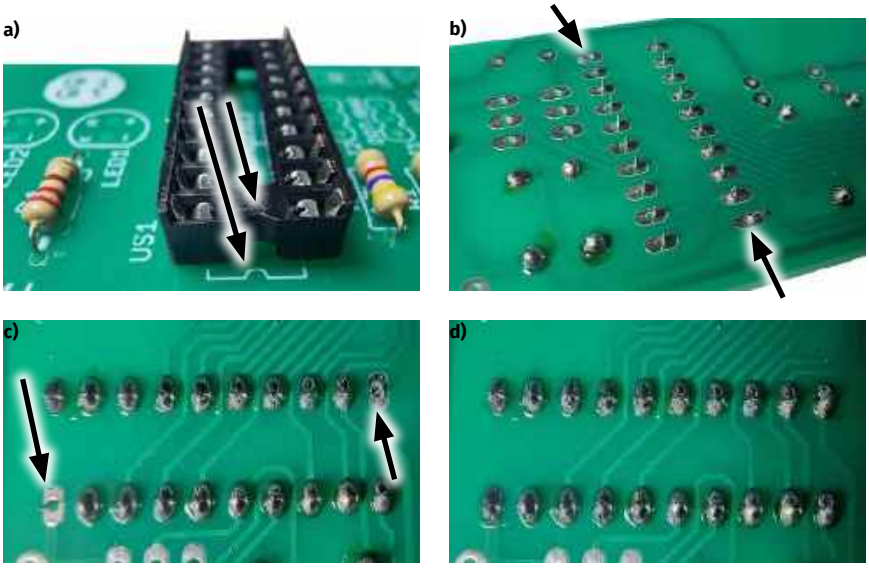
Podczas lutowania pinów do płytki staraj się, by pomiędzy lutowanymi wyprowadzeniami nie powstały niechciane połączenia, czyli zwarcia, zwane również mostkami lutowniczymi. Jeśli podczas lutowania pojawią się zwarcia, najłatwiej będzie, trzymając płytkę jedną ręką, ustawić ją pod kątem prostym względem blatu. Następnie należy ponownie podgrzać połączone pola lutownicze oraz przy pomocy grotu lutownicy i siły grawitacji pozwolić nadmiarowi cyny spłynąć na blat. Dzięki temu uwolnisz pady podstawki od zwarć.

Montaż diod LED

Podczas montażu diod LED należy zachować szczególną ostrożność, ponieważ każda dioda jest elementem spolaryzowanym. Każda z diod posiada anodę, którą należy podłączyć do dodatniego potencjału zasilania oraz katodę, którą podłącza się do ujemnego bieguna zasilania. W przypadku diod LED anoda jest zawsze wyprowadzeniem dłuższym a katoda jest krótsza (**rysunek 6**).

Do płytki PCB należy przylutować dziesięć diod LED. Montujemy je na pozycjach LED1…LED10. Anody (dłuższe wyprowadzenia diod LED) należy zamontować do otworów oznaczonych literą „A” lub znakiem „+”. Krótsze katody muszą trafić do otworów sąsiednich, oznaczonych literą „K” lub znakiem „–”, umiejscowionym przy fragmentach okręgów odwzorowujących obwody diod LED zastąpionych linią prostą (**rysunek 7** oraz **fotografia 8**).

eprasa.pl 7d549de066



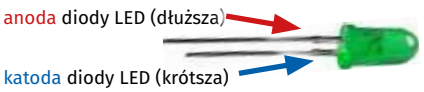
Fotografia 6. a) znacznik kierunku w obudowie podstawki musi być skierowany zgodnie ze wskaźnikiem kierunku nadrukowanym na płytce PCB; b) po włożeniu podstawki do płytki PCB upewnij się, że wszystkie wyprowadzenia przeszły przez otwory, a następnie rozegnij na boki dwa skrajne wyprowadzenia po przekątnej, aby podstawka nie wypadła z płytki po jej odwróceniu; c) przylutuj wszystkie prostopadłe do płytki wyprowadzenia, a po ich przylutowaniu wyprostuj (ustaw pionowo) dwa pozostałe; d) przylutuj wyprostowane wyprowadzenia do płytki

Fotografie 7b, **7c** i **7d** pokazują, jak zamontować diody LED D1…D10 w sposób umożliwiający ich łatwą wymianę w przyszłości.

Nadmiar wyprowadzeń obetnij przy użyciu obcinaczek. Pamiętaj, aby nie ścinać lutu – cięcie wykonuj dopiero za miejscem, w którym kończy się spoina i wystaje samo wyprowadzenie (**rysunek 5**).

Przykład poprawnie zamontowanej diody LED pokazano na **fotografii 8**.

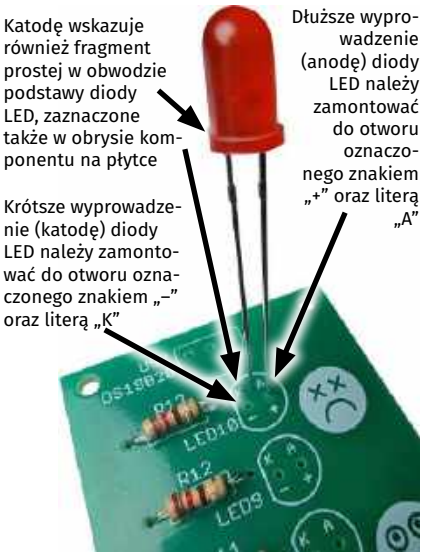
Należy pamiętać, że jeśli przylutujemy diodę LED w niewłaściwym kierunku, nie będzie ona świeciła, a ponadto, na skutek wymuszonego przepływu pądu wstecznego może ona ulec trwałemu uszkodzeniu. Zdarza się, że gdy zorientujemy się, że diodę LED zamontowaliśmy w sposób nieprawidłowy, po jej wylutowaniu i ponownym przylutowaniu, już we właściwym kierunku, dioda wciąż nie będzie chciała świecić. Dlatego po wylutowaniu błędnie zamontowanej diody LED warto sprawdzić jej stan przy użyciu multimetru – ustawionego w tryb pomiaru diod lub testu ciągłości obwodu – aby upewnić się, że element nadal działa poprawnie. W tym celu, po ustawieniu wspomnianego trybu pracy multimetru, do anody diody LED przykładamy czerwoną jego sondę a do katody przykładamy sondę czarną (**fotografia 9**). Jeśli w tym momencie dioda LED się zaświeci, oznacza to, że jest ona sprawna, i możemy przylutować ją ponownie, tym razem pamiętając o właściwym kierunku montażu.



Rysunek 6. Opis wyprowadzeń diody LED („plusowe" wyprowadzenie dłuższe, „minusowe" krótsze)

Montaż kondensatora ceramicznego

Elementem sugerowanym do zamontowania w następnej kolejności jest kondensator C2 o wartości 100 nF. Jest on elementem niespolaryzowanym (symetrycznym), w związku z czym jego kierunek montażu jest dowolny. Nawet jeśli w zestawie znajduje się tylko jeden taki kondensator, warto sprawdzić, czy zgadza się jego wartość.



Rysunek 7. Poprawny sposób montażu diody LED w płytce PCB z uwzględnieniem polaryzacji. Dłuższe wyprowadzenie (anoda) powinno zostać umieszczone w otworze oznaczonym znakiem „+" oraz literą „A", natomiast krótsze wyprowadzenie (katoda) – w otworze oznaczonym znakiem „–" i literą „K". Katodę można dodatkowo rozpoznać po płaskim ścięciu na podstawie obudowy diody, odpowiadającym zaznaczeniu w obrysie komponentu na płytce

Na obudowie kondensatora o wartości 100 nF (**fotografia 10**) znajduje się napis „104". Jednak w zależności od producenta kondensatora równie dobrze mógłby się tam znaleźć napis, np. „µ1" lub „100n".

- W przypadku opisu „µ1" przedrostek „mikro" został umieszczony jako przecinek pomiędzy (niewidocznym) zerem oraz jedynką („µ1" –> „0µ1" –> „0,1 µ"). Ponieważ mówimy o kondensatorach, a więc o pojemności, których jednostką jest F (Farad), domyślamy się, że „0,1 µ" –> „0,1 µF". Żeby z wartości podanej w mikrofaradach uzyskać wartość w nanofaradach, należy wartość w mikrofaradach pomnożyć przez tysiąc.
- W przypadku opisu pojemności (której jednostką podstawową jest Farad) „100 n" literka „n" oznacza, że wartość została podana w nanofaradach. Mamy zatem 100 nF.
- W przypadku opisu „104" brak literki „n" oznacza, że wartość podana jest w pikofaradach. Jednak ostatnia pozycja wskazuje na liczbę zer, którą należy dodać do liczby poprzedzającej. Mamy tu więc 10 i 4 zera pikofaradów, czyli: 100000 pF. Żeby otrzymać wynik w nanofaradach, trzeba pikofarady podzielić przez tysiąc. Otrzymamy zatem wynik 100 nF.

Innymi słowy, oznaczenia „µ1", „100n" oraz „104" opisują dokładnie tę samą wartość: 100 nF.

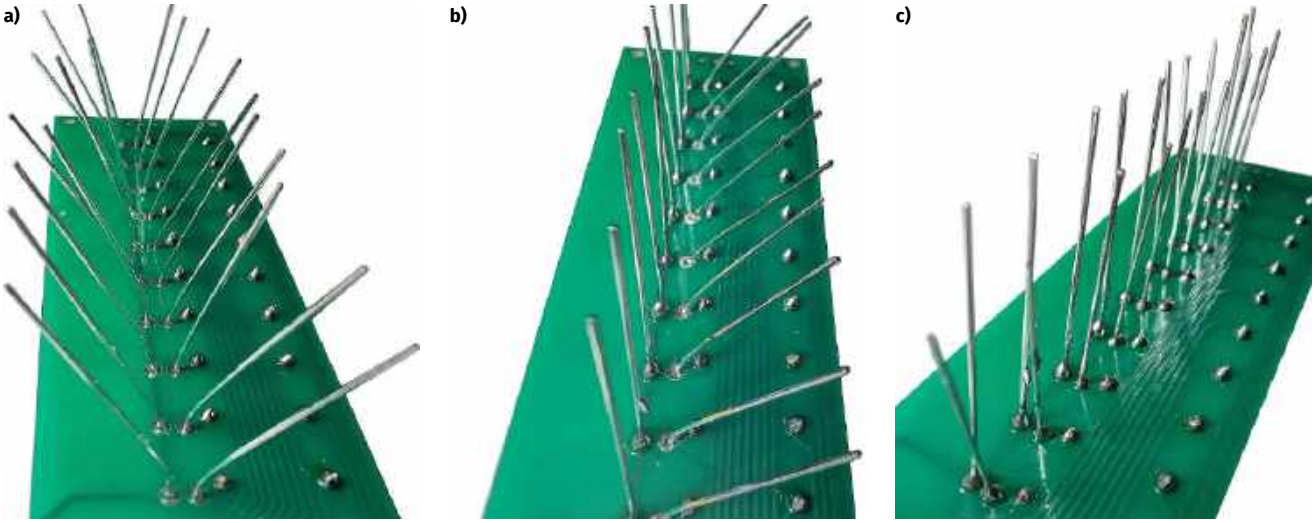
Fotografie 10b, **10c** i **10d** pokazują, jak zamontować kondensator C2, aby w przyszłości można go było łatwo wymienić.

Nadmiar wyprowadzeń obetnij przy użyciu obcinaczek. Pamiętaj, aby nie ścinać lutu – cięcie wykonuj dopiero za miejscem, w którym kończy się spoina i wystaje samo wyprowadzenie (rysunek 5).

Montaż złączy typu goldpin

Do zestawu dołączono pojedynczą listwę pinów typu goldpin o rastrze 2,54 mm (**fotografia 11a**). Tymczasem na płytce, na pozycjach J1 oraz J2 należy zamontować dwie oddzielne listwy, po trzy piny każda (**fotografia 11d**). Oznacza to, że sześciopinową listwę przed montażem trzeba podzielić na dwie równe części. Najlepiej dokonać tego przy użyciu kombinerek płaskich. Elementy uzyskane po podziale listwy pokazano na **fotografii 11b**.

eprasa.pl 7d549de066



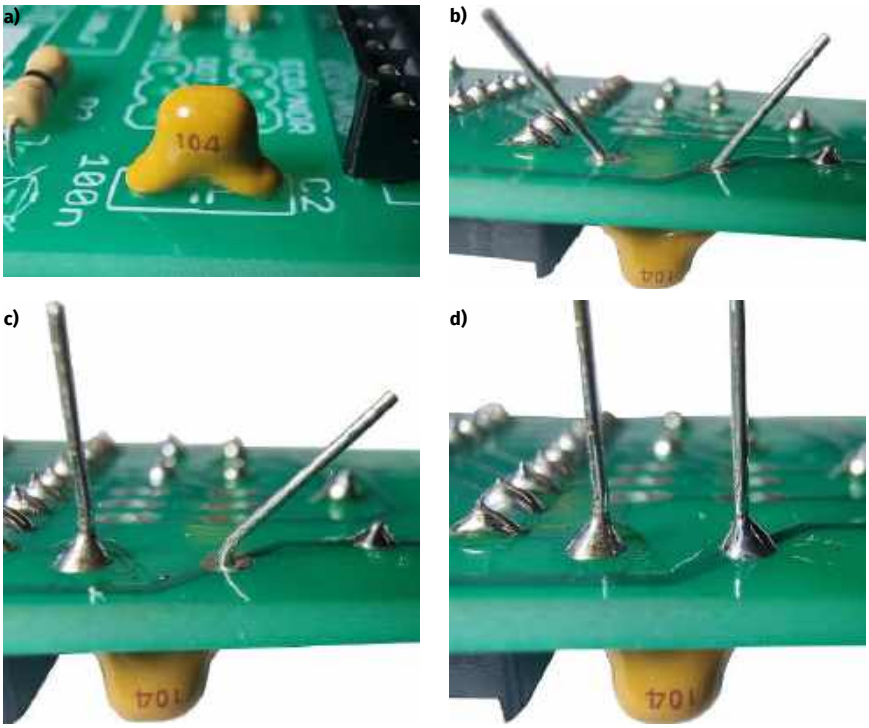
Fotografia 7. Zalecany sposób montażu diod LED, który umożliwi ich łatwą wymianę w przypadku uszkodzenia lub omyłkowego zamontowania w odwrotnym kierunku: a) rozegnij wyprowadzenia diod LED w taki sposób, by dało się bezpiecznie odwrócić płytkę do góry nogami; b) po ustawieniu płytki na blacie, odegnij wszystkie wyprowadzenia jednego z rządków do pionu, a następnie przylutuj je prostopadle do płytki; c) ustaw do pionu i przylutuj prostopadle do płytki pozostałe wyprowadzenia diod LED

Montaż złącza typu goldpin wymaga odrobiny cierpliwości. Krótsze piny należy umieścić w otworach płytki. Piny tego złącza są zbyt grube i jednocześnie zbyt krótkie, by dało się je zagiąć po włożeniu, dlatego przed przylutowaniem trzeba je w jakiś sposób unieruchomić. Aby nie poparzyć sobie palców, warto przed lutowaniem założyć na oba złącza zworki dołączone do zestawu (**fotografia 11c**), a następnie całość przylutować do płytki jako złożenie (**fotografia 11e**).

Złożenia można teraz chwycić za boki i ustawić na płytce. Złożenia te montujemy po kolei, jedno na pozycji J1, drugie na pozycji J2 (**fotografia 11d**). Montując każdy podzespół, najpierw przylutuj jedno jego wyprowadzenie – dzięki temu złącze pozostanie na miejscu. Upewnij się, że komponent jest ustawiony prostopadle do powierzchni PCB, a następnie ze spokojem przylutuj pozostałe wyprowadzenia. Jeśli potrzebujesz pomocy, poproś kogoś w pobliżu, by przytrzymał element podczas lutowania. Pamiętaj, aby trzymać komponent wyłącznie za boki – naciskając go od góry palcem, łatwo poparzyć się o wystające metalowe piny. Na **fotografii 11e** pokazano poprawnie

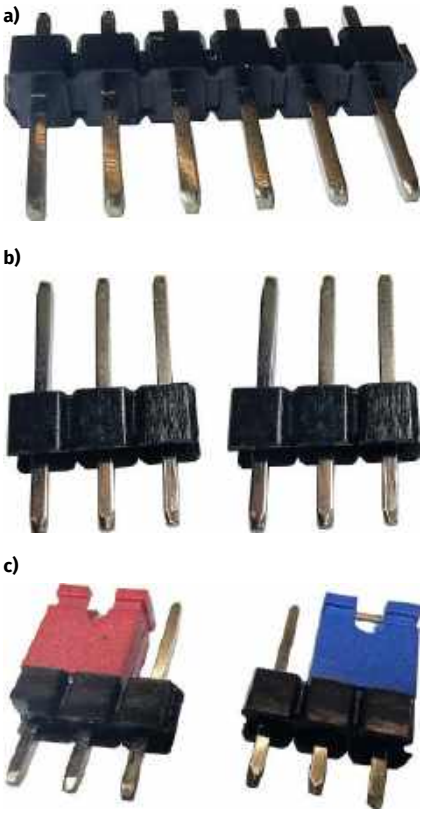
Fotografia 8. Przykład poprawnie zamontowanych diod LED. Płaskie ścięcia na obwodach diod LED muszą pokrywać się z fragmentem linii prostej w obrysie komponenty zaznaczonym na płytce

Fotografia 9. Sprawdzanie diody LED za pomocą multimetru ustawionego na testowanie 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

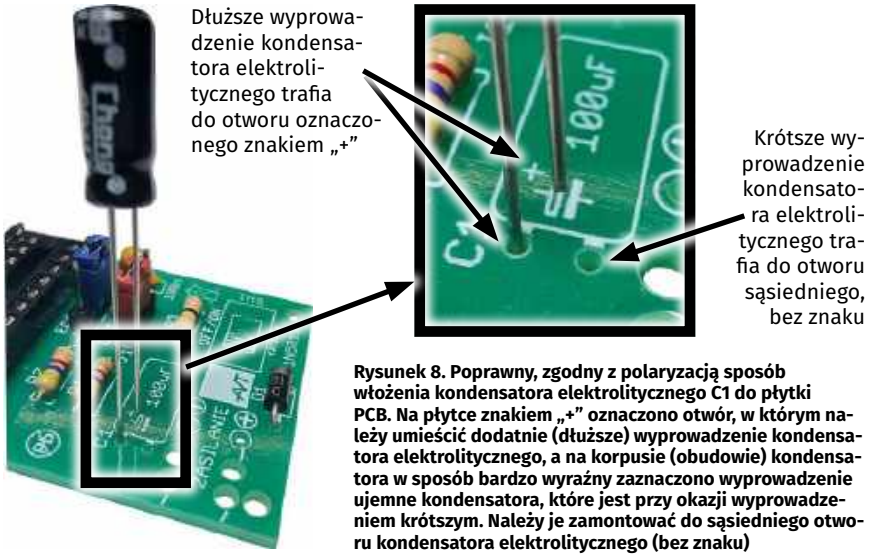


Fotografia 10. Montaż kondensatora ceramicznego C2: a) kierunek montażu jest obojętny. Na obudowie kondensatora widać napis „104", informujący o pojemności 10 i 4 zera pikofaradów (100 000 pF), czyli 100 nF; b) rozegnij lekko wyprowadzenia, aby komponent nie wypadł po odwróceniu płytki do góry nogami; c) oprzyj płytkę o blat, a następnie wyprostuj do pionu jedno z wyprowadzeń i je przylutuj; d) wyprostuj do pionu i przylutuj drugie wyprowadzenie

eprasa.pl 7d549de066



Fotografia 11. Montaż złączy ze zworkami: a) ponieważ do zestawu dołączono pojedynczą listwę sześciopinową, b) należy ją rozłamać na dwa elementy; aby nie poparzyć sobie palców podczas lutowania tych elementów do płytki c) warto nałożyć na te złącza zworki; d) tak przygotowane złącza przylutuj na pozycjach J1 oraz J2; by uzyskać e) powyższy efekt końcowy montażu



Rysunek 8. Poprawny, zgodny z polaryzacją sposób włożenia kondensatora elektrolitycznego C1 do płytki PCB. Na płytce znakiem „+” oznaczono otwór, w którym należy umieścić dodatnie (dłuższe) wyprowadzenie kondensatora elektrolitycznego, a na korpusie (obudowie) kondensatora w sposób bardzo wyraźny zaznaczono wyprowadzenie ujemne kondensatora, które jest przy okazji wyprowadzeniem krótszym. Należy je zamontować do sąsiedniego otworu kondensatora elektrolitycznego (bez znaku)

przylutowane do płytki złącza J1 oraz J2 z nałożonymi zworkami.

Po zamontowaniu obu podzespołów zworki powinny dać się w razie potrzeby bez dużej siły zsunąć ze złączy.

Montaż kondensatora elektrolitycznego

W prezentowanym zestawie znajdziemy tylko jeden kondensator elektrolityczny, oznaczony na schemacie i płytce drukowanej symbolem C1. Jego pojemność to 100 µF – wartość tę można odczytać bezpośrednio z obudowy, obok informacji o dopuszczalnym napięciu pracy. W moim egzemplarzu trafił się kondensator o parametrach 100 µF/25 V.

Rola napięcia roboczego kondensatora była już wielokrotnie omawiana podczas wcześniejszych spotkań. Ponieważ jednak każdy odcinek ma być samodzielną i kompletną całością, pozwolę sobie jeszcze raz przypomnieć kilka istotnych informacji.

Najważniejszym parametrem kondensatora z punktu widzenia działania układu jest jego pojemność – wyrażona w mikrofaradach – to ona wpływa na zachowanie obwodu. Napięcie robocze (tutaj: 25 V) określa natomiast górną granicę napięcia, jakie można bezpiecznie przyłożyć do kondensatora, bez ryzyka jego uszkodzenia. Nasz układ pracuje przy napięciu zasilania rzędu 4,5 V, więc zapas bezpieczeństwa jest bardzo duży.

Możemy zatem spokojnie zastosować kondensator o wyższym napięciu dopuszczalnym – np. 35 V lub 50 V – jeśli taki akurat mamy pod ręką. **Niedopuszczalne natomiast jest stosowanie kondensatorów, których napięcie pracy jest niższe od napięcia występującego w układzie. Może to prowadzić do awarii, a nawet (w przypadku kondensatorów elektrolitycznych) do ich wybuchu. Z tego powodu zawsze należy używać okulary ochronne przy pierwszym uruchamianiu układu – nawet jeśli układ tej zasilany jest z baterii.** Trzeba też mieć na uwadze, że kondensatory przystosowane do pracy przy wyższych napięciach mają zwykle większe gabaryty. Należy więc upewnić się, że taki element fizycznie zmieści się na płytce.

Podsumowując: zachowujemy wymaganą pojemność, dopuszczalne napięcie może być wyższe niż wymagane, ale nigdy niższe.

Kondensator elektrolityczny, jak zapewne pamiętasz, jest elementem spolaryzowanym i, podobnie jak ma to miejsce w przypadku diod LED, tu również dłuższa nóżka nowego (nieprzyciętego jeszcze) elementu jest wyprowadzeniem dodatnim (+) a krótsza ujemnym (–). Poprawny montaż kondensatora elektrolitycznego C2 na płytce PCB pokazano na **fotografii 12a**.

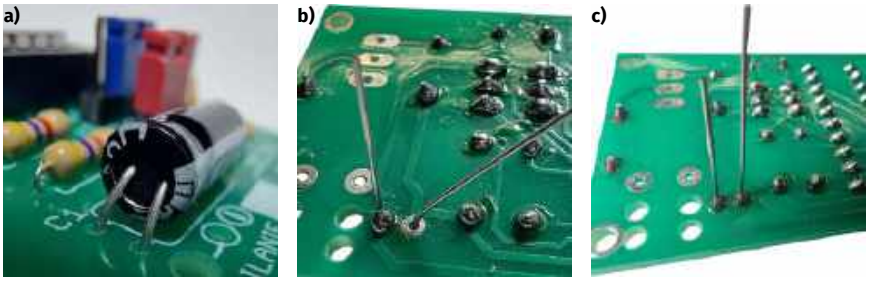
Obrys komponentu na warstwie opisowej PCB (prostokąt zamiast okręgu) sugeruje, że zamysłem projektanta był montaż poziomy kondensatora, dlatego – zgodnie z takim zamysłem – kondensator ten warto zamontować w pozycji leżącej. Poprawnie zamontowany kondensator elektrolityczny pokazano na fotografii 12a.

Fotografie 12b i **12c** pokazują, jak zamontować kondensator C1 w sposób umożliwiający jego łatwą wymianę w przyszłości (lutowanie wyprowadzeń prostopadle do PCB).

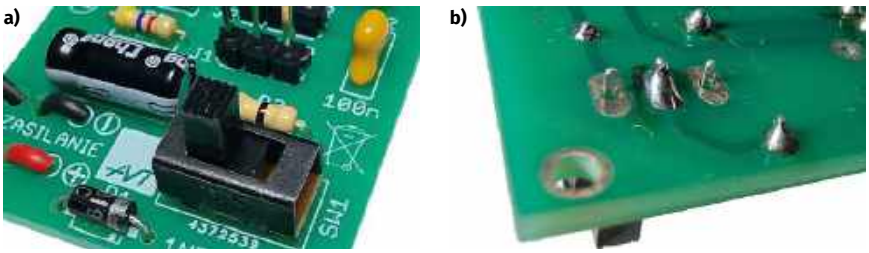
Montaż włącznika zasilania

Pora na zamontowanie przełącznika zasilania, opisanego na schemacie i PCB jako SW1. Przełącznik tego typu łączy swój pin środkowy z jednym z dwóch skrajnych, w którego kierunku jest w danym momencie skierowany hebelek przełącznika. Z uwagi na taką konstrukcję, kierunek montażu

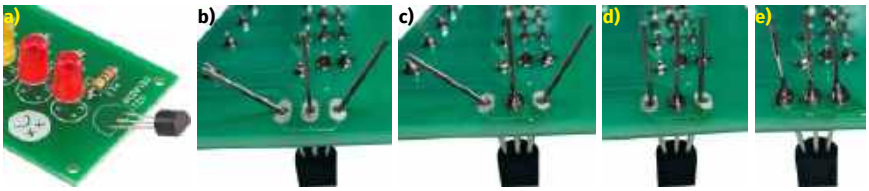
eprasa.pl 7d549de066



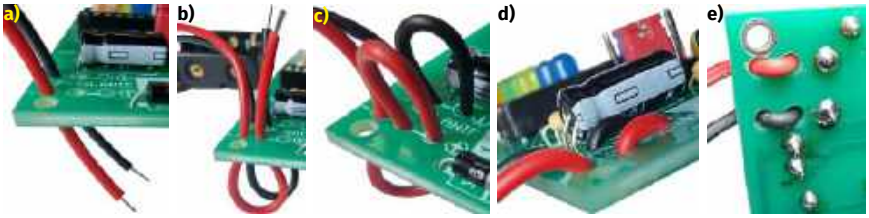
Fotografia 12. Montaż kondensatora elektrolitycznego C1: pamiętając o konieczności zachowania właściwej polaryzacji: a) zamontuj kondensator na leżąco; b) rozegnij lekko jego wyprowadzenia, aby nie wypadł po odwróceniu płytki do góry nogami, następnie odegnij do pionu jedno z wyprowadzeń i je przylutuj; c) odegnij do pionu i przylutuj drugie wyprowadzenie



Fotografia 13. a) poprawnie zamontowany przełącznik SW1; b) zanim przylutujesz wszystkie wyprowadzenia, przylutuj w pierwszej kolejności pin środkowy, i sprawdź czy komponent przylega prostopadle do płytki. Jeśli wszystko jest w porządku przylutuj dwa pozostałe wyprowadzenia



Fotografia 14. Zalecany sposób montażu czujnika temperatury, który umożliwia jego łatwą wymianę w przypadku uszkodzenia: a) umieść element w płytce zgodnie z obrysem – zarówno komponent, jak i obrys na PCB mają w widoku z góry kształt litery „D"; b) rozegnij skrajne wyprowadzenia czujnika w taki sposób, by dało się bezpiecznie odwrócić płytkę do góry nogami; c) przylutuj środkowe wyprowadzenie w sposób prostopadły do płytki; d) wygnij skrajne wyprowadzenia prostopadle do płytki; e) przylutuj skrajne wyprowadzenia elementu



Fotografia 15. Kabelki złącza baterii należy: a) przeprowadzić przez otwory pomocnicze od strony komponentów; b) patrząc „od spodu", przełożyć je przez kolejną parę otworów pomocniczych; c) włożyć kabelki do odpowiednich pól lutowniczych na płytce PCB i przylutować je; d) pozbyć się pętli przewodów po stronie komponentów, wyciągając kabelki możliwie jak najbliżej do dołu; e) pozbyć się pętli przewodów po stronie lutowania, wyciągając kabelki jak najwyżej ku górze

tych elementów nie ma żadnego znaczenia. Przełącznik – podobnie jak złącza goldpin – ma sztywne piny, które nie nadają się do wyginania. Dlatego podczas lutowania trzeba przytrzymać go ręką albo poprosić o pomoc opiekuna, którego – mam nadzieję – masz zawsze gdzieś w pobliżu. Podczas montażu warto przylutować środkowy pin do płytki PCB (**fotografia 13b**), a dopiero po upewnieniu się, że komponent dobrze przylega do jej powierzchni, przylutować pozostałe. Poprawnie zamontowany przełącznik SW1 pokazano na **fotografii 13a**.

Montaż czujnika temperatury

Do zamontowania pozostał czujnik temperatury – układ DS18B20, oznaczony na płytce jako US2. Jest on zamknięty w obudowie TO-92, takiej samej jak wiele tranzystorów, z którymi miałeś już do czynienia. Zanim przylutujesz układ do płytki, upewnij się, że to na pewno czujnik temperatury, a nie tranzystor. Sprawdź oznaczenie na obudowie (rysunek 3) a następnie zamontuj go zgodnie z instrukcją pokazaną na **fotografii 14**. **Fotografie 14b**, **14c**, **14d** i **14e** przedstawiają zalecany sposób montażu czujnika, który w razie potrzeby ułatwi jego późniejszą wymianę.

Nadmiar wyprowadzeń obetnij przy użyciu obcinaczek. Pamiętaj, aby nie ścinać lutu – cięcie wykonuj dopiero za miejscem, w którym kończy się spoina i wystaje samo wyprowadzenie (rysunek 5).

Jeśli ciekawi Cię, dlaczego na powyższych rysunkach występuje ścieżka, która łączy ze sobą skrajne wyprowadzenia czujnika, spójrz na schemat (rysunek 1) i zerknij do opisu teoretycznego powyżej. Ścieżka między tymi wyprowadzeniami ma związek z przyjętą „pasożytniczą" konfiguracją zasilania. W tej konfiguracji możesz właściwie zamontować czujnik w dowolnym kierunku – nawet jeśli obrócisz go o 180°, układ nadal będzie działał tak samo.

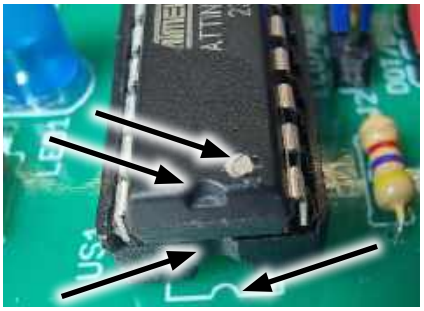
Fotografia 16. Poprawne podłączenie kabli na przykładzie multimetru DT-830B, ustawionego na funkcję woltomierza napięć stałych

Fotografia 17. Pomiar na zaciskach 20 („plus") i 10 („minus") podstawki pod mikrokontroler ATTiny2313 wskazał poprawne napięcie baterii (bez znaku „–", który sugerowałby błędną polaryzację). Można teraz odłączyć zasilanie i zamontować mikrokontroler w podstawce

Montaż koszyczka baterii

Na koniec pozostaje podłączyć do płytki PCB koszyczek na trzy baterie AA (popularne „duże paluszki"). Tak jak w innych zestawach serii AVTEDU, kabelki najpierw przeciągamy przez dwie pary otworów pomocniczych, pełniących funkcję stabilizującą przewody

eprasa.pl 7d549de066



Fotografia 18. Przed zamontowaniem układu scalonego w podstawce należy upewnić się, że znaczniki kierunku montażu – na płytce, w podstawce i na układzie scalonym – znajdują się w tej samej pozycji

w miejscu zamocowania. Dzięki takiemu rozwiązaniu połączenie będzie miało lepszą wytrzymałość mechaniczną – kabelki nie oderwą się tak szybko od płytki. Przewody należy wprowadzić w te otwory, tym razem od strony komponentów (**fotografia 15a**). Następnie, patrząc „od spodu", należy ponownie przewlec oba kabelki przez kolejną parę otworów pomocniczych (**fotografia 15b**). Na końcu, uprzednio pozbawione izolacji, skręcone i pocynowane końcówki należy umieścić w otworach docelowych (**fotografia 15c**) i przylutować. Czerwony kabelek powinien trafić do otworu oznaczonego znakiem „+", natomiast czarny kabelek należy zamontować do otworu oznaczonego znakiem „–". Na koniec należy skrócić pętle przewodów – zarówno po stronie komponentów (**fotografia 15d**) jak i od strony lutowania (**fotografia 15e**).

Montaż mikrokontrolera w podstawce

Ponieważ w podstawce zostanie umieszczony mikrokontroler, na tym etapie należy koniecznie sprawdzić, czy na odpowiednich pinach zasilających pojawia się właściwe napięcie po podłączeniu baterii. Ten pomiar trzeba wykonać jeszcze przed włożeniem mikrokontrolera do podstawki. Jak pokazano na schemacie (rysunek 1), nasz układ scalony – mikrokontroler ATtiny2313 – powinien być zasilany napięciem 4,5 V z baterii: pin 20 to „plus" zasilania, a pin 10 – „minus".

Ustaw więc proszę multimetr w tryb pomiaru napięcia stałego w zakresie do 20 V, upewniając się, że sondy pomiarowe są wpięte do multimetru w sposób prawidłowy (**fotografia 16**).

Teraz podłącz baterie i ustaw przełącznik SW1 w pozycji ON, a następnie przyłóż sondy pomiarowe: czerwoną do pinu numer 20 podstawki, a czarną do pinu numer 10 podstawki. Na wyświetlaczu miernika powinna pojawić się wartość napięcia bliska 4,5 V (**fotografia 17**).

Jeśli na wyświetlaczu pojawi się znak „–", oznacza to, że podczas montażu popełniliśmy błąd, na przykład zamieniając miejscami przewody od baterii. Wyświetlenie cyfry „1" informuje nas, że przekroczyliśmy zakres pomiarowy, na przykład próbując mierzyć napięcie 4,5 V za pomocą multimetru ustawionego na zakres do 2 V. Jeśli na wyświetlaczu pojawią się trzy zera, oznacza to zwarcie na liniach zasilania. W takim przypadku należy niezwłocznie odłączyć baterię, aby uniknąć jej niepotrzebnego rozładowania, a następnie zlokalizować i usunąć nadmiarowe połączenie.

Jeśli sytuacja u Ciebie jest taka jak na **fotografii 17**, możesz odłączyć baterię i zamontować mikrokontroler w podstawce.

Osadzenie układu w podstawce wydaje się prostą czynnością, jednak wymaga skupienia i ostrożności. Należy tu zadbać nie tylko o prawidłowy kierunek układu scalonego w podstawce (o czym przypomnę za chwilę), ale także o to, by wszystkie wyprowadzenia układu scalonego (a jest ich tu aż dwadzieścia) trafiły w odpowiednie gniazda podstawki, nie wygięły się ani nie złamały. Dodam tylko, że nawet jeśli jakieś wyprowadzenie odłamałoby się od układu scalonego, można by je było uzupełnić poprzez przylutowanie w ich miejsce fragmentów odciętych pinów od przylutowanych już do płytki komponentów, które zapewne masz pod ręką.

Drugą, obok ostrożności podczas montażu sprawą, o jaką należy zadbać, to właściwy kierunek montażu mikrokontrolera w podstawce. W tym celu należy przypilnować, by kropka lub wycięcie na układzie scalonym, wskazujące kierunek montażu, pokrywały się z pozostałymi znacznikami w podstawce oraz na warstwie opisowej PCB (**fotografia 18**). Gdy lokalizacja znacznika na układzie scalonym zgadza się z pozostałymi, można przystąpić do wciśnięcia układu w podstawkę.

Podsumowanie montażu

Po ukończeniu montażu sprawdź, proszę, czy wszystkie połączenia lutowane są błyszczące i nie ma zimnych lutów oraz czy żadne sąsiednie pola lutownicze nie są ze sobą błędnie połączone. Poprawnie zmontowany układ powinien wyglądać jak na **fotografii 19a** oraz **19b**.

Po podłączeniu baterii oraz ustawieniu włącznika zasilania w pozycji „ON" TermoEmotek zacznie mierzyć temperaturę otoczenia i prezentować wynik na skali diod LED. Możesz teraz za pomocą zworek J1 oraz J2 ustawić jeden z dostępnych sposobów wyświetlania wyniku pomiaru (patrz śródtytuł *Animacje*).

Fotografia 19. Poprawnie zmontowany układ *TermoEmotka*. Widok płytki a) od strony komponentów; b) od strony lutowania

Podczas zajęć stacjonarnych u jednego z uczestników układ nie reagował – świeciła się wyłącznie pierwsza, niebieska dioda LED (LED1). Mimo że montaż był poprawny, winny okazał się czujnik temperatury, czyli układ DS18B20. Po jego wymianie wszystko zaczęło działać prawidłowo.

Podsumowanie

Wygląda na to, że właśnie zbudowałeś kolejny układ do swojej kolekcji! Może pochwalisz się swoim osiągnięciem i wyślesz do redakcji zdjęcie wszystkich zmontowanych zestawów? Chętnie pokażemy je pozostałym Czytelnikom.

Dziś poznałeś nowy, bardzo wygodny w użyciu czujnik temperatury. Jeśli w przyszłości zaczniesz samodzielnie programować mikrokontrolery lub moduły z rodziny Arduino, Raspberry Pi czy pokrewne, z pewnością jeszcze nieraz sięgniesz po ten układ.

Trzeba przyznać, że twórcy DS18B20 wpadli na świetny pomysł – wykorzystali linię danych również do zasilania czujnika! Dzięki temu wystarczą tylko dwa przewody, by wszystko działało. Można by powiedzieć: zasilanie podłączone, a transmisja danych „w gratisie".

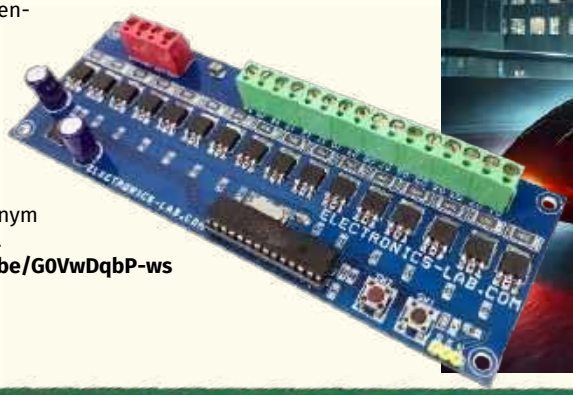
Takich technicznych „smaczków" spotkasz jeszcze wiele. Kto wie – może kolejny poznasz podczas naszego następnego spotkania, już za miesiąc? ■

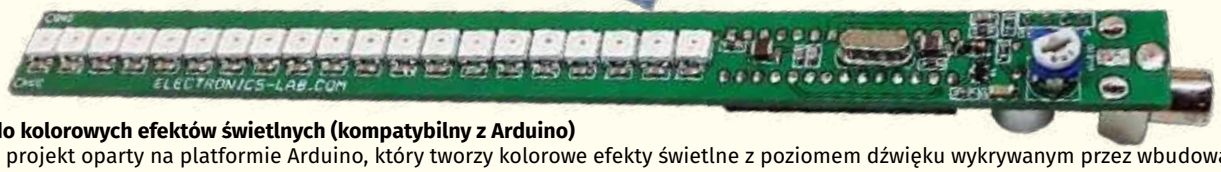
Mariusz Ciszewski

eprasa.pl 7d549de066

Knight Rider Light
– 16 diod LED dużej mocy (kompatybilny z Arduino)
Lampka LED „Knight Rider" i jeden z najlepszych projektów Arduino dla początkujących. Steruje ona 16 diodami LED dużej mocy, włączając je sekwencyjnie jedna po drugiej – projekt kompatybilny z Arduino o otwartym kodzie źródłowym. Zawiera on 16 wysokoprądowych tranzystorów MOSFET, mikrokontroler Atmega328, regulator 5 V itp. Bramka tranzystorów MOSFET IRLR7843 jest podłączona do pinów I/O układu Atmega328. Zaciski śrubowe służą do podłączenia diod LED i zasilania. Dodatkowe 2 przełączniki dotykowe i jedno złącze dla wejścia analogowego są przewidziane do dalszych eksperymentów. Zasilanie robocze od 12 V do 15 V DC, każde wyjście może sterować stałym obciążeniem prądowym 1 A (1 W do 12 W LED) bez chłodzenia i obciążeniem do 2 A z wymuszonym chłodzeniem powietrzem.

https://youtu.be/G0VwDqbP-ws





Dźwięk do kolorowych efektów świetlnych (kompatybilny z Arduino)
Zabawny projekt oparty na platformie Arduino, który tworzy kolorowe efekty świetlne z poziomem dźwięku wykrywanym przez wbudowany mikrofon pojemnościowy. Układ składa się z 20× LED RGB WS2812B, mikrokontrolera Atmega328, mikrofonu pojemnościowego wraz z przedwzmacniaczem, złącza RCA i potencjometru. Projekt może być wykorzystywany na imprezach rozrywkowych, dyskotekach itp. Wystarczy zasilić płytkę, a diody LED RGB będą tworzyć różne kolory w zależności od poziomu dźwięku. Płytka ma opcję bezpośredniego wejścia audio lub wykrywania dźwięku przez mikrofon.

https://youtu.be/RP0k2ajpRrs

Niektóre projekty aktualnie dostępne tylko dla prenumeratorów EdW w rubryce DIY PLUS na www.elportal.pl:

1. Nowy i ulepszony licznik Geigera – teraz z Wi-Fi!
2. Detektor zalania
3. Lampa nastrojowa LED o dużej mocy
4. Kontroler dzwonów kościelnych
5. Arduino Nano – włączanie/wyłączanie urządzeń za pomocą pilota na podczerwień (dwa kanały)
6. Lampa sufitowa LED z czujnikiem ruchu PIR – kompatybilna z Arduino
7. Inteligentny ściemniacz LED z Bluetooth – 4-kanałowy włącznik/wyłącznik Bluetooth
8. Czterokanałowy izolator cyfrowy, wzmocniony, szybki, o niskim poborze mocy
9. Sterowanie prędkością, kierunkiem i zatrzymaniem silnika DC z modułem RF NRF24L01
10. Nadajnik zdalnego sterowania z pojedynczym joystickiem wykorzystujący NRF24L01
11. 8-kanałowy zdalny nadajnik RF z protokołami: Holtek i szeregowym
12. 8-kanałowy zdalny odbiornik RF z protokołami: Holtek i szeregowym
13. Pojemnościowy czujnik wilgotności do konwertera wyjścia analogowego
14. Mostek H dla wysokiej mocy szczotkowego silnika prądu stałego z czujnikiem prądu
15. Przetwornica DC-DC buck 12...75 V na 10 V na wyjściu
16. Czujnik prądu low-side 10 μA...10 mA
17. Kontroler ramienia robota z bezprzewodowym pilotem PS3
18. Termiczny czujnik masowego przepływu powietrza – anemometr stałotemperaturowy
19. Precyzyjny wzmacniacz transimpedancyjny z przełączanym integratorem
20. Wysokowydajny monofoniczny wzmacniacz audio klasy D o mocy 20 W
21. Kontroler pełnego mostka z przesunięciem fazowym i prostowaniem synchronicznym wykorzystujący UCC28950
22. Monitorowanie poziomu cieczy za pomocą czujnika ciśnienia – wyświetlacz słupkowy
23. Sterowanie silnikiem DC za pomocą joysticka
24. 16-kanałowy sterownik serwomechanizmów RC z interfejsem I²C
25. Programowalny kondycjoner sygnału z czujnika rezystancyjnego mostkowego
26. Choinka z Arduino i pikselowymi diodami
27. 20-segmentowy wyświetlacz słupkowy w rozmiarze jumbo
28. Stacja pogodowa lilygo ttgo t5-4.7 z wyświetlaczem typu e-papier
29. Półprzewodnikowy przekaźnik mocy DC z prądowym sprzężeniem zwrotnym
30. Wyłącznik nadprądowy – przekaźnik wyłączający nadprądowy
31. TinyML – Rozpoznawanie ruchu przy pomocy RPi Pico
32. Uniwersalny konwerter napięcia AC – wyjście 18 V DC z wejścia 85...265 V AC
33. Moduł procesora echa głosu – urządzenie opóźniające do efektów dźwiękowych, echo, reverb
34. Sterownik silnika krokowego z joystickiem
35. RPi – stacja pogodowa IoT

Miesięcznik „**Elektronika dla Wszystkich**"
(12 numerów w roku) jest wydawany we współpracy z kilkoma redakcjami zagranicznymi

Wydawnictwo:
AVTKorporacja Sp. z o.o.
03-197 Warszawa, ul. Leszczynowa 11
tel. 22 257 84 99, e-mail: avt@avt.pl

Wydawca:
Wiesław Marciniak

Redaktor naczelny:
Mariusz Ciszewski
mariusz.ciszewski@elportal.pl

Adres redakcji:
03-197 Warszawa, ul. Leszczynowa 11
e-mail: edw@elportal.pl, www.elportal.pl

Dział reklamy:
Katarzyna Gugała
katarzyna.gugala@elportal.pl, tel. 22 257 84 64

Szef Pracowni Konstrukcyjnej:
Jakub Sobański
jakub.sobanski@elportal.pl

Sekretarz redakcji:
Dariusz Welik
dariusz.welik@elportal.pl

DTP, redakcja strony internetowej www.elportal.pl:
MAD Sp. z o.o.

Prenumerata:
W Wydawnictwie AVT, e-mail: prenumerata@avt.pl
tel. 22 257 84 22, (godz. 10:00–14:00)
www.ulubionykiosk.pl

Copyright AVTKorporacja Sp. z o.o., Warszawa, ul. Leszczynowa 11. Projekty publikowane w „Elektronice dla Wszystkich" mogą być wykorzystywane wyłącznie do własnych potrzeb. Korzystanie z tych projektów do innych celów, zwłaszcza do działalności zarobkowej, wymaga zgody redakcji „Elektroniki dla Wszystkich". Przedruk oraz umieszczanie na stronach internetowych całości lub fragmentów publikacji zamieszczanych w „Elektronice dla Wszystkich" jest dozwolone wyłącznie po uzyskaniu pisemnej zgody redakcji. Redakcja nie odpowiada za treść reklam i ogłoszeń zamieszczanych w „Elektronice dla Wszystkich".

eprasa.pl 7d549de066

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%**

Kod ważny do 30.09.2025

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

Subscribe to Elektor's newsletter and get the chance to

WIN

a Raspberry Pi Pico W board

www.elektor.com/eda

Subscribe to Elektor's newsletter, get a €5 coupon code and get the chance to WIN a Raspberry Pi Pico W board

Be one of the 10 fortunate winners!

elektor
design > share > earn

eprasa.pl 7d549de066