Wydanie elektroniczne dostępne na www.ulubionykiosk.pl

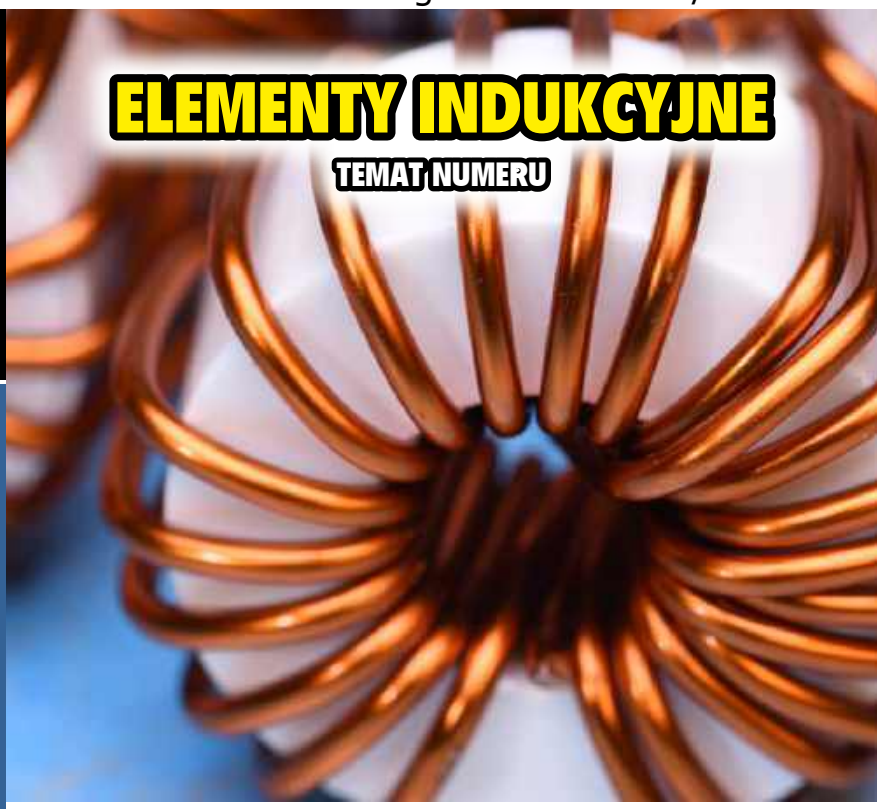
ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA

EP.com.pl

● Międzynarodowy magazyn elektroników konstruktorów ● grudzień ● 12/2024 ●

Tylko Prenumeratorzy

- mają dostęp do artykułów przed ich publikacją w EP na www.ep.com.pl – **EP W TOKU**
- mają dostęp do materiałów dodatkowych, takich jak pliki źródowe projektów na naszym serwerze **FTP** www.ulubionykiosk.pl/media



inspirujące, użyteczne projekty

• CurrentProbeHSTS – sonda prądowa do oscyloskopu • Zasilacz do ministudia fotograficznego • Przetwornik napięcia i prądu przemiennego TRMS z układem LTC1966 • Tester refleksu

podzespoły, sprzęt, aplikacje

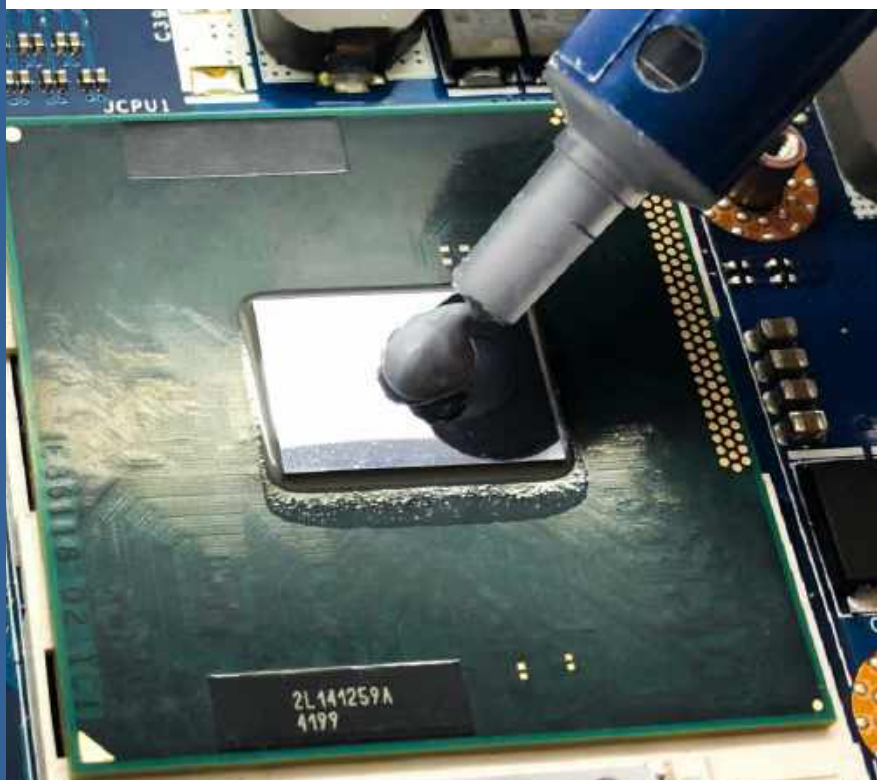
• Premierowe edycje targów Wire Tech Poland 2025 i Tube Technic Poland 2025 • Moduł EV-RCD ZETTLER Magnetics do ochrony różnicowoprądowej w ładowarkach EV • Transformatory do izolowanych przetwornic DC/DC dużej mocy • Lakierowanie ochronne płytek drukowanych • Elementy indukcyjne – trendy rynkowe i wybrane aplikacje • Chemia w warsztacie elektronicznym: czyszczenie, lutowanie i nie tylko • W jakim celu lakierujemy płytki PCB i jak wybrać optymalne rozwiązanie? • Innowacyjne rozwiązania dla budownictwa i rzemiosła

tutoriale

• Oszczędzanie energii w teorii i w praktyce • Rejestrator dźwięku z korektorem graficznym i analizatorem widma na bazie LPC55S28 • Internet Rzeczy w pomiarach środowiskowych. Dołączanie czujnika CO2 typu SCD41 oraz czujnika jakości powietrza BME688 do modułu Enviro Weather • Sterowanie tranzystorami MOSFET niskim napięciem • Zabezpieczanie i organizacja przewodów w urządzeniach elektronicznych

kursy

• Kurs FPGA Lattice. Slave SPI • Pomiary charakterystyk częstotliwościowych. Filtry bierne m.cz. • Implementacja systemu Linux na platformie STM32MP • Programowanie modułów ESP32 w środowisku ESP-IDF. Interfejs I²C • Kurs Nordic nRF z BT. Bluetooth LE – urządzenie centralne • Czytniki kodów kreskowych w praktyce. EM3296V4: uniwersalny silnik skanowania OEM do urządzeń kompaktowych



ISSN 1230-3526 Indeks 357677
9 771230 352245 12
18,90 zł (w tym 8% VAT) • PRICE 8 EUR

CHEMIA DLA ELEKTRONIKI

eprasa.pl 19fe7f8deb

prenumerata

–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 Praktyczną*. 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:
- artykułów przed ich publikacją w *Elektronice Praktycznej* na www.ep.com.pl – EP W TOKU
- materiałów dodatkowych (takich jak pliki źródłowe projektów) na www.UlubionyKiosk.pl/media

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.

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 | AVT Korporacja sp. z o.o. ul. Leszczynowa 11, 03-197 Warszawa
rachunek bankowy: 18 1050 1012 1000 0024 3173 1013

Dopiero się rozkręcamy!

Od roku mam przyjemność kierować pracami Redakcji „Elektroniki Praktycznej". W styczniu 2024 obiecałem naszym Czytelnikom intensywny rozwój EP oparty na trzech filarach. Czuję się zatem w obowiązku dokonać krótkiego podsumowania wszystkiego, co działo się w ciągu ostatnich 12 miesięcy na łamach naszego czasopisma.

Pierwszym z trzech filarów miała być rozbudowa zespołu Autorów – i tak też się stało. W 2024 roku w EP zadebiutowało aż **ośmiu nowych Autorów** – niezmiernie cieszymy się, że nasze czasopismo jest atrakcyjne dla konstruktorów chętnie dzielących się swoją wiedzą i doświadczeniem. Bardzo ważnym i miłym akcentem był powrót do nas (po dłuższej lub krótszej przerwie w publikowaniu) kolejnych **czterech Autorów**. Ponadto godny podkreślenia jest fakt, że w ramówce EP stawiamy teraz niemal wyłącznie na oryginalne opracowania autorskie – dzięki temu możemy elastyczniej kształtować tematykę publikowanych artykułów, a to bardzo pozytywnie przekłada się na feedback, jaki otrzymujemy od naszych Czytelników.

Filar drugi dotyczy stałego działu Kursy EP. I tutaj także mamy czym się pochwalić! Tylko w tym roku na łamach EP pojawiło się aż **7 nowych kursów**, poczynając od jednoodcinkowego tutorialu w nowej formule Crash Course, a kończąc na – obecnych także w bieżącym wydaniu – ponadpółrocznych kursach z zakresu programowania modułów IoT.

W roku 2024 udało się także zrealizować trzecią obietnicę – otworzyliśmy **nową rubrykę stałą** pt. „Technologie wokół Elektroniki", w ramach której (na razie w co drugim numerze) publikujemy praktyczny przewodnik dotyczący technologii druku 3D. To oczywiście dopiero początek, gdyż w tym właśnie dziale będą pojawiały się także kolejne zagadnienia, dotyczące m.in. technik obróbki skrawaniem (głównie pod kątem obudów urządzeń), rozmaitych materiałów stosowanych w elektronice, czy też technologii związanych z odprowadzaniem ciepła.

A dlaczego tytuł tego tekstu brzmi „Dopiero się rozkręcamy!"?

Ponieważ tak jest w istocie! Już za miesiąc szykujemy bowiem dla naszych Czytelników prawdziwą gratkę, jakiej jeszcze na łamach EP nie było. Otwieramy całkowicie nowy, obszerny dział stały poświęcony w 100%… **technice audio**! Mamy świadomość, jak wielu elektroników zajmuje się tą arcyważną i arcyciekawą dziedziną – czy to zawodowo, czy z zamiłowania do dobrego brzmienia ukochanej muzyki. O audio napisano już bardzo dużo, ale – podobnie zresztą jak cała elektronika – dziedzina ta rozwija się w szybkim tempie, głównie (choć nie tylko!) za sprawą coraz doskonalszych technologii cyfrowych. W ramach nowego działu będziemy publikować różnego rodzaju materiały – kursy, poradniki dla konstruktorów, materiały dotyczące fundamentalnych zagadnień pomiarowych, ciekawe artykuły poglądowe czy wreszcie przeglądy dostępnych komponentów przeznaczonych do aplikacji high-end audio. Aby jeszcze bardziej podgrzać atmosferę, dodam, że styczeń stanie się dla nas swego rodzaju „świętem audio" – znaczna część numeru będzie poświęcona właśnie tej tematyce, nowy rok redakcyjny otworzymy zatem z prawdziwą pompą!

Wróćmy jeszcze na chwilę do bieżącego wydania „Elektroniki Praktycznej". Tym razem na okładce królują: chemia dla elektroniki oraz bardzo ważne, choć często wręcz niedoceniane, elementy indukcyjne. Spośród wspomnianych wcześniej siedmiu nowych kursów, otwartych w tym roku, aż trzy rozpoczynają się właśnie w numerze grudniowym – pierwszy z nich dotyczy implementacji systemu OpenSTLinux na nowoczesnej, wydajnej platformie STM32MP1, drugi prezentuje zastosowanie (opublikowanych wcześniej na łamach EP) urządzeń pomiarowych DIY do zdejmowania charakterystyk filtrów, zaś trzeci to ekspresowy poradnik implementacji modułowych silników skanowania (czytników kodów kreskowych) w praktycznych aplikacjach.

Koniec roku oznacza także zakończenie naszego kursu programowania modułów ESP32 w środowisku ESP-IDF. Doskonale wiemy, z jak pozytywnym odbiorem spotkał się ów materiał, dlatego już teraz trwają prace nad kolejnym kursem, także poświęconym modułom ESP32 – tym razem jednak z użyciem innej platformy programistycznej.

W tym numerze kontynuujemy ponadto (powoli dobiegający końca) kurs FPGA i – cieszący się sporą popularnością – cykl poświęcony nowoczesnym modułom Bluetooth Low Energy marki Nordic Semiconductor. Nie zabrakło oczywiście kolejnych odcinków serii dot. systemów IoT oraz oszczędzania energii, dwóch praktycznych artykułów poradnikowych (w zakresie sterowania tranzystorami MOSFET i technik estetycznego okablowania wewnętrznego urządzeń) oraz pięciu inspirujących, użytecznych projektów.

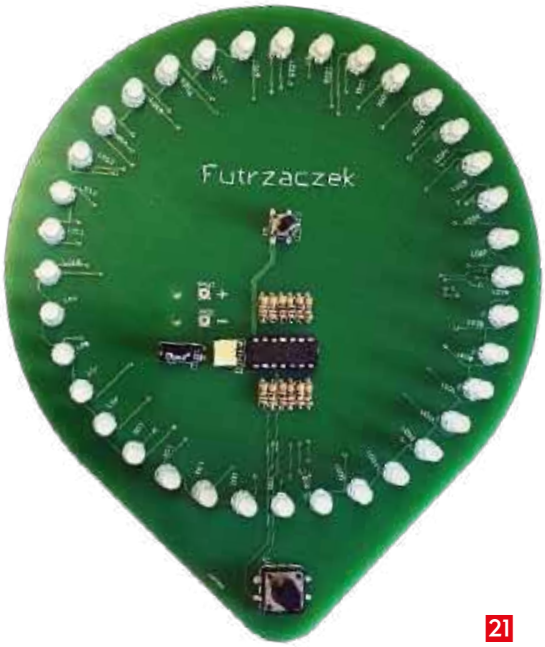
Wszystkim naszym Czytelnikom, Autorom oraz całemu Zespołowi redakcyjnemu dziękuję za tak owocny rok, życząc jednocześnie spokojnych, zdrowych i rodzinnych Świąt oraz wszelkiej pomyślności, nowych pomysłów i elektronicznych inspiracji w nadchodzącym Nowym Roku. Do zobaczenia (i przeczytania) w styczniu!

Przemysław Musz

eprasa.pl f9fe7f8d6b

ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA

Nr 12 (383) • Grudzień 2024



Nie przeocz

Nowe podzespoły 6
Dodaj do obserwowanych 11
Koktajl niusów 94

Projekty

CurrentProbeHSTS – sonda prądowa do oscyloskopu 14
Tester refleksu 21

Miniprojekty

Zasilacz do ministudia fotograficznego 17
Przetwornik napięcia i prądu przemiennego TRMS z układem LTC1966 19

Prezentacje

Premierowe edycje targów Wire Tech Poland 2025 i Tube Technic Poland 2025 12
Moduł EV-RCD ZETTLER Magnetics do ochrony różnicowoprądowej w ładowarkach EV 25
Transformatory do izolowanych przetwornic DC/DC dużej mocy 32
Lakierowanie ochronne płytek drukowanych 40
W jakim celu lakierujemy płytki PCB i jak wybrać optymalne rozwiązanie? 50
Innowacyjne rozwiązania dla budownictwa i rzemiosła 54

Temat numeru: Elementy indukcyjne

Elementy indukcyjne – trendy rynkowe i wybrane aplikacje 26

Moduły w aplikacjach

Rejestrator dźwięku z korektorem graficznym i analizatorem widma na bazie LPC55S28 33
Internet Rzeczy w pomiarach środowiskowych (12). Dołączanie czujnika CO_2 typu SCD41 oraz czujnika jakości powietrza BME688 do modułu Enviro Weather 36

Elektronika w praktyce

Chemia w warsztacie elektronicznym: czyszczenie, lutowanie i nie tylko 43

Notatnik konstruktora

Sterowanie tranzystorami MOSFET niskim napięciem 52
Oszczędzanie energii w teorii i w praktyce (5) 56
Zabezpieczanie i organizacja przewodów w urządzeniach elektronicznych 61

Kursy

Implementacja systemu Linux na platformie STM32MP (1) 64
Programowanie modułów ESP32 w środowisku ESP-IDF (6). Interfejs I²C 67
Kurs Nordic nRF z BT (6). Bluetooth LE – urządzenie centralne 70
Czytniki kodów kreskowych w praktyce (1). EM3296V4: uniwersalny silnik skanowania OEM do urządzeń kompaktowych 76
Kurs FPGA Lattice (26). Slave SPI 81
Pomiary charakterystyk częstotliwościowych (1). Filtry bierne m.cz. 88

Prenumerata 2
Od wydawcy 3
Hity następnego numeru 95

Dodatkowe materiały do artykułów znajdziesz na https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b

eprasa.pl f9fe7f8d6b

nowe podzespoły

Z kilkuset nowości wybraliśmy te, których nie wolno przeoczyć. Bieżące nowości można śledzić na www.elektronikaB2B.pl

Dwuzakresowy układ Wi-Fi 6 nRF7002 w miniaturowej obudowie WLCSP

Dwuzakresowy układ Wi-Fi 6 – nRF7002 marki Nordic Semiconductor – jest obecnie dostępny w nowej wersji, produkowanej w miniaturowej obudowie WLCSP o wymiarach 3,8×3,4 mm – zajmuje zatem ponad dwukrotnie mniejszą powierzchnię PCB od poprzednika (QFN, 6×6 mm). Jest to układ określany mianem „companion IC", zapewniający transmisję danych i lokalizację oparte na Wi-Fi, przy współpracy z istniejącymi układami z oferty Nordic. Należą do nich wieloprotokołowe układy SoC (SoC) z serii nRF52 i nRF53 oraz komórkowe układy IoT (SiP) z serii nRF91. Układ nRF7002 może również współpracować z hostami innych producentów. Obsługuje pasma 2,4 GHz i 5 GHz oraz zapewnia kompatybilność ze standardami 802.11a/b/g/n/ac/ax. Z układem nadrzędnym komunikuje się przez interfejs SPI/QSPI.

Pozostałe cechy:

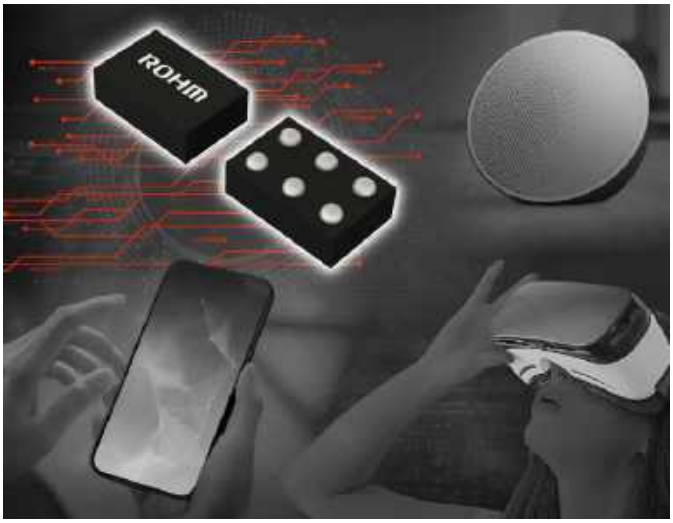
- szerokość kanału: 20 MHz,
- przepustowość: 64 QAM (MCS7), 86 Mbps PHY,
- bardzo dobra koegzystencja z Bluetooth LE,
- obsługa TWT (Target Wake Time),
- obsługa transmisji SS (Spatial Stream).

www.nordicsemi.com

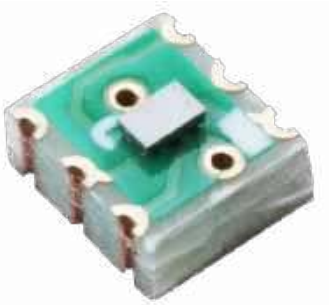
Przełączniki i stopnie półmostkowe oparte na 650-woltowych tranzystorach CoolGaN G5

Do oferty podzespołów firmy Infineon, produkowanych w technologii GaN, wchodzi rodzina układów CoolGaN Drive, obejmujących przełączniki i stopnie półmostkowe oparte na 650-woltowych tranzystorach z rodziny CoolGaN G5. Przełączniki CoolGaN Drive, dostępne w obudowach PQFN 5×6 i PQFN 6×8, zawierają pojedynczy tranzystor ze sterownikiem bramki. Z kolei stopnie półmostkowe CoolGaN Drive HB, produkowane w obudowach LGA 6×8, zawierają dwa tranzystory (high-side i low-side) ze zintegrowanymi sterownikami bramek. Obie serie układów mogą znaleźć zastosowanie m.in. w urządzeniach AGD, elektronarzędziach, rowerach elektrycznych itp., pozwalając zwiększyć sprawność energetyczną i gęstość mocy oraz zmniejszyć liczbę komponentów. Umożliwiają bezstratny pomiar natężenia prądu oraz regulowanie szybkości narastania sygnału przy włączaniu i wyłączaniu. Zawierają wbudowane zabezpieczenia nadprądowe, termiczne i przeciwzwarciowe.

www.infineon.com



Najmniejszy na rynku wzmacniacz operacyjny CMOS o wymiarach 0,88×0,58×0,33 mm



TLR377GYZ to obecnie najmniejszy na rynku wzmacniacz operacyjny, zrealizowany w technologii CMOS. Układ, produkowany w obudowie YCSP30L1 o wymiarach 0,88×0,58×0,33 mm, zaprojektowano specjalnie do zastosowań w smartfonach i aplikacjach IoT. Poza małymi gabarytami wyróżnia się małym wejściowym napięciem offsetu (1 mV przy dryfcie maks. 6 μV/°C) i niskim poziomem szumów (12 nV/$\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz), co umożliwia współpracę z czujnikami o znikomej amplitudzie sygnału wyjściowego. Wzmacniacz jest przystosowany do pracy w temperaturze otoczenia od –20 do +85°C. Zawiera wejście i wyjście o szerokim zakresie zmienności napięcia (rail-to-rail).

TLR377GYZ pracuje z napięciem zasilania od 1,8 do 5,5 V przy poborze prądu około 0,58 mA, zaś wyjście układu zapewnia wydajność prądową 25 mA. Producent udostępnia do niego model symulacyjny SPICE oraz niewielki moduł ewaluacyjny w formie adaptera (TLR377GYZ-EVK-001), pozwalający dostosować gabaryty i rozkład wyprowadzeń do wzmacniaczy produkowanych w typowych obudowach SSOP-6.

Pozostałe parametry:

- wzmocnienie: 137 dB,
- zakres napięcia wejściowego: od VSS do VDD,
- zakres napięcia wyjściowego: od VSS+0,015 V do VDD–0,035 V,
- GBW: 4 MHz,
- slew-rate: 2 V/μs,
- CMRR: 100 dB,
- PSRR: 95 dB.

www.rohm.com

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Tanie układy do bezpiecznego przechowywania kluczy i zabezpieczania przed cyberatakami

Microchip rozszerza platformę TrustFLEX o tanie układy CryptoAuthentication z serii ECC20x i SHA10x, ułatwiające autoryzację i zabezpieczanie danych przed cyberatakami w aplikacjach konsumenckich, przemysłowych i medycznych oraz centrach danych. Są to układy wstępnie skonfigurowane, umożliwiające skrócenie czasu i obniżenie kosztów projektowania. Zapewniają bezpieczne przechowywanie kluczy kryptograficznych zgodnie z wymogami standardów Common Criteria JIL (Joint Interpretation Library) High oraz programów walidacyjnych NIST, takich jak ESV (Entropy Source Validation) i CAVP (Cryptographic Algorithm Validation Program).

Układy z rodzin ECC20x i SHA10x mogą współpracować z dowolnymi mikroprocesorami i mikrokontrolerami. Są wspierane przez zestaw narzędzi projektowych Microchip Trust Platform Design Suite, udostępniający przykładowe kody aplikacji oraz materiały szkoleniowe, ułatwiające integrację bezpiecznych kluczy kryptograficznych. Dodatkowo model ECC204 spełnia wymogi konsorcjum Wireless Power Consortium (WPC) w zakresie autoryzacji w aplikacjach ładowania bezprzewodowego Qi.

Ceny hurtowe nowych układów CryptoAuthentication zaczynają się od 0,5 USD przy zamówieniach 2000 sztuk.

www.microchip.com

8-kanałowy laser impulsowy 915 nm do systemów autonomicznego kierowania

Firma ams OSRAM wprowadza na rynek 8-kanałowy laser impulsowy do LiDAR-ów samochodowych dużego zasięgu i systemów autonomicznego kierowania, oznaczony symbolem SPL S8L91A_3 A01. Jest to laser EEL (edge-emitting laser) z kwalifikacją AEC-Q102, dostępny w obudowie QFN. Pracuje na długości fali 915 nm, charakteryzuje się szczytową mocą optyczną 1000 W (po 125 W na kanał) i sprawnością sięgającą 30%. Struktura wewnętrzna układu obejmuje 4 sekcje anodowe z niezależnym adresowaniem, połączone z różnicowymi kanałami laserowymi, co daje dodatkową elastyczność przy projektowaniu urządzeń końcowych.

Zastosowanie pojedynczego układu scalonego ułatwia konfigurowanie LiDAR-u, eliminując potrzebę dokładnego wyrównywania kilku emiterów dyskretnych. Dodatkową zaletą jest zwiększenie niezawodności produktu końcowego. Laser wykorzystuje opatentowaną przez ams OSRAM technologię stabilizacji długości fali, minimalizującą przesunięcia spowodowane zmianami temperatury, zwiększającą odstęp sygnału od szumu i pozwalającą wydłużyć zasięg pracy docelowego urządzenia.

www.ams-osram.com

REKLAMA

eprasa.pl f9fe7f8d6b

7-parametrowy moduł pomiarowy do monitorowania jakości powietrza w pomieszczeniach

RRH62000 to nowy moduł pomiarowy marki Renesas do monitorowania jakości powietrza w pomieszczeniach. Produkt może znaleźć zastosowanie zarówno w domach, jak i w budynkach użyteczności publicznej. Mierzy 7 parametrów (temperaturę, wilgotność oraz stężenie pyłów PM1, PM2,5 PM10, lotnych związków organicznych i CO_2), co pozwala na zastosowania w wielu aplikacjach. Bazuje na mikroprocesorze rodziny Renesas RA oraz oferuje wbudowane algorytmy sztucznej inteligencji, pozwalające na łatwiejsze zarządzanie danymi z sensorów.

Dzięki zastosowaniu technologii laserowej RRH62000 zapewnia dużą precyzję pomiaru w przypadku cząstek o średnicy od 0,3 do 10 µm, co jest dużym atutem w porównaniu z tradycyjnymi metodami, opartymi na diodach LED. Został fabrycznie skalibrowany, co oznacza, że jest gotowy do pracy od razu po montażu. Zawiera interfejsy I²C i UART. Wbudowane oprogramowanie firmware oraz algorytmy AI umożliwiają adaptowanie go do wymagań różnych standardów jakości powietrza, takich jak WELL, HVI czy RESET w różnych regionach geograficznych.

Moduł może być stosowany w systemach HVAC, umożliwiając dynamiczne sterowanie wentylacją w oparciu na poziomie CO_2 oraz udostępniając informacje o zajętości pomieszczeń, co pozwala na utrzymanie optymalnej jakości powietrza przy jednoczesnym ograniczeniu poboru mocy. Wbudowane algorytmy AI są także w stanie przewidywać, kiedy należy wymienić filtry w systemach HVAC oraz wykrywają anomalie występujące przed awarią systemu, co pomaga obniżyć koszty eksploatacji i konserwacji.

RRH62000 jest produkowany w obudowie o wymiarach 46,6×34,8×12 mm.

www.renesas.com

Fotodetektor MPPC o dużej sprawności kwantowej do zastosowań w LiDAR-ach

Firma Hamamatsu Photonics opracowała nowy typ fotodetektora MPPC (SiPM) do zastosowań w LiDAR-ach, charakteryzujący się dużą sprawnością kwantową. Model S16786-0515WM pracuje w zakresie światła widzialnego i bliskiej podczerwieni (400...1000 nm) ze szczytową czułością przypadającą na długość fali równą 660 nm. Zawiera matrycę 1089 pikseli o średnicy 15 µm, rozmieszczonych na powierzchni światłoczułej 0,5×0,5 mm. Wykazuje małe przesłuchy międzykanałowe na poziomie 2%. Dzięki małym wymiarom diod SPAD (Single Photon Avalanche Diode) oferuje szeroki zakres dynamiczny, a zastosowane w nim mikrosoczewki zapewniają dużą sprawność kwantową (15% @ 905 nm). Układ jest przystosowany do pracy w zakresie temperatury otoczenia od –40 do +105°C.

www.hamamatsu.com

Kondensatory MLCC o dużej pojemności i małych gabarytach do zastosowań w motoryzacji

Kyocera AVX wprowadza na rynek 20 nowych kondensatorów MLCC z serii KAM, zaprojektowanych do zastosowań w branży motoryzacyjnej i zapewniających dużą pojemność przy małych gabarytach. Są to komponenty produkowane z zastosowaniem zaawansowanych technologii miniaturyzacji, pierwotnie opracowanych pod kątem smartfonów. Stosowane w nich materiały gwarantują wysoką niezawodność w trudnych warunkach środowiskowych, co ma fundamentalne znaczenie w zastosowaniach motoryzacyjnych.

Kondensatory z serii KAM uzyskały kwalifikację AEC-Q200, a ich produkcja odbywa się w zakładach z certyfikatami IATF, QS9000 i VDA 6.4. Dodatkowo nowe komponenty są poddawane regularnym testom jakościowym.

Omawiane elementy są produkowane w czterech rozmiarach obudów SMD (0201, 0402, 0603, 0805) z dielektrykami X7R i X7T. Nowa oferta obejmuje wersje o napięciu znamionowym od 4 do 16 V i pojemności od 0,1 do 22 µF.

Zakres zastosowań kondensatorów KAM obejmuje m.in. sterowniki ECU, układy napędowe, węzły komunikacyjne, wyświetlacze HUD, kamery, radary, LiDAR-y oraz inne niskonapięciowe systemy bezpieczeństwa. Dzięki swoim właściwościom kondensatory serii KAM mogą też znaleźć zastosowanie w aplikacjach spoza branży motoryzacyjnej. Przykładem może być sektor górniczy, wymagający komponentów zdatnych do pracy w temperaturze otoczenia do +150°C.

www.kyocera-avx.com

Pierwsza na rynku jednobiegunowa sonda aktywna z 7-metrowym kablem

Tektronix wprowadza do oferty pierwszą na rynku sondę aktywną z aż 7-metrowym kablem. TAP1500L to konstrukcja jednobiegunowa (single ended), stanowiąca zmodyfikowaną wersję wcześniejszego modelu TAP1500. Dodaje dodatkowe 5,7 m długości kabla w aplikacjach, w których przyrząd pomiarowy musi być oddalony od badanego obwodu w celu zwiększenia elastyczności czy bezpieczeństwa użytkownika. Producent poleca ją do zastosowań zwłaszcza w zautomatyzowanych systemach testujących.

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Sonda TAP1500L bazuje na architekturze IsoVu z izolacją optyczną, umożliwiając pomiar małego sygnału użytecznego na tle zaburzeń o dużej amplitudzie. W porównaniu do najbliższych odpowiedników dostępnych na rynku, nowy produkt Tektronix charakteryzuje się większą o metr długością kabla. Pomimo tak długiego przewodu sonda zapewnia pasmo powyżej 1,5 GHz, pojemność wejściową mniejszą od 1 pF i czas narastania sygnału poniżej 267 ps. Końcówka sondy może być mocowana do komponentów SMD o rozstawie wyprowadzeń już od 0,5 mm. Połączenie z oscyloskopem odbywa się za pomocą interfejsu TekVPI. Sonda nie wymaga dodatkowego wzmacniacza ani oprogramowania. Może współpracować z sygnałami o napięciu do 16 V.

www.tek.com

Precyzyjny 4-zakresowy moduł GNSS z obsługą technologii RTK

Firma Quectel wprowadza na rynek 4-zakresowy moduł GNSS do najbardziej wymagających aplikacji, zapewniający obsługę technologii precyzyjnego pozycjonowania satelitarnego RTK nawet w trudnych warunkach pracy. Dzięki centymetrowej precyzji w czasie rzeczywistym produkt może znaleźć zastosowanie m.in. w geodezji, rolnictwie precyzyjnym, autonomicznych kosiarkach i robotach dostawczych. Zapewnia niezawodną komunikację również ze stacjami bazowymi znajdującymi się w znacznej odległości.

LG290P jest modułem klasy przemysłowej obsługującym konstelacje GPS, GLONASS, Galileo, BDS, NavIC i QZSS oraz systemy wspomagania satelitarnego (SBAS), takie jak WASS, EGNOS, MSAS i GAGAN. Odbiera sygnały z pasm L1, L2, L5 i E6. Ponadto jest kompatybilny z usługami RTK Quectel.

Dzięki obsłudze 4 zakresów częstotliwości, LG290P może znacznie zwiększyć skuteczność RTK w porównaniu z odbiornikami 2-zakresowymi w trudnych warunkach pracy, np. w ogrodach otoczonych drzewami i murami. Czas uzyskania korekcji RTK może ponadto zostać skrócony do mniej niż 5 s w porównaniu z 10...15 s w przypadku odbiorników 2-zakresowych.

Moduł LG290P wspiera zaawansowane algorytmy RTK, co zapewnia szybkie i niezawodne pozycjonowanie również w szczególnie wymagających warunkach pracy (gęsta pokrywa drzew, bliskość budynków, wysoka zabudowa miejska). Zaawansowany układ przeciwzakłóceniowy NIC (Narrowband Interference Canceller) znacząco poprawia odbiór sygnałów w obecności zaburzeń elektromagnetycznych.

Nowy moduł firmy Quectel wyróżnia się na tle konkurencji również pod względem bezpieczeństwa, oferując korekcję ECC oraz funkcję Secure Boot do ochrony oprogramowania sprzętowego. Jest najmniejszym obecnie modułem 4-zakresowym (12,2×16×2,6 mm), zapewniającym dużą elastyczność projektową. Produkt udostępnia konstruktorom interfejsy UART, SPI i I²C do komunikacji z nadrzędnym mikroprocesorem.

W ofercie firmy Quectel są dostępne również inne moduły RTK, w tym 2-zakresowe LC29H klasy przemysłowej i LG69T klasy motoryzacyjnej.

www.quectel.com

Elektrolityczne kondensatory hybrydowe 33...470 µF/25...63 V o dużym dopuszczalnym prądzie tętnienia

Firma Nichicon opracowała nową serię elektrolitycznych kondensatorów hybrydowych z polimerem przewodzącym, wyróżniających się dużym dopuszczalnym prądem tętnienia i niską rezystancją ESR. Są to kondensatory polecane do zastosowań w elektronice samochodowej. Dzięki zastosowaniu zoptymalizowanej folii elektrodowej oraz odpornej na ciepło gumy uszczelniającej, komponenty mogą pracować w szerokim zakresie temperatury otoczenia od –55 do +135°C. Ich żywotność producent określa na 4000 godzin @ +135°C.

REKLAMA

HAMMOND®

1550ZF odlewana obudowa aluminiowa z kołnierzem IP68

Dowiedz się więcej:
hammondmfg.com/1550zf

eusales@hammondmfg.com • + 44 1256 812812

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Kondensatory elektrolityczne hybrydowe z polimerem przewodzącym korzystają zarówno z polimerów przewodzących, jak i roztworu elektrolitycznego. Połączenie tych dwóch typów elektrolitów sprawia, że elementy te łączą w sobie zalety elektrolitycznych kondensatorów aluminiowych (zdolność do naprawy warstwy tlenkowej) i kondensatorów aluminiowych z elektrolitem stałym z polimerem przewodzącym (niska rezystancja ESR i duża odporność na wysokie temperatury).

Kondensatory z serii GXC zapewniają jeszcze większą (od 1,36× do 2,09×) odporność na duże prądy tętnienia od odpowiedników wcześniejszej serii GYC, co pozwala na redukcję wymiarów i masy urządzeń dzięki zmniejszeniu liczby komponentów. Występują w wersjach o pojemności 33...470 µF i napięciu znamionowym 25...63 V. Są produkowane w obudowach o rozmiarach od ∅ 8×10 mm do ∅ 10×12,5 mm.

www.nichicon.co.jp

Miniaturowy czujnik stężenia CO_2 o zakresie pomiarowym 0...100% i dokładności ±0,2%

Do oferty firmy Sensirion wchodzi miniaturowy czujnik stężenia CO_2 o symbolu STC31-C, nadający się idealnie do zastosowań w urządzeniach produkowanych wielkoseryjnie. Może on znaleźć zastosowanie m.in. w sektorze transportowym (monitorowanie warunków przechowywania szybko psujących się produktów spożywczych i farmaceutyków) oraz w aparaturze medycznej (monitorowanie zawartości CO_2 w wydychanym powietrzu).

STC31-C to czujnik pracujący na zasadzie pomiaru przewodnictwa cieplnego, zapewniający dużą powtarzalność wyników i stabilność długoterminową przy małym poborze mocy. Stanowi zmodyfikowaną wersję wcześniejszego modelu STC31, oferującą dodatkowe funkcjonalności. Jedną z nich jest tryb pomiarowy o małej wrażliwości na zmianę wilgotności i stężenia tlenu, szczególnie przydatny w przypadku zastosowań medycznych.

Czujnik jest produkowany w opatentowanej technologii CMOSens, łączącej elementy pomiarowe oraz obwody do przetwarzania sygnału i kalibracji cyfrowej w jednym miniaturowym układzie scalonym. Technologia ta jest idealna w przypadku wymagających aplikacji OEM, które muszą spełniać rygorystyczne normy jakościowe, a jednocześnie zapewnić opłacalność w masowej produkcji.

STC31-C został wyposażony w interfejs I^2C, umożliwiający łatwą komunikację z dowolnym mikrokontrolerem i integrację w systemach pomiarowych. Projektantom zainteresowanym przeprowadzeniem wstępnych testów czujnika firma Sensirion oferuje zestaw ewaluacyjny o oznaczeniu SEK-STC31-C.

Pozostałe parametry:

- napięcie zasilania: 2,7...5,5 V,
- pobór prądu: średnio 50 µA, maks. 5 mA,
- zakres pomiarowy: 0...100%,
- dokładność: 0,2%,
- błąd nieliniowości: ±2%,
- czas odpowiedzi (τ 63%): 0,5 s,
- stabilność temperaturowa: 0,02%/°C,
- wymiary: 3,5×3,0×1,0 mm.

www.sensirion.com

Wielowarstwowe warystory tlenkowe o dopuszczalnym prądzie udarowym 6000 A

KOA Speer powiększa ofertę wielowarstwowych warystorów tlenkowych (MOV) o nowe wersje, zapewniające 5-krotnie wyższy poziom zabezpieczenia chronionych obwodów w porównaniu do wcześniejszych odpowiedników. W ramach nowej serii NV73S dostępne są warystory o maksymalnym prądzie udarowym 6000 A, mogące stanowić zamienniki warystorów starszej serii NV73S. Dzięki symetrycznej, wielowarstwowej konstrukcji są one w stanie zaabsorbować duże (dodatnie i ujemne) impulsy prądowe przy małych gabarytach.

Warystory NV73S mogą być stosowane do ochrony m.in. silników, przekaźników i zaworów elektromagnetycznych. Są produkowane w obudowach chipowych o rozmiarach 1210, 1812 i 2220, na zakresy prądów znamionowych, odpowiednio, 400...800 A, 500...1200 A i 1500...6000 A. Ich zakresy napięcia roboczego wynoszą 6...95 VAC i 9...127 VDC. Zakres dopuszczalnej temperatury pracy rozciąga się od –50 do +125°C.

www.koaspeer.com

Układ diody idealnej o napięciu przewodzenia 31 mV i prądzie wyjściowym do 1,5 A

NID5100 to układ diody idealnej zrealizowany w technologii PMOS, pozwalający zastąpić tradycyjne diody Schottky'ego w aplikacjach niskonapięciowych. Jego przewagą jest niższe (nawet o rząd wielkości) napięcie przewodzenia (typ. 31 mV dla IOUT=10 mA i VIN=3,3 V) oraz kilkudziesięciokrotnie mniejszy prąd upływu. Dostępny jest też wariant samochodowy, oznaczony symbolem NID5100-Q100.

NID5100 akceptuje napięcie wejściowe z zakresu 1,2...5,5 V i charakteryzuje się maksymalnym prądem wyjściowym 1,5 A. Zawiera wbudowane zabezpieczenie przed odwróceniem polaryzacji napięcia wejściowego do –6 V. Pobiera około 170 nA prądu w trybie shutdown i 240 nA w stanie spoczynkowym.

Przy polaryzacji w kierunku przewodzenia (VIN>VOUT) i aktywnym stanie logicznym na wejściu EN układ NID5100 przewodzi prąd między wejściem i wyjściem. Przy polaryzacji wstecznej (VOUT>VIN) przepuszcza jedynie niewielki prąd upływu na poziomie kilkuset nA. Na wyjściu ST, przydatnym w systemach zarządzania zasilaniem, jest sygnalizowany aktualny wyjścia. Przy polaryzacji w kierunku przewodzenia i aktywnym stanie logicznym wejścia EN wyjście to pozostaje w stanie wysokiej impedancji, natomiast przy nieaktywnym stanie logicznym wejścia EN lub przy polaryzacji zaporowej wyjście to jest przełączane w stan niski.

NID5100 jest dostępny w obudowie TSSP6/SOT363-2 o wymiarach 2,1×1,25×0,95 mm, kompatybilnej ze standardem SC88/SC70-6. Może pracować w temperaturze otoczenia od –40 do +125°C. Jego przykładowe zastosowania obejmują inteligentne mierniki, czujniki przeciwpożarowe i urządzenia bateryjne.

www.nexperia.com

eprasa.pl f9fe7f8d6b

dodaj do obserwowanych

Przedstawiamy redakcyjny wybór najciekawszych projektów spośród ostatnio anonsowanych w internecie. Są to projekty na różnych etapach realizacji. Warto się zapoznać z projektami zakończonymi i śledzić realizację projektów niegotowych, by czerpać z nich inspirację do własnych prac.

Pocket Z : Bring back the PDAs & UMPCs

W latach 90. i na początku XXI w. popularne były urządzenia typu PDA i UMPC – w tym Psion 3 i 5MX, HP Jornada 720, a finalnie Sharp Zaurus. Były to bardzo wydajne – jak na owe czasy – komputery kieszonkowe z prawdziwymi systemami operacyjnymi. Chociaż współczesne smartfony, o wiele potężniejsze pod względem funkcjonalnym niż jakiekolwiek urządzenia mobilne z tamtych czasów, dawno wyparły je z rynku, to – jak zauważa autor tego projektu – zniknięcie kategorii urządzeń PDA i UMPC pozostawiło po sobie pustą przestrzeń.

Celem tego projektu jest stworzenie zaawansowanego urządzenia, które można byłoby z powodzeniem wdrożyć do produkcji – wystarczająco wydajnego, aby móc uruchomić na nim środowisko Linux Desktop Environment, a jednocześnie superprzenośnego i... niedrogiego.

Autor stawia kilka początkowych wymagań:

- Finalne urządzenie ma być prawdziwym komputerem z systemem Linux, a nie tylko – jak smartfony – z Androidem (np. Gemini/Cosmo firmy Plant Computer, PinePhone, Astro Slide).
- Sprzęt musi być wystarczająco wydajny, aby móc uruchomić środowisko Linux Desktop (chociaż nie ma potrzeby, aby moc obliczeniowa była porównywalna do typowego smartfona).

- Komputer musi mieć „przyzwoity" wyświetlacz, choć nie jest wymagana bardzo wysoka rozdzielczość.
- Docelowa wersja urządzenia musi być możliwie mała (kieszonkowa).
- Sprzęt powinien być wyposażony w fizyczną klawiaturę (co okazuje się najprawdopodobniej najtrudniejszą częścią projektu).
- Do ładowania wbudowanego akumulatora należy zastosować port USB-C.
- Komputerek ma zapewnić co najmniej 1 port USB A do podłączenia akcesoriów zewnętrznych.
- I wreszcie – sprzęt musi być tani; autor określił graniczną cenę na 99 dolarów.

Dodatkowo autor chciałby, aby system był wyposażony w kilka dodatkowych linii GPIO do obsługi kart rozszerzeń i innych modułów, a także możliwość ładowania bezprzewodowego. Warto dodać ten projekt do obserwowanych, aby zobaczyć, jaką ścieżką podąży autor i ile z wymienionych założeń uda mu się osiągnąć.

https://tiny.pl/q6dwqs_c

Kamera akustyczna DIY

Opisany projekt to bardzo ciekawa konstrukcja, pozwalająca na fuzję danych akustycznych i wizualnych w czasie rzeczywistym. Nazwany został kamerą akustyczną, ponieważ umożliwia obrazowanie źródeł dźwięku – system pokazuje na obrazie wideo lokalizację, w której znajduje się obiekt emitujący fale akustyczne.

System bazuje na UMA-16 – macierzy 4×4 mikrofonów kierunkowych MEMS, sprzęgniętej z kamerą wideo. Urządzenie przetwarza sygnały z mikrofonów i na ich podstawie tworzy obraz, na którym można zobaczyć miejsca o największej intensywności dźwięku. W ten sposób konstruowana jest „heatmapa" hałasu.

Oprogramowanie projektu opracowano w Pythonie, korzystając z OpenCV oraz PyAudio. System używa algorytmu z biblioteki Acoular do formowania wiązki audio. Rezultat jest następnie interpolowany, by zwiększyć rozdzielczość pomiaru. Następnie wyniki pomiarów akustycznych są wizualizowane i nanoszone na obraz z kamery wideo.

Kamery akustyczne znajdują zastosowanie w m.in. w lokalizacji źródeł hałasu w maszynach, diagnostyce akustycznej i ocenie efektywności tłumienia dźwięku. Korzysta się z nich też w systemach służących do wykrywania i namierzania dronów.

https://tiny.pl/0bsz5gqk

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Premierowe edycje targów Wire Tech Poland 2025 i Tube Technic Poland 2025

Już 14...16 stycznia 2025 r., na terenie Międzynarodowego Centrum Targowo-Kongresowego Ptak Warsaw Expo – największego tego typu obiektu w Europie Środkowej – będą miały miejsce dwa premierowe wydarzenia branżowe: targi Wire Tech Poland oraz Tube Technic Poland. Obydwa eventy to propozycje obowiązkowe dla wszystkich, którzy zajmują się szeroko pojętą elektroniką, automatyką przemysłową oraz różnego rodzaju instalacjami hydraulicznymi czy pneumatycznymi. „Elektronika Praktyczna" jest Patronem Medialnym wydarzeń, które pokrótce zaprezentujemy w niniejszym artykule.

Wire Tech 2025

Event Wire Tech 2025 – jedyne w Polsce targi poświęcone branży kablowej i elektrotechnicznej – zgromadzą liderów technologii związanych zarówno z samym okablowaniem, jak i szeroką gamą akcesoriów oraz powiązanych usług w obszarze produkcji niestandardowych wiązek kablowych.

Wśród wystawców znajdą się firmy oferujące swoje produkty i usługi w zakresie obejmującym między innymi:

- przewody jedno- i wielożyłowe,
- druty nawojowe i specjalistyczne,
- przewody konfekcjonowane (przyłączeniowe, spiralne itp.),
- kable koncentryczne,
- kable specjalnego przeznaczenia (fotowoltaiczne, energetyczne, telekomunikacyjne, dźwigowe, suwnicowe, sterownicze i in.),
- koszulki osłonowe, peszle i oploty,
- rury osłonowe,
- akcesoria montażowe (przepusty, systemy mocowania),
- usługi produkcji wiązek kablowych i światłowodowych,
- usługi produkcji i naprawy przewodów światłowodowych,
- usługi konfekcjonowania przewodów.

Udział w wydarzeniu to doskonała okazja do zapoznania się z najnowszymi technologiami oraz nawiązania cennych kontaktów biznesowych. W programie przewidziano inspirujące prezentacje oraz warsztaty prowadzone przez ekspertów. Wydarzenie obejmie także ceremonię wręczenia dyplomów i medali w trzech kategoriach:

- **Premiera Targowa:** uznanie dla wystawców, którzy wprowadzili na targach innowacyjne produkty lub usługi, prezentując je po raz pierwszy szerokiej publiczności.
- **Innowacyjność:** wyróżnienie dla firm, które zaprezentowały przełomowe technologie lub rozwiązania, mające potencjał do rewolucjonizowania branży.
- **Ekspozycja Targowa:** nagroda przyznawana za wyjątkową aranżację i estetykę stoiska, które wyróżnia się kreatywnością i przyciąga uwagę odwiedzających.

Na gości czeka także specjalna Strefa Networkingu B2B, oferująca uczestnikom unikalną okazję do bezpośrednich rozmów z prelegentami i innymi ekspertami z branży. W ramach Strefy uczestnicy będą mogli wymieniać się spostrzeżeniami, zadawać pytania

eprasa.pl f9fe7f8d6b

i nawiązywać wartościowe kontakty biznesowe w mniej formalnej atmosferze.

Tube Technic 2025

Drugie wydarzenie zaplanowane na 14...16 stycznia 2025 r. na terenie Międzynarodowego Centrum Targowo-Kongresowego Ptak Warsaw Expo to – także premierowe – targi skierowane do profesjonalistów z sektora rur i technologii ich przetwarzania.

Targi Tube Technic 2025 w liczbach:

- ponad 70 wystawców,
- ponad 200 marek produktów i usług specjalistycznych,
- 15 000 m² powierzchni wystawienniczej,
- przeszło 5000 odwiedzających z ponad 12 krajów świata.

Wśród wystawców zaprezentują się firmy oferujące usługi i produkty w zakresie:

- usług produkcji oraz dystrybucji rur i przewodów,
- maszyn i urządzeń do obróbki rur,
- systemów montażu i łączenia rur,
- technologii przesyłowych,
- systemów kontroli i monitoringu przepływu,
- automatyzacji i robotyki w aplikacjach związanych z montażem i utrzymaniem rurociągów.

Uczestnicy będą mieli szansę odkryć innowacje w dziedzinie orurowania oraz wziąć udział w warsztatach i panelach dyskusyjnych, które przybliżą najnowsze rozwiązania technologiczne, produkty i usługi specjalistyczne. Za sprawą szerokiego zakresu tematycznego targi Tube Technic 2025 stanowią wydarzenie, na którym nie może zabraknąć:

- inwestorów budowlanych i przedstawicieli firm budowlanych,
- inżynierów i specjalistów ds. technologii materiałowych oraz produkcji,
- projektantów i menedżerów projektów budowlanych oraz inżynieryjnych,
- wykonawców i podwykonawców prac instalacyjnych oraz inżynierów ds. instalacji,
- specjalistów ds. eksploatacji i utrzymania systemów przesyłowych,
- dystrybutorów i przedstawicieli działów zakupów oraz zapotrzebowania.

Gdzie i kiedy?

Obydwa wydarzenia będą miały miejsce w dniach 14, 15 i 16 stycznia 2025 roku na terenie Międzynarodowego Centrum Targowo-Kongresowego Ptak Warsaw Expo, mieszczącego się w Nadarzynie przy al. Katowickiej 62 – zaledwie 10 minut drogi od Międzynarodowego Portu Lotniczego im. Fryderyka Chopina, a także 13 minut od dworca Warszawa Zachodnia. Centrum Ptak Warsaw Expo dysponuje piętnastoma tysiącami miejsc parkingowych, a dla odwiedzających przygotowane zostały ponadto specjalne oferty cenowe na noclegi w czołowych warszawskich hotelach – po więcej szczegółów zapraszamy na oficjalne strony internetowe wydarzeń:

- https://tubetechnicpoland.com/
- https://wiretechpoland.com/

oraz witrynę Organizatora:

- https://warsawexpo.eu/

eprasa.pl f9fe7f8d6b

AVT sklep

W ofercie AVT*
AVT6063

Najważniejsze parametry:
- zakres pomiarowy: ±10 A,
- pasmo przenoszenia: > 10 kHz,
- dokładność w pełnym zakresie: >= 2,5%,
- zasilanie: 6...15 V (DC),
- pobór prądu: 20 mA.

Dodatkowe materiały do pobrania ze strony www.ulubionykiosk.pl/media

AVT5991	Sonda logarytmiczna z układem AD8307, część 1 i 2 (EP 8–9/2024)
AVT3257	Izolowana galwanicznie sonda oscyloskopowa 2,5 kV (EdW 10/2019)
AVT3241	Różnicowa sonda oscyloskopowa 20 MHz (EdW 5/2019)
AVT1962	Ekonomiczna sonda logarytmiczna (EP 8/2017)
AVT5378	Różnicowa sonda pomiarowa z izolacją galwaniczną (EP 1/2013)

* **Uwaga!** Elektroniczne zestawy do samodzielnego montażu. Wymagana umiejętność lutowania! Podstawową wersją zestawu jest wersja **[B]** nazywana potocznie KIT-em (z ang. zestaw). Zestaw w wersji **[B]** zawiera elementy elektroniczne (w tym **[UK]** – jeśli występuje w projekcie), które należy samodzielnie wlutować w dołączoną płytkę drukowaną (PCB). Wykaz elementów znajduje się w dokumentacji, która jest podlinkowana w opisie kitu. Mając na uwadze różne potrzeby naszych klientów, oferujemy dodatkowe wersje:

- **wersja [C]** – zmontowany, uruchomiony i przetestowany zestaw **[B]** (elementy wlutowane w płytkę PCB),
- **wersja [A]** – płytka drukowana bez elementów i dokumentacji.

Kity, w których występuje układ scalony wymagający zaprogramowania, mają następujące dodatkowe wersje:
- **wersja [A+]** – płytka drukowana **[A]** + zaprogramowany układ **[UK]** i dokumentacja,
- **wersja [UK]** – zaprogramowany układ.

Nie każdy zestaw AVT występuje we wszystkich wersjach! Każda wersja ma załączony ten sam plik PDF! Podczas składania zamówienia upewnij się, którą wersję zamawiasz!
http://sklep.avt.pl

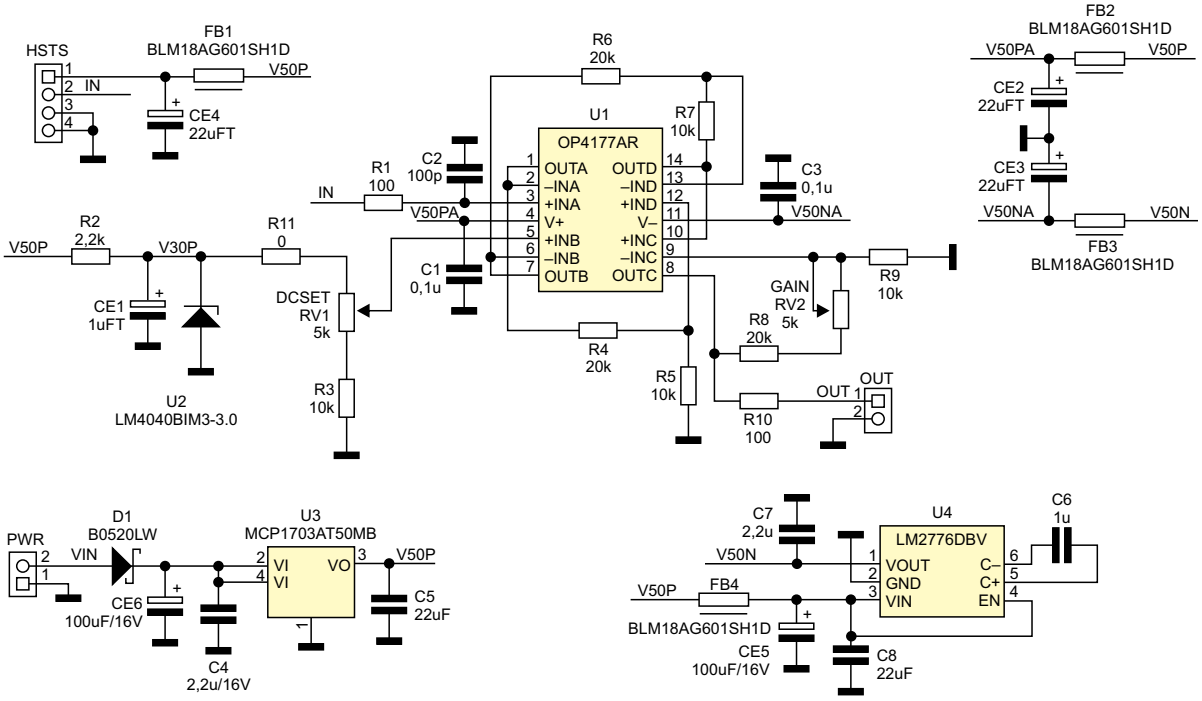
W przypadku braku dostępności na stronie sklepu osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt via e-mail: **kity@avt.pl**.

CurrentProbeHSTS

– sonda prądowa do oscyloskopu

Niewielki moduł umożliwiający użycie przetwornika prądowego Halla typu HSTS016L w roli prostej sondy oscyloskopowej. Przetwornik oferuje zakres ±10 A, użyteczne pasmo przenoszenia powyżej 10 kHz. Autor układu nie ma ambicji zastąpienia opisywanym modułem koszmarnie drogich, fabrycznych konstrukcji prądowych sond oscyloskopowych, a tylko umożliwienie technicznych pomiarów prądu, przy zachowaniu izolacji galwanicznej, prostoty pomiaru (związanej z otwieraną konstrukcją przetwornika) oraz – co najistotniejsze – rozsądnych kosztów, a to bardzo istotne przy konieczności pomiarów prądu w kilku kanałach jednocześnie.

Każdy ze sposobów pomiaru prądu ma swoje wady i zalety. Najprostsza jest metoda bocznikowa – pomiar spadku napięcia na rezystorze pomiarowym nie zapewnia jednak izolacji galwanicznej, a dodatkowo wymaga ingerencji w obwód. Z kolei przekładniki prądowe z natury nie nadają się do obwodów prądu stałego. Pozostają czujniki Halla, umożliwiające pomiar zarówno prądu stałego, jak i przemiennego. Jeśli dodatkowo mają one konstrukcję transformatora prądowego z dzielonym rdzeniem (tak jak przetworniki HSTS), nie wymagają żadnej ingerencji w obwód, a jedynie „założenia" przetwornika na przewód. Niestety zalety czujnika Halla okupione są wadami, takimi jak wrażliwość na obce pola magnetyczne czy niezbyt szerokie pasmo przenoszenia, związane z materiałem rdzenia współpracującego z przetwornikiem. Pomimo tych wad warto taką uproszczoną sondę skonstruować i użytkować w warsztacie, chociażby do jakościowej oceny przebiegu prądu w obwodzie, co może wspomóc uruchamianie lub diagnozę układów. Schemat sondy zaprezentowano na **rysunku 1**.



Rysunek 1. Schemat układu sondy

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Wykaz elementów:

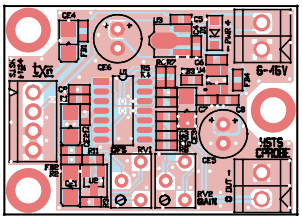
Rezystory: (SMD 0603, 1%)
R1, R10: 100 Ω
R2: 2,2 kΩ
R3, R5, R7, R9: 10 kΩ
R4, R6, R8: 20 kΩ
R11: 0 Ω

Półprzewodniki:
D1: dioda Schottky'ego B0520LW (SOD123)
U1: OP4177AR (SO14)
U2: LM4040BIM3-3.0 (SOT-23)
U3: MCP1703AT5002MB (SOT-89)
U4: LM2776DBV (SOT-23-6)

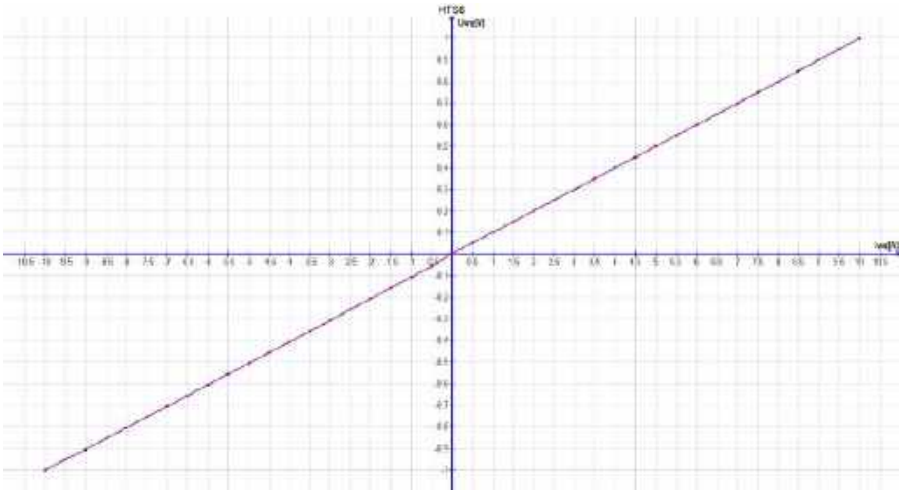
Kondensatory:
C1, C3: 100 nF (SMD 0603, X5R, 50 V)
C2: 100 pF (SMD 0603, NP0, 50 V)
C4, C7: 2,2 µF (SMD 0603, X5R, 16 V)
C5, C8: 22 µF (SMD 0603, X5R, 10 V)
C6: 1 µF (SMD 0603, X5R, 16 V)
CE1: 1 µF (tantalowy SMD 3216, 10 V)
CE2...CE4: 22 µF (tantalowy SMD 3216, 10 V)
CE5, CE6: 100 µF (elektrolityczny low ESR, CED6.3P2.5, 16 V)

Pozostałe:
FB1...FB4: dławik ferrytowy
BLM18AG601SH1D (SMD 0603)
HSTS: złącze MPT 4 pin 2,54 mm (typ MPT0.5/4-2.54)
OUT, PWR: złącze DG 2 pin 3,5 mm (typ DG381-3.5-2)
RV1, RV2: 5 kΩ (potencjometr wieloobrotowy T63YB)

Fotografia 1. Przetwornik HSTS016L (z materiałów PowerUC/YHDC)



Rysunek 2. Rozmieszczenie elementów na PCB



Rysunek 3. Charakterystyka przetwarzania modelowego egzemplarza układu

Przetwornik HSTS016L, którego wygląd pokazano na **fotografii 1**, podłączony jest do złącza HSTS. Moduł wymaga stabilizowanego napięcia zasilania o wartości 5 V (przewód czerwony: +5 V, czarny: GND, ekran: GND). Sygnał wyjściowy (przewód żółty) odniesiony jest do połowy napięcia zasilania, czyli 2,5 V, co odpowiada zerowemu prądowi w przewodzie znajdującym się wewnątrz okna pomiarowego. Zakres pomiaru, równy ±10 A, odpowiada zmianie napięcia wyjściowego o ±0,625 V względem poziomu odniesienia. Czujniki są fabrycznie skalibrowane. Sygnał wyjściowy z przetwornika, poprzez filtr złożony z elementów R1 i C2, trafia do wzmacniacza buforowego U1(A). Napięcie odniesienia o wartości 3 V wytwarzane jest przez układ U2. Potencjometr RV1 (DCSET) umożliwia regulację napięcia odniesienia, które jest dodatkowo buforowane przez U1(B). Oba napięcia doprowadzono do wzmacniacza różnicowego U1(D) o wzmocnieniu 0,5 V/V. Sygnał z odjętym offsetem trafia następnie do wzmacniacza wyjściowego U1(C), o wzmocnieniu regulowanym potencjometrem RV2 (GAIN), a stamtąd – już po przeskalowaniu do zakresu ±1 V – do złącza OUT.

Układ zasilany jest napięciem 9 V z baterii 6F22 lub dowolnego innego źródła 6...15 V, podłączonego do złącza PWR. Dioda D1 zabezpiecza układ przed uszkodzeniem przy błędnym podłączeniu zasilania. Stabilizator LDO U3 typu MCP1703 dostarcza napięcie 5 V, którym zasilane są: źródło napięcia odniesienia U2 oraz przetwornica U4 typu LM2776, generująca napięcie –5 V niezbędne do zasilania wzmacniacza U1.

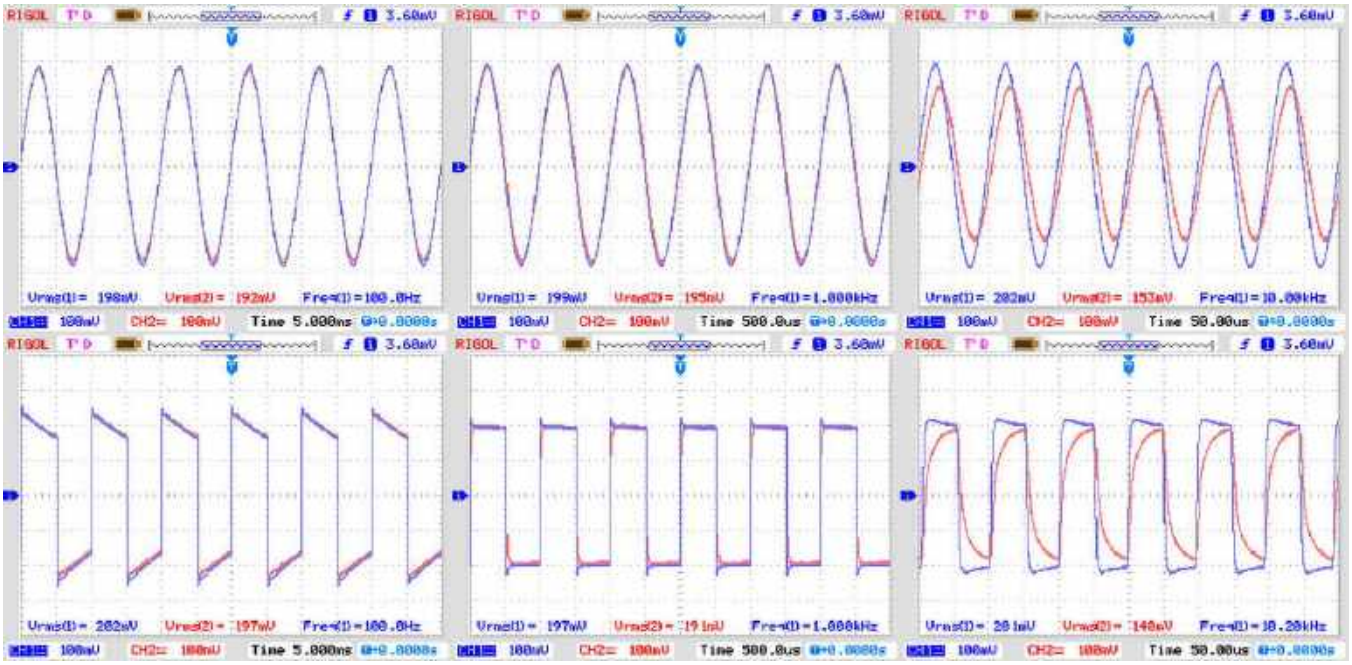
Montaż i uruchomienie

Układ wykonany jest na dwustronnej płytce drukowanej. Rozmieszczenie elementów pokazano na **rysunku 2**. Montaż układu nie wymaga dokładniejszego opisu. Gotowy moduł widnieje na **fotografii tytułowej**.

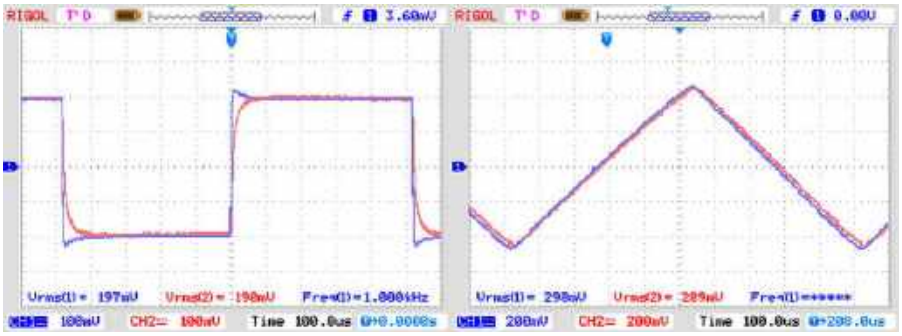
Po poprawnym montażu, podłączeniu przetwornika HSTS016 do złącza HSTS oraz zasileniu układu z baterii 6F22 lub zasilacza 6...15 V/20 mA należy sprawdzić obecność napięć +3 V (V30P) oraz ±5 V (V50P/N). Sonda wymaga kalibracji – po odczekaniu kilkunastu minut (w celu ustalenia warunków termicznych) do wyjścia należy podłączyć woltomierz prądu stałego i potencjometrem RV1 (DCSET) ustawić napięcie 0 V na wyjściu sondy. Należy zwrócić szczególną uwagę na obecność zewnętrznych pól magnetycznych, które mogłyby zafałszować wskazania. Kalibracja prądu wymaga założenia przetwornika na przewód, przez który płynie ustalony prąd o natężeniu równym 10 A, np. z zasilacza do sztucznego obciążenia. Następnie ustawiamy potencjometrem

REKLAMA

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Rysunek 4. Porównanie sond Hameg i HSTS, pasmo przenoszenia



Rysunek 5. Porównanie sond Hameg i HSTS, zbocza i liniowość

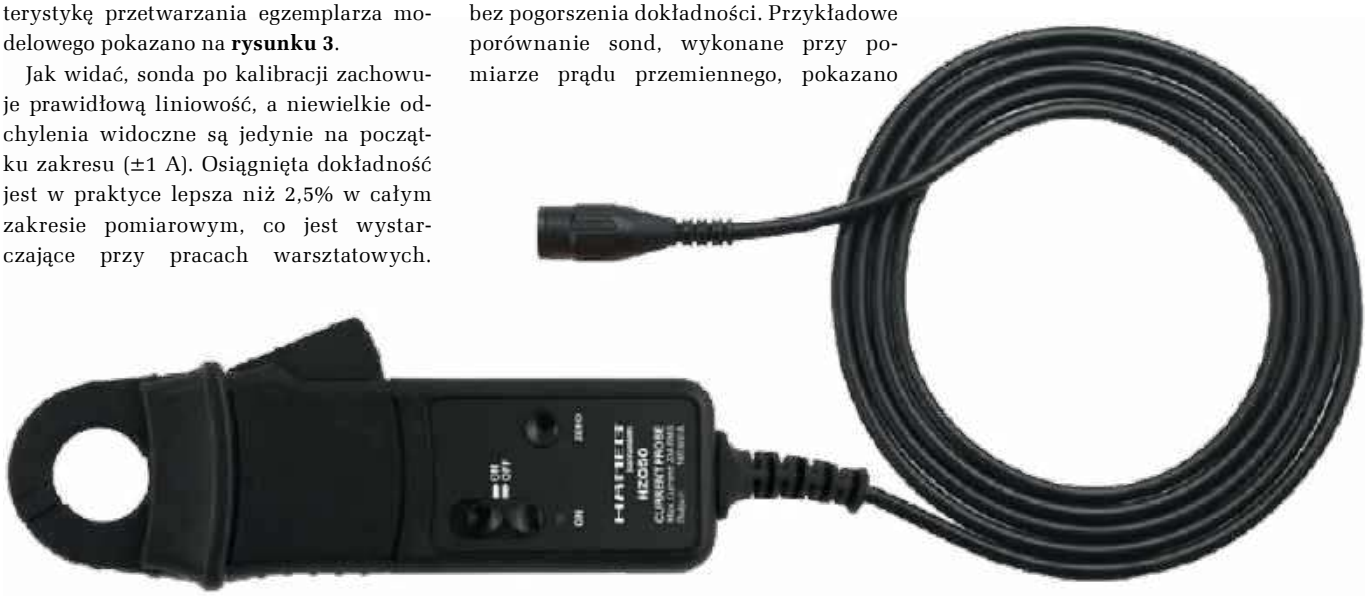
RV2 (GAIN) napięcie wyjściowe 1 V (lub –1 V, zależnie od kierunku przepływu prądu). Warto sprawdzić przetwornik w kilku punktach pomiarowych, korygując ewentualny offset i wzmocnienie. Zakres regulacji DCSET można zawęzić, zmieniając wartości rezystorów R3, R11. Zmierzoną charakterystykę przetwarzania egzemplarza modelowego pokazano na **rysunku 3**.

Jak widać, sonda po kalibracji zachowuje prawidłową liniowość, a niewielkie odchylenia widoczne są jedynie na początku zakresu (±1 A). Osiągnięta dokładność jest w praktyce lepsza niż 2,5% w całym zakresie pomiarowym, co jest wystarczające przy pracach warsztatowych. Bezpośrednie porównanie do sondy Hameg HZO050 (**fotografia 2**) wykazuje zbieżne wskazania, przebiegi sygnałów sond podłączonych do dwóch kanałów oscyloskopu praktycznie nakładają się w zakresie prądów ±10 A. Modelowa sonda ma możliwość niewielkiego przekroczenia zakresu bez pogorszenia dokładności. Przykładowe porównanie sond, wykonane przy pomiarze prądu przemiennego, pokazano na **rysunku 4**. Przebieg w kolorze niebieskim to sonda HZO050, przebieg czerwony to model z przetwornikiem HSTS.

W wyniku porównania sond widoczne jest węższe pasmo przenoszenia, skutkujące obniżeniem poziomu sygnału o częstotliwości 10 kHz. Zachowanie się obu sond na zboczach sygnału oraz pomiary przebiegu trójkątnego, pozwalającego oszacować liniowość układu, widać na **rysunku 5**.

Po sprawdzeniu działania sondy zalecane jest zamknięcie wzmacniacza i baterii w obudowie z ekranem. Eksperymentując z pojemnością kondensatora filtru C2 i długością przewodu czujnika HSTS, można nieco poszerzyć pasmo przenoszenia sondy.

Adam Tatuś, EP



Fotografia 2. Sonda Hameg HZO050 (https://t.ly/GnaHD)

eprasa.pl f9fe7f8d6b

AVT sklep

W ofercie AVT*

AVT6064

Najważniejsze parametry:
- napięcia wyjściowe: 5 V (1,5 A), 8,4 V (2 A lub 2×1,5 A), 12 V (1,5 A),
- zasilanie: 1..3 akumulatorów NP-F970/F990,
- obwody 8,4 V zabezpieczone bezpiecznikami polimerowymi (wyjścia 2×1,5 A) oraz szybkim bezpiecznikiem elektronicznym (wyjście 2 A),
- dwa gniazda USB A udostępniające napięcie 5 V @ 1,5 A (sumarycznie),
- wbudowane obwody przełączania wejść, ułatwiające wymianę akumulatorów w trakcie użytkowania zasilacza.

Dodatkowe materiały do pobrania ze strony www.ulubionykiosk.pl/media

AVT6057	Miniaturowy zasilacz napięć ustalonych (EP 10/2024)
AVT6029	Zasilacz PoE 5/12 V 30 W (EP 3/2024)
–––––	Zasilacz do płytek stykowych ze złączem USB-C (EP 10/2023)
AVT5977	Stabilizator napięcia symetrycznego z regulacją współbieżną (EP 3/2023)
AVT5963	Zasilacz warsztatowy, część 1 i 2 (EP 12/2022, 01/2023)
–––––	Modułowy zasilacz warsztatowy (EP 5/2022)
–––––	Regulowany zasilacz warsztatowy – RPS-02 (EP 4/2022)
AVT5915	Zasilacz 5 V/1 A z szerokim zakresem napięć wejściowych (EP 1/2022)
AVT5908	Beztransformatorowy impulsowy zasilacz sieciowy (EP 12/2021)

* **Uwaga!** Elektroniczne zestawy do samodzielnego montażu. Wymagana umiejętność lutowania! Podstawową wersją zestawu jest wersja **[B]** nazywana potocznie KIT-em (z ang. zestaw). Zestaw w wersji **[B]** zawiera elementy elektroniczne (w tym **[UK]** – jeśli występuje w projekcie), które należy samodzielnie wlutować w dołączoną płytkę drukowaną (PCB). Wykaz elementów znajduje się w dokumentacji, która jest podlinkowana w opisie kitu. Mając na uwadze różne potrzeby naszych klientów, oferujemy dodatkowe wersje:
- **wersja [C]** – zmontowany, uruchomiony i przetestowany zestaw **[B]** (elementy wlutowane w płytkę PCB),
- **wersja [A]** – płytka drukowana bez elementów i dokumentacji.

Kity, w których występuje układ scalony wymagający zaprogramowania, mają następujące dodatkowe wersje:
- **wersja [A+]** – płytka drukowana **[A]** + zaprogramowany układ **[UK]** i dokumentacja,
- **wersja [UK]** – zaprogramowany układ.

Nie każdy zestaw AVT występuje we wszystkich wersjach! Każda wersja ma załączony ten sam plik PDF! Podczas składania zamówienia upewnij się, którą wersję zamawiasz! **http://sklep.avt.pl**

W przypadku braku dostępności na stronie sklepu osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt via e-mail: **kity@avt.pl**.

Zasilacz do ministudia fotograficznego

Opisany zasilacz powstał z potrzeby chwili, związanej z koniecznością znaczącego wydłużenia czasu pracy zestawu do makrofotografii, składającego się z aparatu fotograficznego, lamp doświetlających oraz monitora podglądowego, a pracującego w miejscu pozbawionym dostępu do zasilania sieciowego.

Zasilacz dostarcza typowych napięć 5 V, 8,4 V oraz 12 V, stosowanych w osprzęcie fotograficznym. Jako źródło energii użyte zostały trzy akumulatory typu NP-F970/F990. Wbudowany obwód sumatora zasilania (diody OR-Ring) umożliwia wydłużenie czasu pracy zasilacza oraz zapewnia możliwość wymiany rozładowanych akumulatorów bez konieczności wyłączania systemu (funkcja hot-swap) i związanego z tym przerywania sesji.

Schemat zasilacza pokazano na **rysunku 1**. Układ składa się z czterech bloków funkcjonalnych:
- kontrolera redundancji zasilania z diodami OR-Ring,
- przetwornicy obniżającej 5 V/1,5 A,
- obwodów rozdziału i zabezpieczeń napięcia 8,4 V,
- przetwornicy podwyższającej 12 V/1,5 A.

Pierwszy z wymienionych podsystemów oparty jest na sterownikach diody idealnej AP74700W, współpracujących z tranzystorami kluczującymi MOSFET o niskiej rezystancji Rds w stanie przewodzenia. Każdy z trzech akumulatorów, podłączonych do odpowiadającego im złącza spośród ACCU1..3, współpracuje z własnym kontrolerem diody idealnej U1..3. Wyjścia wszystkich trzech kontrolerów połączone są równolegle w pierścień OR-Ring zasilający szynę V84BUS. Kontrolery umożliwiają bezprzerwowe zasilanie obciążenia podczas wymiany akumulatora, o ile oczywiście podłączony jest chociaż jeden z nich. Na wyjście układu przekazywane jest najwyższe z dostępnych napięć akumulatorów, a w momencie gdy napięcia wyrównają się, źródła są obciążane równocześnie. Dodatkowo blokowany jest przepływ wsteczny pomiędzy poszczególnymi akumulatorami. Należy pamiętać, aby nie przeciążać akumulatora NP-F970 – większość egzemplarzy umożliwia bezproblemowe obciążenie mocą ok. 30 W, a wydajniejsze modele do 45 W. Połączenie równoległe akumulatorów w opisywanym zasilaczu nie służy do zwiększania wartości maksymalnej pobieranego prądu, a jedynie do zwiększenia pojemności i wydłużenia czasu pracy. Transile TVS1..3 na wejściach ACCU1..3 zabezpieczają układy U1..3 przed skutkami przepięć podczas wymiany akumulatorów.

Przetwornica obniżająca 5 V/1,5 A, oparta na układzie U5 typu AP63205W, służy do zasilania pomocniczego oświetlenia LED lub małego namiotu bezcieniowego. Napięcie wyjściowe wyprowadzone jest na typowe w tych zastosowaniach gniazdo USB A, oznaczone DCA5V (zastosowano podwójne gniazdo).

Większość aparatów zasilana jest napięciem 8,4 V pochodzącym z dwóch szeregowo połączonych akumulatorów Li-Ion. Szyna V84BUS z kontrolera redundancji rozdzielona jest na dwa obwody. Pierwszy z nich, wyprowadzony na gniazdo DCA8V (5,5/2,1 mm), służy do zasilania aparatu fotograficznego – poprzez adapter akumulatora, tzw. Dummy-Battery, odpowiedni dla danego producenta aparatu i umieszczany w aparacie w miejscu akumulatora. Obwód ten zabezpieczony jest szybkim bezpiecznikiem elektronicznym U1 typu STELP01PUR. Maksymalny prąd

Wykaz elementów:

Rezystory: (SMD 0603, 1%)
R1: 22 Ω
R2: 180 kΩ
R3, R9, R10: 100 kΩ
R4, R11: 24 kΩ
R5: 750 kΩ
R6: 82 kΩ
R7, R8: 10 kΩ

Kondensatory:
C1...C10: 1 µF (SMD 0603, X5R)
C11, C13: 10 µF/16 V (SMD 0603, X5R)
C12: 1 nF (SMD 0603, NP0)
C14, C21: 100 nF/50 V (SMD 0603, X5R)
C15...C18, C22...C24: 22 µF/16 V (SMD 0805, X5R)
C19: 4,7 µF/25 V (SMD 0603, X5R)
C20: 1,2 nF (SMD 0603, NP0)

Półprzewodniki:
LD1: dioda LED zielona (SMD 0603)
TVS1...TVS3: SM6T12CA (SMB)
Q1...Q3: DMTH6010LK3 (TO-252)
U1...U3: AP74700QW6-7 (SOT-26)
U4: STELPD01PUR (DFN10L_050)
U5: AP63205QWU-7 (TSOT26)
U6: TPS611781RNW (VQFN-HR13)

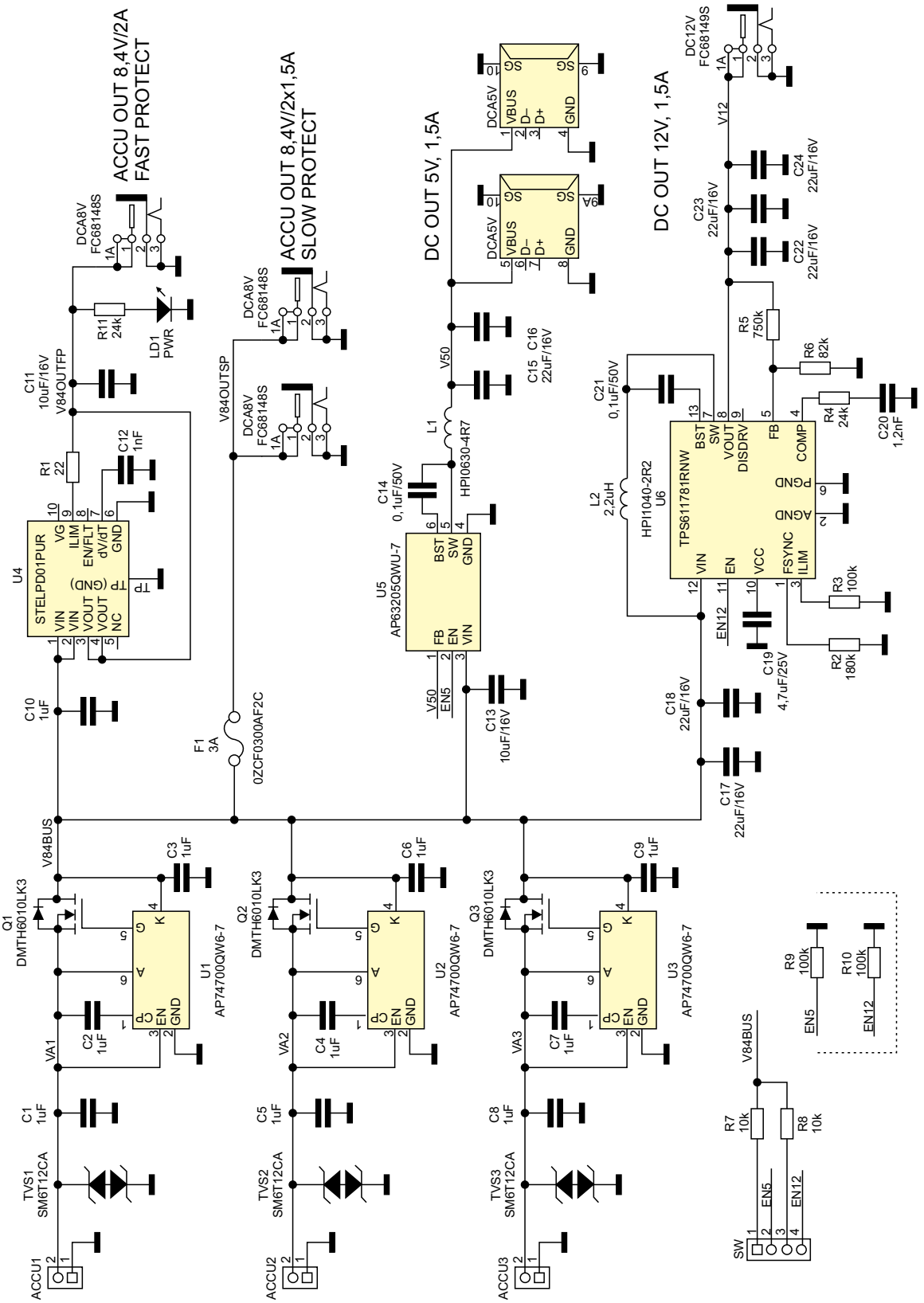
Pozostałe:
ACCU1...ACCU3: złącze śrubowe DG 5 mm, 2 pin (typ DG126-5.0-2)
DC12V: gniazdo DC 2,5 mm, SMD (typ FC68149S)
DCA5V: gniazdo USB typu A, podwójne (typ FCK002A)
DCA8V, DCB8V, DCC8V: gniazdo DC 2,1 mm SMD (typ FC68148S)
F1: bezpiecznik polimerowy 3 A (SMD 2920, typ 0ZCF0300AF2C)
L1: dławik mocy SMD (typ HPI0630-4R7)
L2: dławik mocy SMD (typ HPI1040-2R2)
SW: złącze JST 2 mm kątowe, SMD (typ S4B_PHSM4TB)

eprasa.pl f9fe7f8d6b

wyjściowy to 2 A. Każde przeciążenie lub zwarcie w obwodzie powoduje szybkie wyłączenie zasilania i wymaga resetu poprzez odłączenie wszystkich akumulatorów. Obecność napięcia wyjściowego sygnalizowana jest diodą LD1 (PWR). Drugi obwód 8,4 V, zabezpieczony bezpiecznikiem polimerowym F1 (3 A), służy do zasilania naświetlaczy panelowych LED o mocy maksymalnej 24 W. Napięcie wyjściowe wyprowadzono na gniazda DCB8V, DCC8V (5,5/2,1 mm).

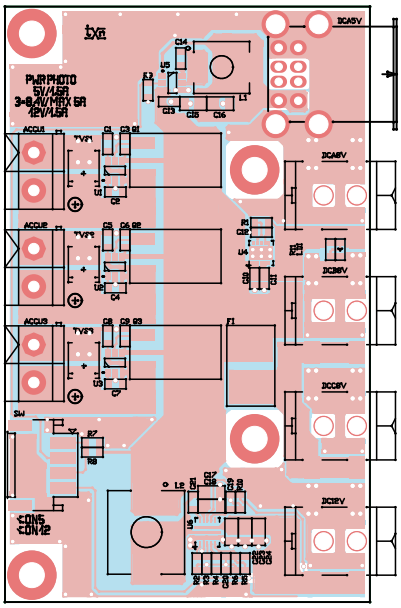
Przetwornica podwyższająca 8,4 V/12 V (1,5 A), zbudowana na bazie układu U6 typu TPS611781 w typowej aplikacji, służy do zasilania monitora podglądowego. Obciążalność przetwornicy dostosowana jest do większości monitorów o przekątnych od 5" do 7". Napięcie wyjściowe dostępne jest poprzez gniazdo DC12V (5,5/2,5 mm).

Na złącze SW wyprowadzono sygnały sterujące pracą przetwornic 5 V, 12 V. Zwarcie wyprowadzeń 1–2 aktywuje przetwornicę 5 V, a zwarcie wyprowadzeń 3–4 – przetwornicę 12 V. Po podłączeniu opcjonalnych zewnętrznych przełączników ON/OFF można sterować pracą przetwornic



Rysunek 1. Schemat ideowy zasilacza

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Rysunek 2. Rozmieszczenie elementów na PCB

w celu ograniczenia poboru mocy z akumulatora, gdy napięcia nie są wykorzystywane. Przetwornica 12 V, ze względu na obecność wewnętrznej diody pasożytniczej klucza mocy i uproszczenie aplikacji o obwód zewnętrznego tranzystora odcinającego obciążenie, nie odcina całkowicie wyjścia, ale obniża pobór mocy poniżej 1 mA, co okazuje się jednak wystarczające w tym zastosowaniu. Z tego względu zaleca się odłączenie urządzenia zasilanego z gniazda DC12V, jeżeli nie jest używane, aby zapobiec niepotrzebnym upływom.

Układ zmontowano na dwustronnej płytce drukowanej, rozmieszczenie elementów pokazano na **rysunku 2**. Montaż jest typowy i nie wymaga opisu. Zmontowany moduł można zobaczyć na **fotografii tytułowej**.

Poprawnie złożony układ nie wymaga uruchamiania. Należy sprawić jedynie poprawność lutowania i wyczyścić płytkę z topnika. Wstępne uruchomienie warto wykonać za pomocą zasilacza laboratoryjnego z ograniczeniem prądowym. Po podłączeniu napięcia wystarczy skontrolować wartości napięć wyjściowych oraz działanie funkcji wyłączania przetwornic 5 V oraz 12 V. W praktycznej aplikacji można zastosować także dodatkowe wyłączniki ON/OFF 12 V/10 A, wpięte szeregowo w biegun dodatni każdego z akumulatorów i umożliwiające całkowite wyłączenie zasilania.

Do wyprowadzenia napięcia z akumulatorów można użyć płytki adaptera z jednej z dostępnych na rynku, uniwersalnych ładowarek akumulatorów foto. Oczywiście można użyć innych typów akumulatorów i płytek adapterów, pamiętając o maksymalnej obciążalności zastosowanych modeli oraz każdorazowo zweryfikować pobór prądu podłączonych urządzeń.

Adam Tatuś, EP

AVT sklep

W ofercie AVT*

AVT6065

Najważniejsze parametry:
- zakres pomiaru prądu: 0...5 A (AC),
- zakres pomiaru napięcia: 0...300 V (AC),
- zakres napięcia wyjściowego: 0...3 V (DC) w obydwu kanałach*,
- błąd przetwarzania: < 2% (@ 50 Hz...1 kHz),
- zasilanie części pomiarowej: 5 V/50 mA (DC).

* możliwość zmiany na zakres 0...2,5 V przy zasilaniu napięciem 3,3 V – patrz tekst.

Dodatkowe materiały do pobrania ze strony www.ulubionykiosk.pl/media

----	Wielozakresowy przetwornik prądu z czujnikiem Halla (EP 7/2023)
----	Przetwornik prądu przemiennego z transformatorem prądowym (EP 6/2023)
AVT5969	powerMonitor – miniaturowy miernik parametrów elektrycznych (EP 2/2023)
----	Przetwornik prądu przemiennego na DC True RMS (EP 10/2022)
----	Przetwornik napięcia przemiennego na DC True RMS (EP 10/2022)
AVT5954	Warsztatowy Multi Tester (EP 10/2022)
AVT5933	Miernik napięcia dodatniego i ujemnego (EP 5/2022)

* **Uwaga!** Elektroniczne zestawy do samodzielnego montażu. Wymagana umiejętność lutowania! Podstawową wersją zestawu jest wersja **[B]** nazywana potocznie KIT-em (z ang. zestaw). Zestaw w wersji **[B]** zawiera elementy elektroniczne (w tym **[UK]** – jeśli występuje w projekcie), które należy samodzielnie wlutować w dołączoną płytkę drukowaną (PCB). Wykaz elementów znajduje się w dokumentacji, która jest podlinkowana w opisie kitu. Mając na uwadze różne potrzeby naszych klientów, oferujemy dodatkowe wersje:
- **wersja [C]** – zmontowany, uruchomiony i przetestowany zestaw **[B]** (elementy wlutowane w płytkę PCB),
- **wersja [A]** – płytka drukowana bez elementów i dokumentacji.

Kity, w których występuje układ scalony wymagający zaprogramowania, mają następujące dodatkowe wersje:
- **wersja [A+]** – płytka drukowana **[A]** + zaprogramowany układ **[UK]** i dokumentacja,
- **wersja [UK]** – zaprogramowany układ.

Nie każdy zestaw AVT występuje we wszystkich wersjach! Każda wersja ma załączony ten sam plik PDF! Podczas składania zamówienia upewnij się, którą wersję zamawiasz! http://sklep.avt.pl

W przypadku braku dostępności na stronie sklepu osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt via e-mail: kity@avt.pl.

Przetwornik napięcia i prądu przemiennego TRMS z układem LTC1966

Prezentowany układ to niewielki moduł przetwornika napięcia i prądu przemiennego 300 V/5 A bazujący na przekładnikach prądowych. Układ przydatny np. w domowej automatyce do monitorowania wartości True RMS napięcia oraz prądu podłączonego urządzenia.

UWAGA: pracując z napięciem sieciowym, należy zachować szczególną ostrożność i przestrzegać zasad BHP.

Do pomiaru zastosowane zostały dwa różne przekładniki: za pomiar napięcia odpowiada TV16(B), zaś za pomiar prądu TA16E-01, obydwa to produkty marki YHDC. Schemat układu pokazano na **rysunku 1**.

Przemienne napięcie zasilające doprowadzone jest do złącza ACIN. Przekładnik XFMV pracuje z prądem 2 mA, ma przekładnię 1:1000. Rezystory R1 i R2 ustalają zakres pomiaru na 0...300 V. W szereg z obciążeniem, podłączonym do złącza ACOUT, wpięte jest uzwojenie pierwotne przekładnika XFMC. Zastosowany model TA16E-01 umożliwia pomiar prądu 0...5 A z przekładnią 1:1000. Przekładniki obciążone są rezystorami R3, R4 i R7, R8 konwertującymi wyjściowy sygnał prądowy na napięcie, które doprowadzone jest następnie do przetworników TRMS U1 i U2 typu LTC1966/8 (polecam LTC1968, gdy zależy nam na szerszym paśmie pomiarowym). Dzielniki R5, R6 i R9, R10 zapewniają polaryzację wejść U1, U2, niezbędną do prawidłowej pracy przy zasilaniu niesymetrycznym. Kondensatory C2 i C6 pełnią funkcję filtru uśredniającego, wymagane są więc od tych elementów: stałość parametrów i niski prąd

eprasa.pl f9fe7f8d6b

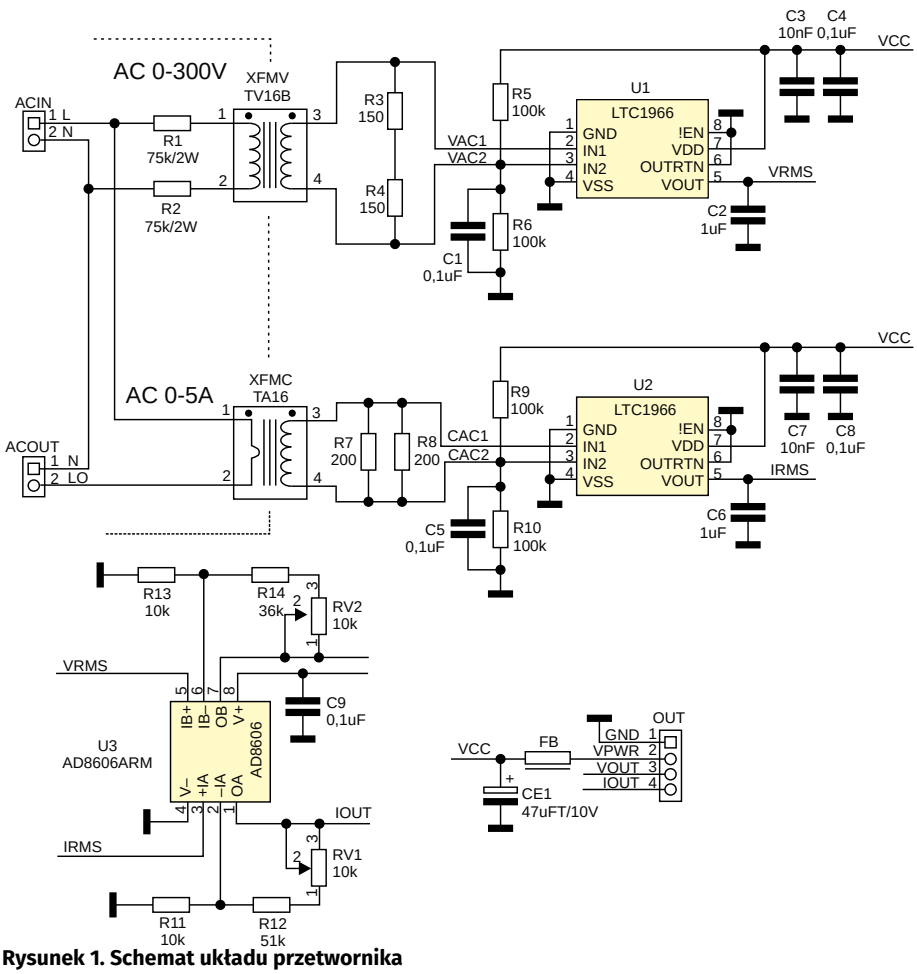
Wykaz elementów:

Rezystory:
R1, R2: 75 kΩ/2 W (THT metalizowany, 1%)
R3, R4: 150 Ω (SMD 1206, 1%)
R5, R6, R9, R10: 100 kΩ (SMD 0603, 1%)
R7, R8: 200 Ω (SMD 1206, 1%)
R11, R13: 10 kΩ (SMD 0603, 1%)
R12: 51 kΩ (SMD 0603, 1%)
R14: 36 kΩ (SMD 0603, 1%)

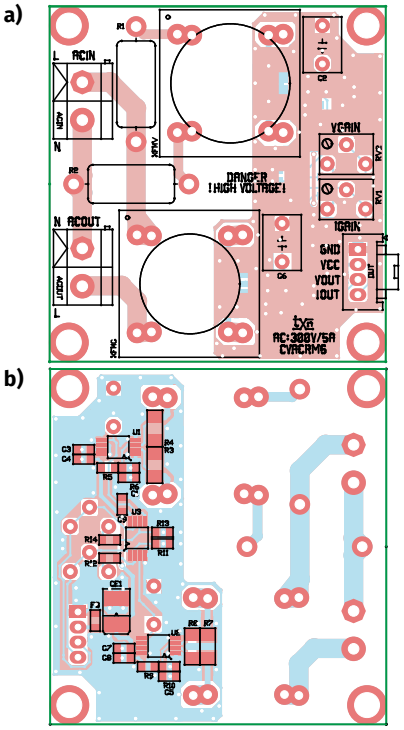
Kondensatory:
C1, C4, C5, C8, C9: 100 nF (SMD 0603, X7R, 10 V)
C2, C6: 1 µF (foliowy C7.2x5.0P5.0, 50 V)
C3, C7: 10 nF (SMD 0603, X7R, 10 V)
CE1: 47 µF (tantalowy SMD 3528, 10 V)

Półprzewodniki:
U1, U2: LTC1966 (MSOP8_065)
U3: AD8606ARM (MSOP8_065)

Pozostałe:
ACIN, ACOUT: złącze DG 5 mm, 2 pin (typ DG126-5.0-2)
OUT: złącze Grove proste
FB: dławik ferrytowy BLM16AG601 (SMD 0603)
RV1, RV2: potencjometr wieloobrotowy stojący 10 kΩ (T63YB)
XFMC: przekładnik prądowy 5 A/5 mA (typ TA16-01)
XFMV: przekładnik napięciowy 2 A/2 mA (typ TV16B)



Rysunek 1. Schemat układu przetwornika



Rysunek 2. Rozmieszczenie elementów na PCB (a – strona TOP, b – strona BOTTOM)

upływu. Ze względu na wartość pojemności konieczne jest zastosowanie kondensatorów foliowych.

Pozostałe kondensatory odsprzęgają zasilanie. Sygnał z przetworników TRMS doprowadzono do regulowanego stopnia wzmacniającego U3 z układem niskomocowego wzmacniacza operacyjnego AD8606. Separacja jest niezbędna ze względu na wysoką impedancję wyjść U1, U2 (~85 kΩ). Potencjometry RV1 i RV2 służą do kalibracji przetwornika. Sygnały wyjściowe VOUT, IOUT (po wzmocnieniu), wraz z zasilaniem części pomiarowej VPWR (5 V/50 mA), doprowadzono do złącza OUT. Oba mierzone sygnały konwertowane są na napięcie 0...3 V, co zapewnia dokładność przetwarzania i niewielki margines zasilania. Zmieniając zakres napięcia wyjściowego na 0...2,5 V (zmniejszając wartości R12, R14), układ można zasilać napięciem 3,3 V.

Moduł zmontowano na dwustronnej płytce drukowanej. Rozmieszczenie elementów zaprezentowano na **rysunkach 2a i 2b**. Montaż układu nie wymaga opisu. Gotowy moduł pokazano na **fotografii tytułowej**.

Po poprawnym montażu przetwornik wymaga jeszcze przeprowadzenia kalibracji. W tym celu należy go zasilić z zasilacza o parametrach 5 V/30 mA poprzez złącze OUT, a do wyjść VOUT, IOUT podłączyć woltomierze prądu stałego.

Do obwodu źródła zasilania prądu przemiennego (z kontrolnym woltomierzem i amperomierzem) należy podłączyć wejście ACIN modułu, zaś do wyjścia ACOUT – regulowane obciążenie. Po włączeniu zasilania do obwodu mierzonego trzeba – za pomocą RV1 – skalibrować napięcie IOUT przetwornika prądu, a z użyciem RV2 – napięcie VOUT przetwornika napięcia. Skalowanie warto przeprowadzić przy maksymalnych wartościach prądu i napięcia 300 V/5 A oraz sprawdzić poprawność przetwarzania w kilku punktach. Dokładność przetwarzania modelu z przekładnikami TV16/TA16-01 w zakresie 50 Hz...1 kHz jest lepsza niż 2%.

Adam Tatuś, EP

REKLAMA

Mnóstwo doskonałych projektów, tylko na:
www.ep.com.pl

eprasa.pl f9fe7f8d6b

AVT sklep

W ofercie AVT*

AVTEDU660

Najważniejsze parametry:
- kontrola szybkości reakcji na wciśnięcie przycisku, na bodziec (punkt świetlny znajdujący się w odpowiednim miejscu),
- 36 dwukolorowych diod LED rozłożonych równomiernie na okręgu,
- sygnalizacja wygranej kolorem niebieskim (wciśnięcie przycisku w odpowiednim momencie) oraz przegranej kolorem czerwonym,
- regulacja szybkości w 35 krokach,
- niski pobór prądu: około 200 nA w stanie spoczynku i nie więcej niż 25 mA podczas pracy,
- łatwa obsługa: wystarczy wcisnąć przycisk w odpowiednim momencie,
- zasilanie napięciem 4,5...5 V – trzy baterie AA lub AAA.

Dodatkowe materiały do pobrania ze strony www.ulubionykiosk.pl/media

AVT5967	Gra pamięciowa – odtwarzanie sekwencji (EP 1/2023)
AVT5950	Prosty miernik refleksu (EP 9/2022)
AVT5910	Gra kto pierwszy (EP 1/2022)
AVT5639	Gra elektroniczna Snake (EP 9/2018)
AVT5592	Gra elektroniczna Sudoku (EP 7/2017)
AVT5554	Gra elektroniczna Snake (EP 11/2016)
AVT1651	Gra kto pierwszy ten lepszy (EP 11/2011)
AVT770	Miernik refleksu (EdW 10/2008)
AVT765	Tester refleksu – kto szybszy (EdW 4/2008)
AVT723	Uniwersalna gra zręcznościowa (EP 6/2004)
AVT5028	Elektroniczna gra w kości (EP 8/2001)
AVT5014	Gra zręcznościowa (EP 5/2001)

* **Uwaga!** Elektroniczne zestawy do samodzielnego montażu. Wymagana umiejętność lutowania! Podstawową wersją zestawu jest wersja **[B]** nazywana potocznie KIT-em (z ang. zestaw). Zestaw w wersji **[B]** zawiera elementy elektroniczne (w tym **[UK]** – jeśli występuje w projekcie), które należy samodzielnie wlutować w dołączoną płytkę drukowaną (PCB). Wykaz elementów znajduje się w dokumentacji, która jest podlinkowana w opisie kitu. Mając na uwadze różne potrzeby naszych klientów, oferujemy dodatkowe wersje:
- **wersja [C]** – zmontowany, uruchomiony i przetestowany zestaw **[B]** (elementy wlutowane w płytkę PCB),
- **wersja [A]** – płytka drukowana bez elementów i dokumentacji.

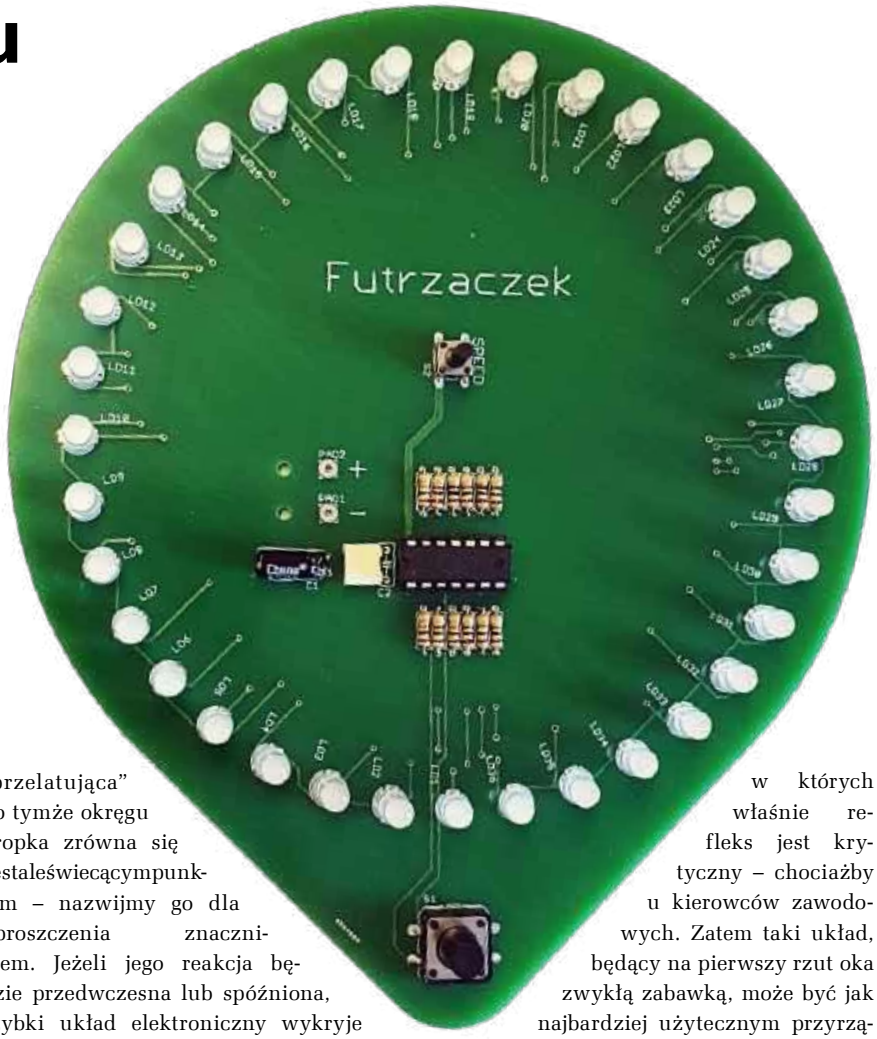
Kity, w których występuje układ scalony wymagający zaprogramowania, mają następujące dodatkowe wersje:
- **wersja [A+]** – płytka drukowana **[A]** + zaprogramowany układ **[UK]** i dokumentacja,
- **wersja [UK]** – zaprogramowany układ.

Nie każdy zestaw AVT występuje we wszystkich wersjach! Każda wersja ma załączony ten sam plik PDF! Podczas składania zamówienia upewnij się, którą wersję zamawiasz!
http://sklep.avt.pl

W przypadku braku dostępności na stronie sklepu osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt via e-mail: **kity@avt.pl**.

Tester refleksu

Od kilku lat można zaobserwować rosnącą popularność gier planszowych, które urozmaicają spotkania towarzyskie. Również rozmaite gry zręcznościowe są nieustannie popularne zarówno wśród młodszych, jak i starszych. To wszystko przez chęć spotykania się z innymi na żywo, bez pośrednictwa elektroniki, jak i przy minimalnym jej udziale już na miejscu. Prezentowany układ pozwoli na świetną zabawę oraz integrację towarzyską, połączone z trenowaniem istotnego dla nas wszystkich parametru – czasu reakcji.



Już, już, zaraz... ACH, ZA WCZEŚNIE! Dobra, jeszcze raz... Jeszcze chwila... NO NIE, ZNOWU! Chwila oddechu, teraz na pewno się uda... (skupienie) JEST! MAM! Tego typu odgłosy towarzyszą wszystkim grom zręcznościowym, zwłaszcza rozgrywanym w szerszym gronie. Kto ma refleks niczym kierowca wyścigowy? A kto może, co najwyżej, zbierać kamienie z pola? Dla lubiących rywalizację to kolejne pole do popisu i pokazania swoich umiejętności.

Działanie prezentowanego układu jest, zdawałoby się, banalnie proste. Użytkownik ma przed sobą 36 diod LED ułożonych równomiernie na okręgu. Jego zadaniem jest wciśnięcie przycisku w momencie, w którym „przelatująca" po tymże okręgu kropka zrówna się z zestaleświecącym punktem – nazwijmy go dla uproszczenia znacznikiem. Jeżeli jego reakcja będzie przedwczesna lub spóźniona, szybki układ elektroniczny wykryje to bezlitośnie!

Odkładając na bok międzyludzką rywalizację, można ów układ potraktować jako narzędzie do trenowania własnej szybkości reakcji. Ta z upływem lat wydłuża się, co ma negatywny wpływ na funkcjonowanie przedstawicieli tych zawodów, w których właśnie refleks jest krytyczny – chociażby u kierowców zawodowych. Zatem taki układ, będący na pierwszy rzut oka zwykłą zabawką, może być jak najbardziej użytecznym przyrządem treningowym.

Budowa

Schemat ideowy omawianego układu znajduje się na **rysunku 1**. Pracą wszystkich podzespołów zarządza prosty, tani i popularny mikrokontroler z serii ATtiny,

Wykaz elementów:

Rezystory: (THT o mocy 0,25 W)
R1...R9: 82 Ω
R10...R12: 10 kΩ

Kondensatory:
C1: 100 µF/16 V (THT, raster 2,5 mm)
C2: 100 nF/63 V MKT (THT, raster 5 mm)

Półprzewodniki:
LD1...LD36: LED matowa dwukolorowa niebiesko-czerwona, wspólna katoda (THT, 5 mm)
US1: ATtiny24A (DIP14)

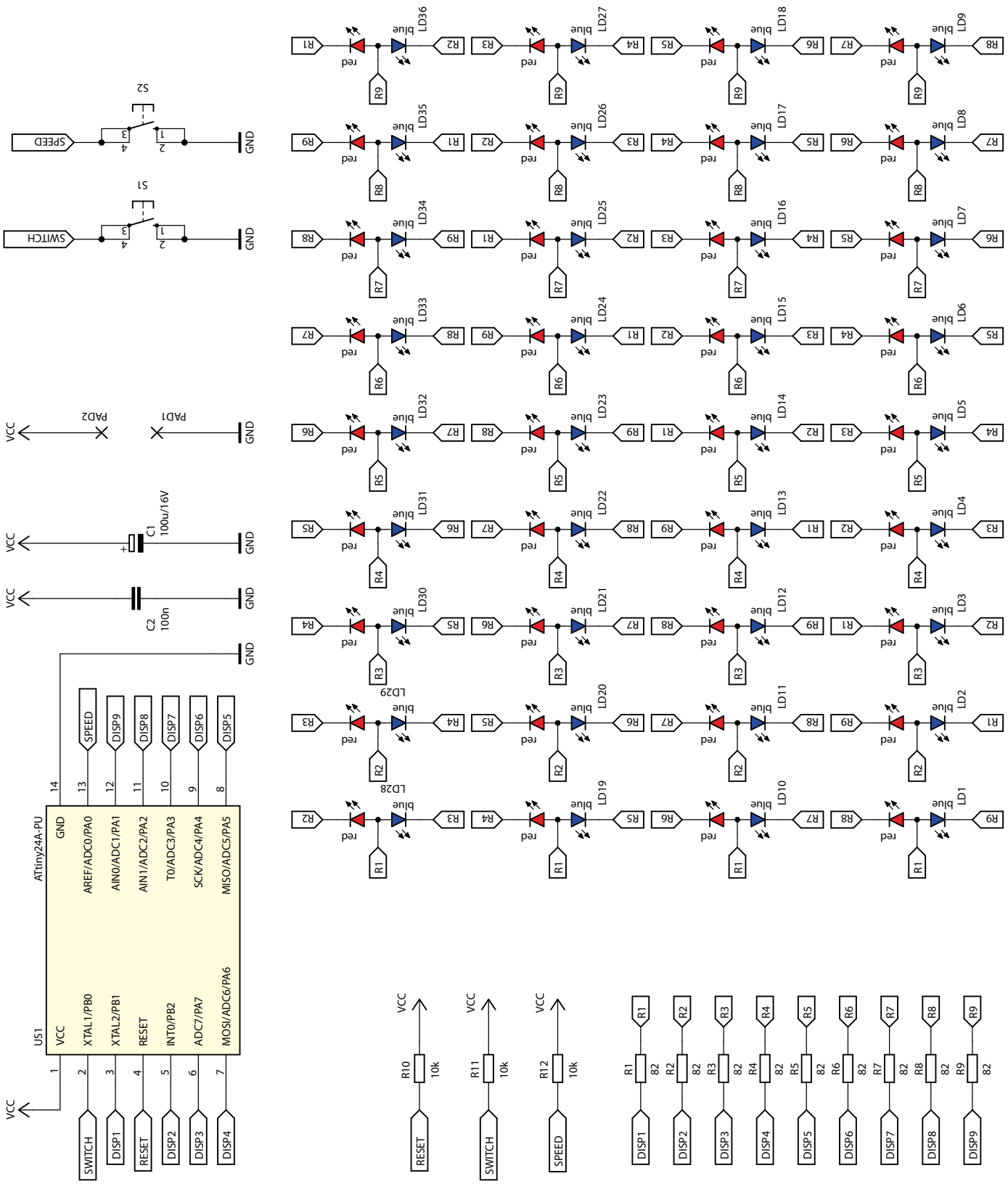
Pozostałe:
S1: microswich 12×12 np. TS12-130
S2: microswich 6×6 13,5 mm
Jedna podstawka DIP14
Koszyk baterii (opis w tekście)

eprasa.pl f9fe7f8d6b

a dokładniej ATtiny24. Ponieważ nie realizuje zadań krytycznych czasowo (z elektronicznego punktu widzenia), jego rdzeń może być taktowany sygnałem zegarowym o częstotliwości 8 MHz, wytwarzanym przez wewnętrzny oscylator RC.

Przez większość czasu ów mikrokontroler znajduje się w stanie uśpienia, przez co zużywa minimalną ilość energii (pobierany wówczas prąd ma natężenie rzędu 200 nA). Z tego stanu może go wybudzić załączenie zasilania lub zmiana stanu jednego z dwóch przycisków znajdujących się na płytce – S1 (odpowiedzialnego za załączanie gry i jej zatrzymywanie) lub S2 (służącego do zmiany tempa gry). Rezystory R11 i R12 podciągają odpowiednie wyprowadzenia mikrokontrolera do potencjału linii zasilającej, przez co po wciśnięciu odpowiedniego klawisza połączone z nim wyprowadzenie przyjmuje niski stan logiczny. Rezystor R12 zapobiega przypadkowemu wyzerowaniu mikrokontorera wskutek działania na jego RESET ładunków elektrostatycznych lub zakłóceń.

Pozostałe dziewięć konfigurowalnych wyprowadzeń służy do sterowania

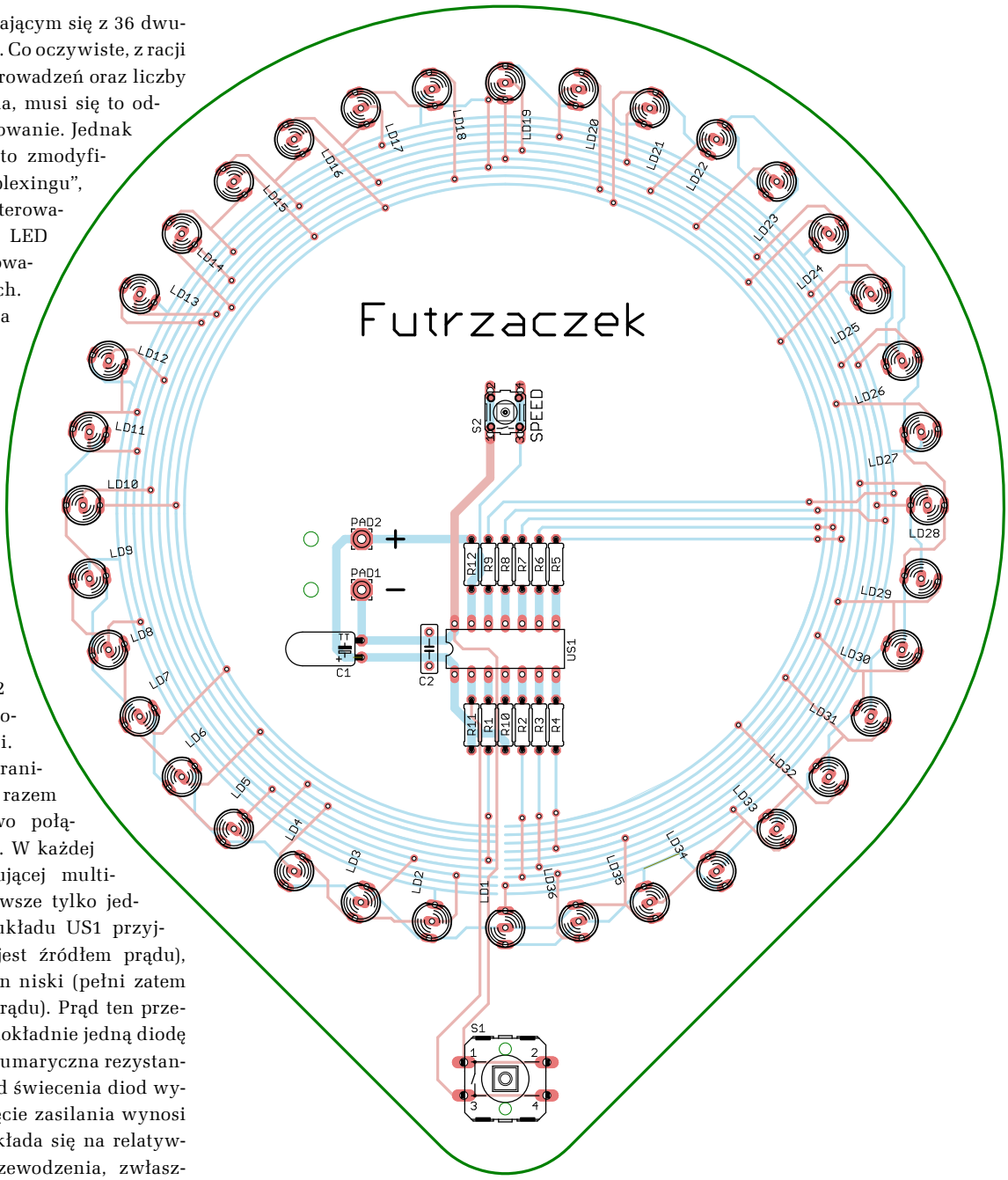


Rysunek 1. Schemat ideowy układu testera refleksu

eprasa.pl f9fe7f8d6b

wyświetlaczem składającym się z 36 dwukolorowych diod LED. Co oczywiste, z racji dostępnej liczby wyprowadzeń oraz liczby diod do wysterowania, musi się to odbyć przez multipleksowanie. Jednak w tym układzie użyto zmodyfikowanego „charlieplexingu", który umożliwia sterowanie n(n–1) diodami LED przy użyciu n wyprowadzeń trójstanowych. Modyfikacja polega nadostosowaniutejmetody do diod dwukolorowych ze wspólną katodą tak, by możliwe było załączanie konkretnej diody w wybranym kolorze, bez wpływu na świecenie pozostałych. W tym przypadku n=9, a zatem 9 nóżek mikrokontrolera steruje 9·(9–1)=72 diodami, czyli 36 diodami dwukolorowymi.

Prąd diod jest ograniczany za każdym razem przez dwa szeregowo połączone rezystory 82 Ω. W każdej iteracji pętli realizującej multipleksowanie diod zawsze tylko jedno wyprowadzenie układu US1 przyjmuje stan wysoki (jest źródłem prądu), a inne przyjmuje stan niski (pełni zatem funkcję odbiornika prądu). Prąd ten przepływa zawsze przez dokładnie jedną diodę LED. Oznacza to, że sumaryczna rezystancja ograniczająca prąd świecenia diod wynosi 164 Ω, zaś napięcie zasilania wynosi około 4,5 V. To przekłada się na relatywnie wysoki prąd przewodzenia, zwłaszcza diod czerwonych, lecz proszę pamiętać, że diody te są zasilane impulsami o wypełnieniu niespełna 3% (1/36), więc moc średnia wydzielająca się w ich strukturach jest znacznie niższa od dopuszczalnego maksimum.



Rysunek 2. Schemat montażowy i wzór ścieżek płytki

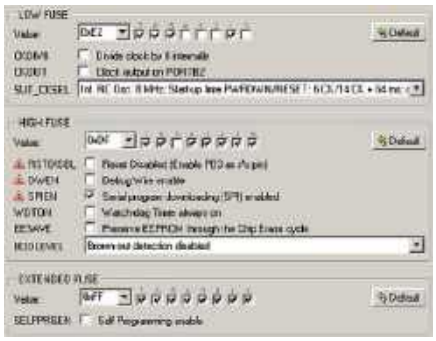
Montaż i uruchomienie

Układ został zmontowany na dwustronnej płytce drukowanej, której obrys mieści się w prostokącie o wymiarach 150 mm × 175 mm. Jej wzór ścieżek oraz schemat montażowy pokazuje **rysunek 2**.

Montaż proponuję rozpocząć od elementów o najmniejszej wysokości obudowy, czyli rezystorów. Pod mikrokontroler US1 proponuję zastosować podstawkę, aby ułatwić jego programowanie oraz wymianę w razie uszkodzenia. Kondensatory C1 i C2 należy wlutować na nóżkach na tyle długich, aby dało się je położyć na powierzchni laminatu. Ścięta krawędź każdej diody LED powinna znaleźć się po wewnętrznej stronie okręgu. W pełni zmontowany układ prototypowy można zobaczyć na **fotografii tytułowej**. Na etapie uruchamiania jest konieczne zaprogramowanie pamięci Flash mikrokontrolera. Wartości bitów zabezpieczających powinny wynosić:

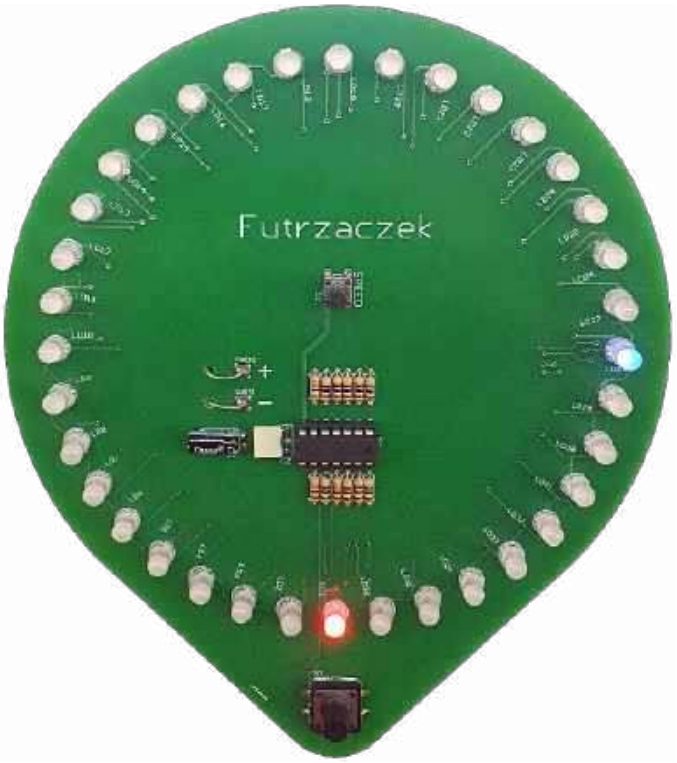
```
Low Fuse = 0xE2
High Fuse = 0xDF
```

Szczegóły są widoczne na **rysunku 3**, który zawiera widok okna konfiguracji tychże bitów w programie BitBurner. Częstotliwość taktowania rdzenia mikrokontrolera będzie wynosiła 8 MHz, co ma dobry wpływ na wyświetlanie w trybie multipleksowym. Brak działania bloku Brown-Out Detector przyczyni się do zwiększenia energooszczędności urządzenia w stanie spoczynku. Nie jest to układ na tyle krytyczny, by jego ewentualne zaburzone funkcjonowanie (spowodowane

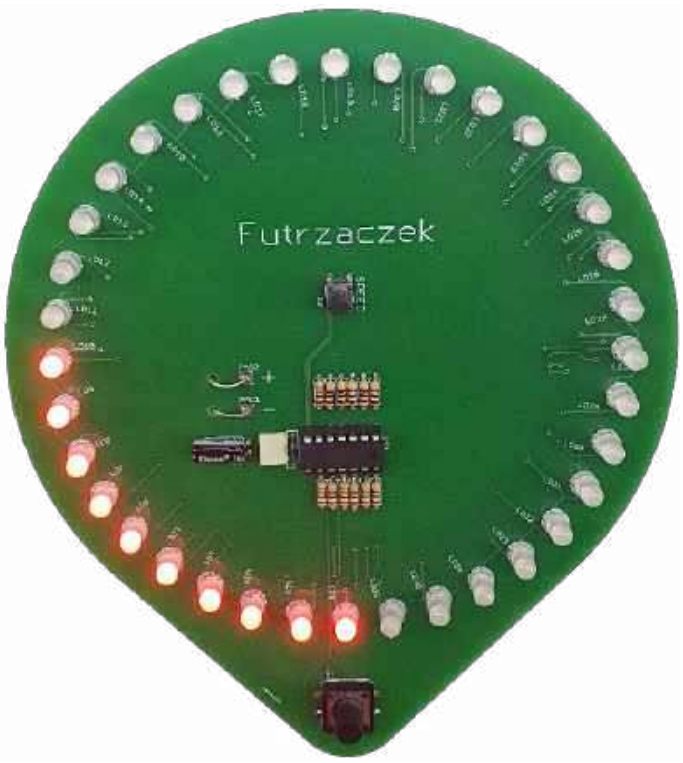


Rysunek 3. Konfiguracja bitów zabezpieczających

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Fotografia 1. Wyświetlacz w trakcie rozgrywki



Fotografia 2. Wyświetlacz w trakcie regulacji szybkości

rozładowanymi bateriami) miało istotne znaczenie.

Do płytki drukowanej należy podłączyć koszyk baterii, które będą zasilały ów układ napięciem 4,5 V (trzy baterie AA lub AAA), podłączonym do pól lutowniczych PAD1 i PAD2. Taki koszyk nie wymaga wyłącznika i również można go przykleić z tyłu płytki, co ułatwiają otwory znajdujące się przy polach lutowniczych. Można przez nie przewlec przewody idące z tyłu płytki, co zwiększa wytrzymałość takich połączeń. Niższe napięcie nie jest zalecane, ponieważ świecenie niebieskich struktur LED będzie wówczas niemal niewidoczne, a to z racji relatywnie wysokiego napięcia przewodzenia niebieskich diod LED.

Układ został tak zaprojektowany, by pobierać jak najmniej energii z baterii, toteż przez większość czasu mikrokontroler pozostaje w stanie spoczynku. Pobór prądu w stanie czuwania nie przekracza 100 nA. Natomiast podczas działania pobiera prąd o natężeniu nie większym niż 25 mA @ 4,5 V, zależnie od liczby aktualnie świecących diod. Komplet baterii wystarczy zatem na wiele godzin zabawy lub treningów.

Obsługa układu jest niezwykle prosta: po włożeniu baterii układ przechodzi w stan spoczynku. Po wciśnięciu przycisku S1 załączają się dwie diody LED: LD1 barwy czerwonej (wspomniany wcześniej znacznik) oraz losowo wybrana dioda leżąca na okręgu, która zaświeci się na niebiesko – **fotografia 1**. Ów ruchomy punkt barwy niebieskiej, przemieszczający się zgodnie z ruchem wskazówek zegara, należy przyłapać na zrównaniu się ze znacznikiem poprzez wciśnięcie przycisku S1. Jeżeli nie zrobi się tego za pierwszym razem, nie ma powodów do obaw – układ pozwala na 7 okrążeń, zanim uzna, że człowiek przegrał.

Jeżeli reakcja będzie prawidłowa, czyli S1 zostanie wciśnięty wtedy, kiedy ruchomy punkt pokryje się ze znacznikiem, cały wyświetlacz wypełni się na niebiesko, po czym diody te zgasną i układ powróci do stanu spoczynku, z którego można go wybudzić, ponownie wciskając S1. Jeżeli zaś reakcja nie będzie prawidłowa – czyli zbyt szybka lub zbyt wolna – wyświetlacz przyjmie barwę czerwoną, po czym układ uśpi się. Poszczególne wyniki nie są zapamiętywane, każda rozgrywka odbywa się niezależnie od poprzednich.

Kiedy układ znajduje się w stanie spoczynku, czyli ma wygaszone diody LED, można ustawić szybkość przemieszczania się ruchomego punktu, co ma wpływ na trudność rozgrywki. W tym celu trzeba wcisnąć przycisk S2, wówczas liczba świecących się czerwonych diod na wyświetlaczu pokaże nam stopień trudności. Domyślna wartość, czyli dwie załączone diody, odpowiadają interwałom 72 ms między kolejnymi przełączeniami niebieskiego punktu. Zwiększenie stopnia trudności o 1 punkt (poprzez jednokrotne wciśnięcie S2) powoduje skrócenie tego czasu o 2 ms. Maksymalny poziom trudności (wszystkie 26 diod załączonych na czerwono) oznacza interwały o długości zaledwie 2 ms! Wciśnięcie S2 jeszcze raz spowoduje „przepełnienie" się regulacji i przejście do poziomu najłatwiejszego. Wyświetlacz zgaśnie po 4 s od ostatniej aktywności lub po wciśnięciu S1. Układ przetrzymuje w pamięci ustawioną wartość, choć jest ona tracona po odłączeniu zasilania, czyli np. wyjęciu baterii.

Życzę Czytelnikom samych trafnych „strzałów"!

Michał Kurzela, EP

REKLAMA

www.facebook.com/ElektronikaPraktyczna

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Moduł EV-RCD ZETTLER Magnetics do ochrony różnicowoprądowej w ładowarkach EV

W ostatnich latach, wraz z intensywnym rozwojem rynku pojazdów elektrycznych, ogromnie wzrósł popyt na przeznaczone do nich ładowarki. W zależności od rodzaju prądu ładowania, urządzenia te dzielą się na ładowarki DC i ładowarki AC. Te drugie charakteryzują się kompaktowymi rozmiarami i łatwą instalacją, są więc zazwyczaj najbardziej odpowiednie do budynków mieszkalnych, miejsc pracy i obiektów użyteczności publicznej. Mogą być instalowane na publicznych parkingach i garażach. Ich moce wahają się od kilku kilowatów do dziesiątek kilowatów, a to przekłada się zwykle na duże wartości prądów ładowania. W związku z tym kluczową kwestią staje się bezpieczeństwo użytkowe systemów ładowania. Kilka krajów wprowadziło rygorystyczne przepisy dotyczące bezpieczeństwa, podkreślając konieczność ochrony ładowarek pojazdów elektrycznych przed upływem prądu.

Więcej informacji:
Zettler Electronics Poland Sp. z o.o.
68-200 Żary, Witosa 29
office@zettlerelectronics.pl
www.zettlerelectronics.pl

W ładowarkach samochodowych występuje duża liczba obwodów konwersji AC/DC (prostownik/falownik). W wypadku wystąpienia prądu upływu w obwodzie pojawi się nie tylko prąd AC i pulsujący prąd różnicowy, ale także prąd różnicowy DC z tętnieniami, generowany przez dwufazowe lub trójfazowe prostowanie i filtrowanie. Dlatego rozwiązanie zabezpieczające przed prądem upływu musi być w stanie wykrywać zarówno prądy różnicowe AC, jak i DC.

Firma ZETTLER Magnetics opracowała niedawno serię modułów EV-RCD z zabezpieczeniem upływowym, które są odpowiednie do ładowarek EV Mode 2 i Mode 3, zgodnie z normami europejskimi.

Mechanizm wykrywania prądów upływu

Moduł ZETTLER EV-RCD wykorzystuje zasadę wykrywania prądu różnicowego poprzez reakcję określonych rdzeni amorficznych na niewielkie zmiany pola magnetycznego. Gdy system elektryczny działa idealnie, suma wektorowa prądów na wszystkich przewodzących prąd przewodach linii zasilającej jest równa zeru, a zatem wokół tejże linii nie ma wypadkowego pola magnetycznego.

Jeśli pojawi się prąd szczątkowy i zostanie on odprowadzony poza linię zasilającą lub do uziemienia (przy ewentualnym uszkodzeniu izolacji), prąd różnicowy będzie większy od zera.

Moduły ZETTLER EV-RCD wykorzystują rdzeń amorficzny o wysokim współczynniku remanencji i integrują obwód oscylacji samowzbudnej w celu generowania okresowych oscylacji. Gdy prąd różnicowy przepływa przez rdzeń, pole magnetyczne ulega zmianie, co powoduje odpowiednią zmianę kształtu fali oscylacji.

Gdy zostanie przekroczona dopuszczalna wartość prądu różnicowego, moduły ZETTLER określą jego natężenie i rodzaj poprzez porównanie zmian kształtu fali i sygnału upływów AC oraz DC.

W porównaniu z tradycyjnymi produktami ochrony upływowej typu A, moduł ZETTLER EV-RCD oferuje następujące zalety:

- **duża dokładność** – moduł jest w stanie wykrywać prąd różnicowy rzędu 3...6 mA DC i generuje sygnał wyjściowy zgodnie z wymogami bezpieczeństwa,
- **wysoka odporność na przepięcia –** produkt wytrzymuje chwilowe udary prądu o wartości szczytowej 3000 A bez ryzyka uszkodzenia,
- **możliwość wykrywania różnych rodzajów prądu –** moduł spełnia wymogi detekcji prądu upływu typu B.

REKLAMA

ZETTLER NOWE ROZWIĄZANIA DLA ENERGETYKI
...łączą energię jutra

Rozwiązania z zakresu e-mobilności

2-torowy przekaźnik AZEV200

- do 40 A na każdy styk
- przerwa styku ≥3,42 mm (1 Form A)
- monitorowanie izolacji galwanicznej (1 Form B)
- prądy zwarciowe:
  - ≥1,5 kA; ≥6,0 kA²s (IEC 62752)
  - ≥1,85 kA; ≥4,5 kA²s (IEC 62955)

Transformator do pomiaru prądu ACST-256-10

- zaprojektowany dla IEC 61851, tryb 2 i tryb 3 obwodów ładowania
- zakres prądu od 0,4 do 36 ARMS
- idealny do monitorowania prądu i obwodów zabezpieczających

ZETTLER electronics GmbH – Junkersstr. 3, 882178 Puchheim, tel. +49 89 / 800 97 – 0, office@ZETTLERelectronics.com, www.ZETTLERelectronics.com

Elementy indukcyjne – trendy rynkowe i wybrane aplikacje

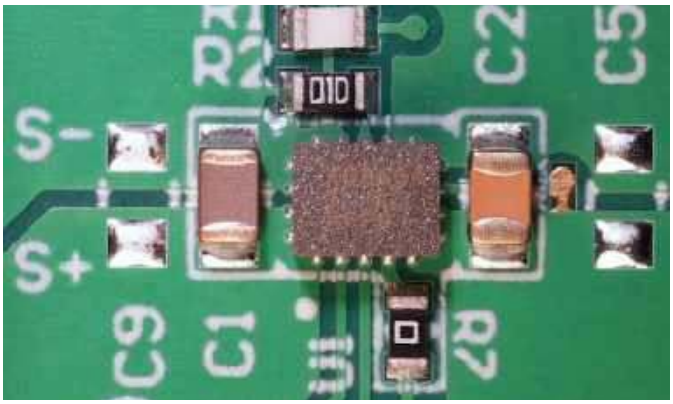
Zróżnicowanie funkcjonalne i konstrukcyjne współczesnych elementów indukcyjnych jest nieporównanie większe, niż w przypadku innych rodzajów komponentów pasywnych. Choć integracja niemal całych torów radiowych w ramach pojedynczych układów scalonych doprowadziła do daleko idącego ograniczenia liczby dławików w obszernej kategorii urządzeń bezprzewodowych (a więc także w ogólnym rozrachunku), to elementy indukcyjne i tak były, są i będą stosowane w znakomitej większości urządzeń. Dopasowanie impedancji w obwodach antenowych, filtracja zakłóceń RFI, przetwarzanie energii w konwerterach DC/DC czy też separacja galwaniczna obwodów wtórnych zasilaczy sieciowych – to tylko kilka „pierwszych z brzegu" aplikacji cewek i transformatorów. W grudniowym Temacie Numeru przyglądamy się najnowszym trendom na rynku tych niezwykle przydatnych i uniwersalnych komponentów biernych oraz prezentujemy subiektywny wybór reprezentatywnych przykładów cewek i transformatorów.

Miniaturyzacja we wszystkich trzech wymiarach

Elementy indukcyjne zdecydowanie nie należą do komponentów najłatwiejszych do miniaturyzacji. Pomimo to producentom udało się zejść z wymiarami dławików (zarówno tych pojedynczych, jak i złożonych – np. filtrów trybu wspólnego czy balunów) do poziomu zarezerwowanego wcześniej tylko dla niewielkich rezystorów i kondensatorów SMD. I choć pewnych ograniczeń nie da się obejść (fizyka nader skutecznie broni swoich podstawowych praw), to jednak wytwórcy podzespołów indukcyjnych stają na głowie, by wciąż przesuwać granice miniaturyzacji. A jest o co walczyć – w czasach gdy na rynku półprzewodników trwa intensywny „wyścig zbrojeń" w obszarze ultrakompaktowych przetwornic DC/DC o zaskakującej wydajności (gęstości mocy), to właśnie cewki wciąż pozostają największymi elementami całej układanki.

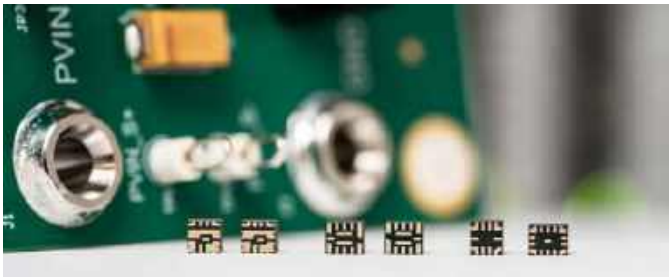
Sprawa ciągłej redukcji wymiarów elementów indukcyjnych jest o tyle istotna, że coraz większy kawałek tortu należy do przetwornic typu SiP (ang. System-in-Package), które odpowiedni induktor mają fabrycznie wbudowany wewnątrz niewielkiej obudowy. Tego typu układy już dziś osiągają niewiarygodne wprost możliwości – najmniejsze na świecie 6-amperowe moduły SiP (TPSM82866A i TPSM82866C marki Texas Instruments), oferowane w obudowach MagPak, mają wymiary zaledwie 2,3×3,0 mm i integrują w sobie nie tylko sam kontroler przetwornicy, ale także precyzyjnie dobrany dławik (**fotografia 1**), dzięki czemu rozmiary kompletnej implementacji (przetwornica + kondensatory filtrujące i odsprzęgające + dzielnik napięcia) są znacznie mniejsze, niż footprint klasycznego dławika mocy (np. 12×12 mm o powierzchni przekraczającej 144 mm²) – całość zajmuje bowiem jedynie **28 mm²** na powierzchni docelowej płytki drukowanej (**fotografia 2**)! Inni producenci także wdrażają swoje rozwiązania w zakresie zintegrowanych modłów DC/DC – przykład takiego produktu z serii PicoBK marki Murata, można zobaczyć na **fotografii 3**. Co ciekawe, w tym przypadku można z łatwością dojrzeć linie podziału i część detali konstrukcyjnych – układ scalony w obudowie typu DFN „siedzi" we wnęce wykonanej wewnątrz bloku ekranującego dławik – rozwiązanie jest o tyle ciekawe, że wymiary całości wynoszą zaledwie… 2,5×2,0×1,04 mm! Układ jest w stanie zasilać obciążenie na poziomie 150 mA, zaś pobór prądu samej przetwornicy to tylko 200 nA. Warto dodać, że niska cena przetwornicy jest podyktowana bardzo prostą budową – dławik nie został bowiem galwanicznie połączony z kontrolerem sterującym przetwornicy, przez co wykonanie odpowiednich połączeń należy w tym przypadku do samego konstruktora – widać to doskonale na **rysunku 1**, prezentującym schemat aplikacyjny układu.

Większe – choć wciąż bardzo kompaktowe w porównaniu do klasycznych implementacji – są przetwornice SoM (ang.

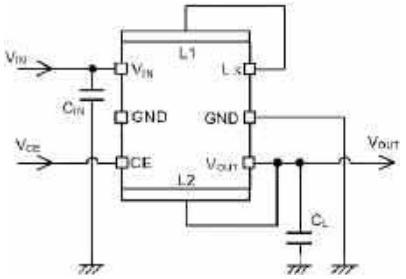


Fotografia 2. Kompletna implementacja przetwornicy SIP w obudowie MagPak (https://t.ly/R7CEk)

Fotografia 3. Przetwornica modułowa ze zintegrowanym dławikiem – seria PicoBK marki Murata (https://t.ly/zJjC4)



Fotografia 1. Nowe przetwornice SiP marki Texas Instruments (https://ti.com)



Rysunek 1. Schemat aplikacyjny przetwornicy z serii PicoBK marki Murata (https://t.ly/NMhfw)

eprasa.pl f9fe7f8d6b

System-on-Module), będące w istocie silnie zminiaturyzowanymi modułami bazującymi na scalonych kontrolerach DC/DC oraz dyskretnych dławikach i kondensatorach. Przykład takiego rozwiązania można zobaczyć na **fotografii 4** – jak widać, w tym przypadku stosowane są już klasyczne, dyskretne dławiki ekranowane, rzecz jasna o możliwie najmniejszych wymiarach umożliwiających osiągnięcie założonych przez producenta parametrów wyjściowych. Odpowiednie żonglowanie zaawansowanymi technologiami produkcji płytek drukowanych pozwala producentom przetwornic SoM na zmniejszanie rozmiarów całości do poziomu porównywalnego z… footprintem zastosowanego w nich dławika. Jeszcze kilka lat temu tego typu rozwiązania były bardzo kosztowne – dziś ceny modułów SiP lub SoM zaczynają się od kilku złotych za sztukę, przez co w wielu projektach implementacja przetwornicy z użyciem scalonego kontrolera oraz zestawu osobnych elementów biernych zwyczajnie przestaje być opłacalna.

Fotografia 4. Przetwornice modułowe marki Delta Electronics do montażu SMT (https://t.ly/cbRVM)

Fotografia 5. Najmniejsze na świecie dławiki mocy marki Samsung (https://t.ly/66wA9)

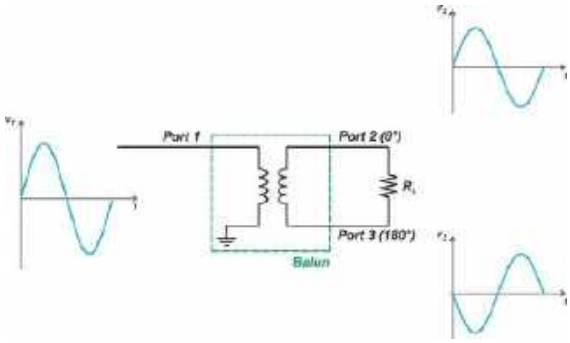
Trend miniaturyzacji, balansującej nierzadko na skraju możliwości fizycznych, dotknął także dyskretnych dławików. Za popisowy przykład, o którym dość głośno było 4 lata temu, można uznać najmniejszy na świecie dławik mocy – produkt firmy Samsung Electro-Mechanics ma wymiary zaledwie 0,8×0,4×0,65 mm (0804 w nomenklaturze metrycznej – patrz **fotografia 5**), opracowany (jakże by inaczej!) na potrzeby rynku urządzeń mobilnych. Wprawdzie daleko mu do najmniejszego z najmniejszych elementów indukcyjnych w ogóle – tutaj rekord ustanowiła bowiem marka Murata, wprowadzając na rynek serię dławików ferrytowych o wymiarach 0,25×0,125 mm (**fotografia 6**) – nie zapominajmy jednak, że z natury rzeczy elementy indukcyjne dużej mocy są zawsze znacznie większe od dławików o porównywalnej indukcyjności, ale znacznie niższych ratingach prądowych. Tak czy inaczej, rekord marki Murata – o ile nam wiadomo – nie został pobity pomimo upływu przeszło 11 lat od pierwszych doniesień prasowych na temat opracowania dławików w rozmiarze 008004. Tak maleńkie komponenty pasywne są zresztą problematyczne nie tylko dla ich producenta, ale także dla firm planujących wdrożenie ich w swojej produkcji – przy mikroskopijnych wymiarach wyzwaniem staje się bowiem sam montaż (niewiele automatów pick&place radzi sobie z rozmiarem 008004), a nawet… dobór odpowiednio drobnoziarnistej pasty lutowniczej.

Fotografia 7. Dławiki dużej mocy marki Würth Elektronik z serii WE-TPC (https://t.ly/C1P4Z)

Miniaturyzacja dotyka jednak także tych segmentów branży komponentów indukcyjnych, które – wydawałoby się – stabilnie trwają przy przyjętych wiele lat temu standardach wymiarowych. Dobrym przykładem mogą być popularne dławiki w rozmiarze 12×12 mm. Okazuje się, że w wielu aplikacjach problemem była nie tyle powierzchnia footprintu, ile… wysokość elementów. Dlatego też czołowi producenci wprowadzili na rynek serie niskoprofilowe. Jak widać na **fotografii 7**, nawet te relatywnie spore dławiki są dziś produkowane w wersjach o wysokości rzędu 1 mm. Dzięki takim rozwiązaniom producenci zmagający się z dość specyficznymi wymaganiami dotyczącymi wysokości pakietów PCBA są w stanie z powodzeniem zredukować grubość obudowy urządzenia o kilka kolejnych milimetrów, nawet bez zmiany istniejącego projektu PCB – przykładem mogą być np. nowoczesne monitory komputerowe czy matrycowe ekrany LED.

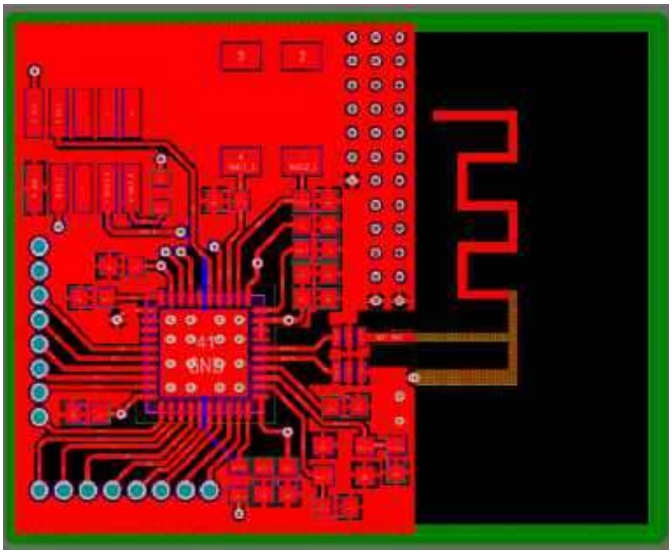
Inny interesujący przykład miniaturyzacji komponentów indukcyjnych to baluny, czyli symetryzatory – stosowane przede wszystkim w antenowych obwodach układów radiowych do konwersji pomiędzy linią symetryczną (wejściem/wyjściem front-endu RF) a niesymetryczną (anteną) – patrz **rysunki 2** i **3**. Istnieje oczywiście możliwość zbudowania symetryzatora z elementów dyskretnych, jednak w nowoczesnych urządzeniach noszonych czy sprzęcie IoT tego typu rozwiązania okazują się zbyt rozbudowane – znacznie lepszym wyjściem jest wtedy zastosowanie zintegrowanego baluna w postaci pojedynczego elementu SMD. Takie produkty wprowadziło na rynek wiele firm, a poszczególne modele różnią się nie

Fotografia 6. Rekordowo małe dławiki ferrytowe marki Murata w obudowach o rozmiarze 008004 (https://t.ly/MVfKJ)

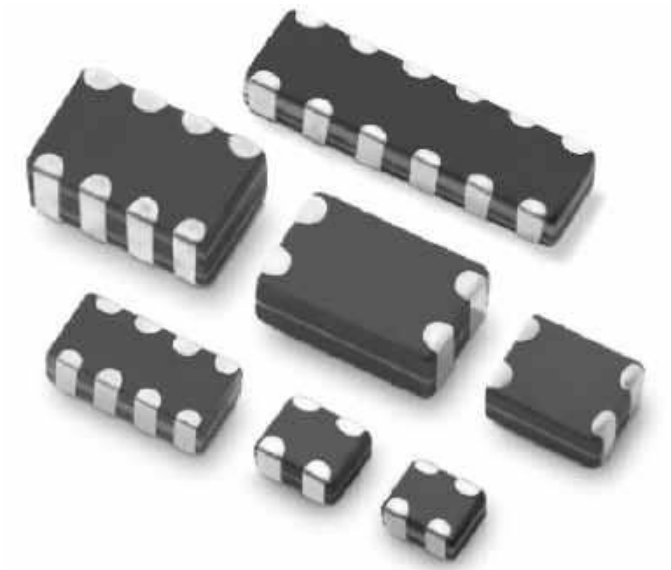


Rysunek 2. Ilustracja zasady działania symetryzatora o postaci transformatorowej (https://t.ly/IYrtW)

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Rysunek 3. Przykładowy layout PCB transceivera RF z balunem SMD i anteną mikropaskową typu inverted-F (https://t.ly/T59d6)



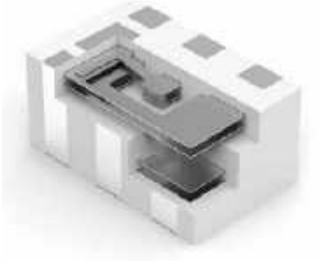
Fotografia 9. Dławiki z serii LCF marki Littelfuse (https://t.ly/YdpbA)

tylko parametrami elektrycznymi (pasmo przenoszenia, straty odbiciowe i wtrąceniowe, VSWR, impedancja charakterystyczna widziana od strony obwodu symetrycznego oraz niesymetrycznego), ale także rozmiarami obudowy i konstrukcją. Obok klasycznych rozwiązań typu transformatorowego (przykład można zobaczyć na **fotografii 8**) dostępne są także silnie zminiaturyzowane symetryzatory oparte na cewkach wielowarstwowych, zbudowane na bazie spieków ceramicznych. Przykładowe baluny tego typu, należące do serii WE-BAL, pokazano na **rysunkach 4** i **5** – elementy te mają wymiary zaledwie 1,6×0,8×0,7 mm, nadają się zatem do najbardziej kompaktowych urządzeń oraz modułów korzystających z transceiverów scalonych, pracujących przede wszystkim w paśmie 2,4 GHz.

Fotografia 8. Miniaturowy symetryzator typu transformatorowego do montażu SMT (produkt marki TDK). Źródło: https://t.ly/neh2Z

Na koniec tej części artykułu przytoczymy jeszcze jedno ciekawe rozwiązanie – warto o nim pamiętać projektując kompaktowe obwody drukowane urządzeń cyfrowych, w których mają zostać zaimplementowane szybkie interfejsy oparte na parach różnicowych (USB 3.1, HDMI czy LVDS). Firma Littelfuse opracowała serię LCF obejmującą pojedyncze, podwójne oraz potrójne dławiki trybu wspólnego (Common Mode choke, w skrócie CM choke). Najmniejszy dławik pojedynczy ma obudowę 0605 o wymiarach 0,64×0,57×0,35 mm, a jego zalecany footprint mieści się w obrysie 0,85×0,68 mm. Wersja potrójna (3008) ma z kolei wymiary 3,05×0,85×0,55 mm – wszystkie dostępne odmiany dławików LCF można zobaczyć na **fotografii 9**.

Rysunek 4. Miniaturowe symetryzatory chipowe z serii WE-BAL marki Würth Elektronik (https://t.ly/6mSb5)



Rysunek 5. Budowa wewnętrzna symetryzatora chipowego z serii WE-BAL (https://t.ly/6mSb5)

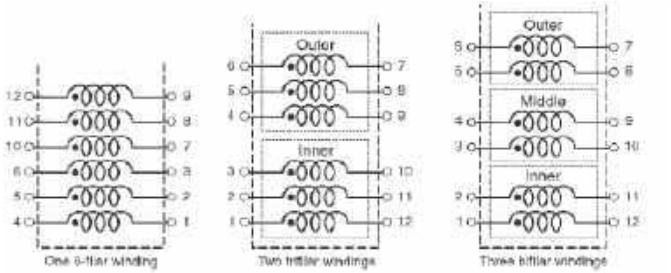
Elementy indukcyjne do zadań specjalnych – wybrane przykłady

Komponenty indukcyjne stanowią zdecydowanie najbardziej zróżnicowaną – i to zarówno pod względem konstrukcyjnym oraz wymiarowym, jak i funkcjonalnym – grupę elementów pasywnych. Nie sposób na łamach przeglądowego artykułu opisać (czy choćby wymienić) wszystkie odmiany tychże podzespołów, dlatego skupiliśmy się jedynie na garści subiektywnie wybranych przykładów.

Transformatory niczym...kameleony

Niebywale ciekawą ofertę przygotowała dla swoich odbiorców marka Coilcraft. Wśród rozlicznych odmian dławików i transformatorów znalazła się bowiem m.in. seria Hexa-Path Magnetics – złożona de facto z sześciu rodzin komponentów (różniących się rozmiarami i dopuszczalną mocą), oznakowanych HP1/HPH1... HP6/HPH6. Pomiędzy modelami z serii Hpx a HPHx widoczne są różnice w zakresie rezystancji stałoprądowej i prądu maksymalnego (podgrupa HPx ma wyższe osiągi w zakresie obciążalności) oraz indukcyjności i zdolności do magazynowania energii (seria HPHx lepiej radzi sobie w tymże zakresie). Jakby tego było mało, w każdej z (łącznie) 12 rodzin dostępnych jest po 5 różnych modeli, co łącznie daje aż 60 kombinacji. Widok transformatorów zaprezentowano na **fotografii 10**.

Fotografia 10. Seria transformatorów Hexa-Path Magnetics marki Coilcraft (https://t.ly/Q92Ky)



Rysunek 6. Dostępne wersje transformatorów z serii Hexa-Path Magnetics (https://t.ly/Q92Ky)

eprasa.pl f9fe7f8d6b

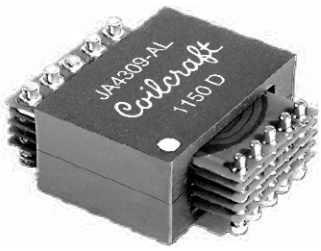
A co jest niezwykłego w tej linii produktowej? Okazuje się, że każdy z elementów należących do niej ma aż sześć uzwojeń, nawiniętych w formacie 6-filarnym (serie HP1, HP2, HPH1 i HPH2), dwóch sekcjach 3-filarnych (HP3, HP4, HP5, HP6) lub 3 sekcjach bifilarnych (HPH3, HPH4, HPH5, HPH6) – co zobrazowano na **rysunku 6**. Poszczególne uzwojenia można łączyć na różne sposoby (szeregowo lub równolegle), co zdaniem producenta daje setki możliwości układowych przy zastosowaniu tylko jednego rodzaju transformatora. Warto dodać, że wszystkie komponenty z omawianej serii mają izolację na poziomie 500 Vrms (pomiędzy dowolnie wybraną parą uzwojeń) i mogą pracować z częstotliwościami do 1 MHz. W układach typu flyback transformatory te mogą osiągać moc szczytową w zakresie 5...50 W, zaś w topologii forward – nawet do 150 W.

Szerokie możliwości dostosowania układu uzwojeń pozwalają na zastosowanie podzespołów z serii Hexa-Path w wielowariantowych liniach produktowych zasilaczy SMPS – przy odpowiednio opracowanym projekcie PCB (pozostawiającym pewne możliwości sprzętowej konfiguracji połączeń) można za pomocą jednego tylko modelu transformatora utworzyć szereg odmian urządzenia różniących się parametrami wyjściowymi (prądem i napięciem wtórnym), co niebywale upraszcza zarządzanie łańcuchem dostaw i pozwala zaoszczędzić na kosztach zakupu różnych wersji podobnych komponentów (a jak powszechnie wiadomo: im większa partia kupowanych elementów, tym więcej można zaoszczędzić na przekroczeniu kolejnych progów cenowych).

Im niżej, tym lepiej

Niemałym problemem w konstrukcji niektórych zasilaczy impulsowych są dość spore wymiary transformatora, zwłaszcza w osi pionowej (prostopadłej do PCB). Zastosowanie komponentów – w miarę możliwości – niskoprofilowych jest szczególnie cenne m.in. w zasilaczach przeznaczonych do systemów oświetlenia LED czy też w ładowarkach laptopów i innych zasilaczach typu desktop. W konstrukcji tego typu urządzeń dobrze sprawdzają się transformatory planarne – ich wysokość jest przeważnie 2...3-krotnie niższa w porównaniu do konstrukcji opartych na klasycznych rdzeniach i uzwojeniach drutowych, co pozwala na redukcję analogicznego wymiaru obudowy. Jednym z częściej przywoływanych rozwiązań konstrukcyjnych są transformatory oparte na wielowarstwowych obwodach drukowanych (**fotografia 11**), w których kolejne fragmenty uzwojenia są wykonane w postaci spiralnych ścieżek na sąsiadujących warstwach laminatu i połączone ze sobą za pomocą przelotek. Nic nie stoi jednak na przeszkodzie, by owe warstwy wykonać na osobnych nośnikach i połączyć następnie za pomocą przelotowych pinów – doskonale widać to na **fotografii 12**.

Fotografia 11. Przykładowy transformator planarny (https://t.ly/3fjoa)



Fotografia 12. Transformator planarny o konstrukcji hybrydowej (https://t.ly/zT3Ii)

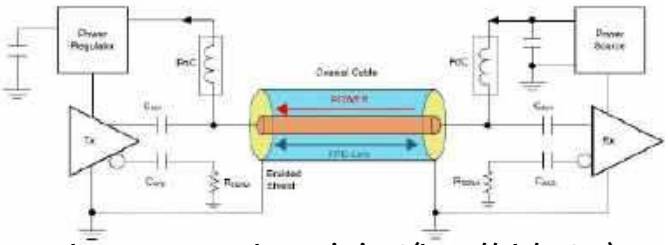
Fotografia 13. Transformatory planarne marki CoilCraft (https://t.ly/z22so)

Jako przykładem drugiej z wymienionych implementacji posłużymy się transformatorami opracowanymi przez firmę Coilcraft (**fotografia 13**) – elementy te są dostępne w wersjach o mocy od 120 W do 800 W, przy czym najmniejsze modele z opisywanej rodziny są przeznaczone do pracy w systemach PoE (ang. Power-over-Ethernet), pozwalających na zasilanie urządzeń wyposażonych w łącze Ethernet za pomocą tego samego kabla, który służy także do przesyłu danych. Szerokość transformatora wynosi zaledwie 20,83 mm. Największymi osiągami może pochwalić się model NA5871-AL, który jest w stanie przenosić wspomnianą wcześniej moc 800 W przy naprawdę kompaktowych rozmiarach: 32,8×48,5×13,5 mm.

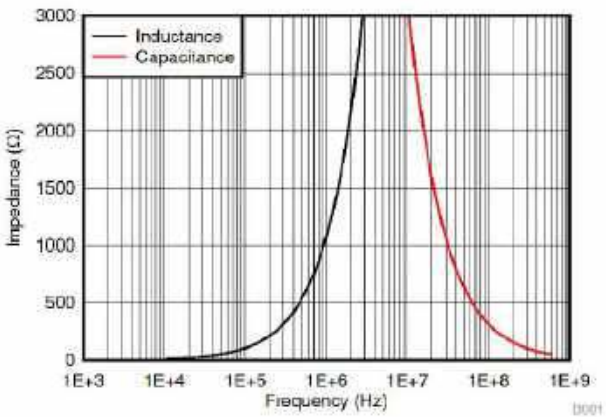
Jeden kabel do wszystkiego

Analogiczne do PoE rozwiązanie jest także coraz szerzej stosowane w odniesieniu do kabli koncentrycznych i nosi nazwę PoC (ang. Power-over-Coaxial). Zasada działania takiego łącza jest prosta – zobrazowano ją na **rysunku 7**. Środkowa żyła przewodu koncentrycznego jest sprzężona zmiennoprądowo z wejściem wzmacniacza odbierającego sygnał, a jednocześnie łączy się poprzez dławik ze źródłem zasilania DC. Po stronie nadajnika sygnału (lewa strona na rysunku 7) sytuacja jest analogiczna: napięcie stałe trafia – przez szeregowy dławik – do układu stabilizatora napięcia, zaś wyjście nadajnika sygnału – poprzez kondensator – pozostaje sprzęgnięte z przewodem koncentrycznym. Dzięki takiemu rozwiązaniu składowa stała napięcia może być skutecznie odseparowana (za sprawą impedancji dławika rosnącej wraz z częstotliwością) od składowej zmiennej, czyli właściwego sygnału użytecznego. No właśnie… tylko na ile skutecznie?

Każdy dławik ma pewną pojemność pasożytniczą, która wraz z indukcyjnością uzwojenia tworzy obwód LC o pewnej częstotliwości rezonansowej, charakterystycznej dla danego komponentu. Częstotliwość ta jest określana mianem SRF (ang. Self-Resonant Frequency) i stanowi granicę, poniżej której dominuje składowa indukcyjna impedancji, zaś powyżej której do głosu dochodzi

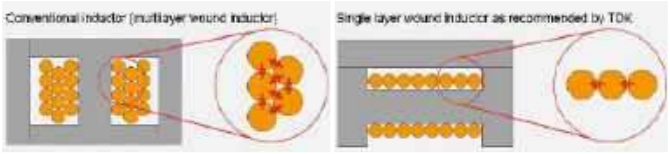


Rysunek 7. Uproszczony schemat sieci PoC (https://t.ly/MgSKU)



Rysunek 8. Wyidealizowany wykres obrazujący impedancję dławika o indukcyjności 100 μH w funkcji częstotliwości (widoczny spadek spowodowany udziałem składowej pojemnościowej, dominującej w zakresie wyższych częstotliwości, tj. powyżej częstotliwości rezonansu własnego (SRF). Źródło: https://t.ly/MgSKU)

eprasa.pl f9fe7f8d6b

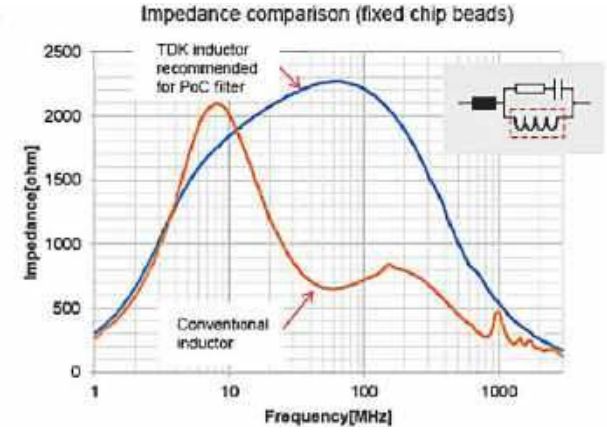


Rysunek 9. Wyjaśnienie różnic w pojemności własnej dławików nawijanych wielowarstwowo (po lewej) oraz jednowarstwowo (po prawej) – https://t.ly/fQrFU

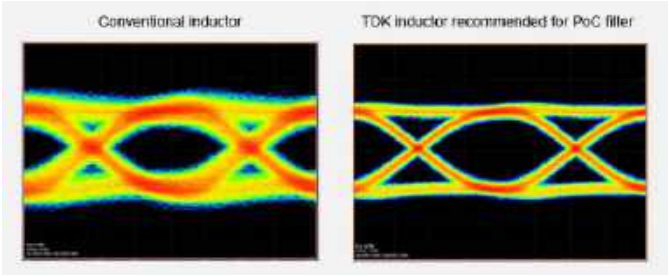
składowa pojemnościowa. Uproszczony wykres impedancji rzeczywistego dławika pokazano na **rysunku 8**. Co ciekawe, wypadkowa pojemność pasożytnicza uzwojenia zależy w dużym stopniu nie tylko od liczby zwojów, ale także od sposobu ich nawinięcia – okazuje się bowiem, że konstrukcje nawijane wielowarstwowo (lewa strona **rysunku 9**) mają znacznie wyższą pojemność własną z uwagi na fakt, że poszczególne pętle drutu sąsiadują (a więc – tworzą niejako rozproszone kondensatory) nie tylko z dwiema pętlami leżącymi po obu stronach, lecz także z „obiegami" znajdującymi się w sąsiednich warstwach. Jaki z tego wniosek? Nawijanie tylko jednej warstwy drutu pozwala zaoszczędzić na pojemności pasożytniczej, co automatycznie podwyższa wartość SRF i – w przypadku zastosowania dławika do tłumienia zakłóceń lub innych składowych zmiennych – poprawia skuteczność filtracji.

Fotografia 14. Dławik do aplikacji PoC marki Eaton (https://t.ly/v1IZW)

Wróćmy zatem do naszego głównego wątku, jakim jest cewka odsprzęgająca zasilanie DC w układach PoC. Z przyczyn opisanych powyżej wielu producentów wdrożyło do sprzedaży dławiki opracowane specjalnie z myślą o aplikacjach Power-over-Coaxial – przykład z oferty marki Eaton można zobaczyć na **fotografii 14**. Cewki z serii ELX1350, przeznaczone do zastosowań motoryzacyjnych, są dostępne w wersjach o indukcyjności od 2,2 μH (SRF=200 MHz) do 47 μH (SRF=30 MHz). W ofercie marki TDK także znajdziemy dławiki przystosowane do odsprzęgania zasilania PoC – porównanie charakterystyki impedancji w funkcji częstotliwości, wykreślone dla przykładowego produktu TDK oraz standardowego dławika o tej samej indukcyjności, pokazano na **rysunku 10**. Dodatkowo na **rysunku 11** zaprezentowano diagram oka z pomiarów sygnału transmitowanego przez kabel koncentryczny o długości 1,7 m (przy użyciu tych samych elementów odsprzęgających) – jak widać, zastosowanie nieodpowiedniego dławika drastycznie pogarsza integralność sygnałów.



Rysunek 10. Porównanie charakterystyki impedancji w funkcji częstotliwości, wykreślone dla przykładowego produktu TDK oraz standardowego dławika o tej samej indukcyjności (https://t.ly/nxxSb)



Rysunek 11. Diagram oka z pomiarów sygnału transmitowanego przez kabel koncentryczny o długości 1,7 przy użyciu tych samych elementów, których charakterystyki pokazano na rysunku 10 (https://t.ly/nxxSb)

Diabeł tkwi w szczegółach

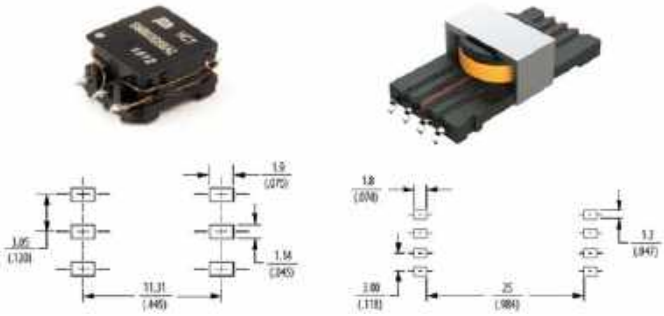
Powróćmy jeszcze na chwilę do tematyki transformatorów, tym razem jednak zastanówmy się nad kwestią bariery galwanicznej pomiędzy uzwojeniami: pierwotnym i wtórnym. W przypadku każdego komponentu pracującego wskroś bariery galwanicznej pod uwagę trzeba wziąć trzy aspekty:

- izolację stałą,
- odstępy powierzchniowe pomiędzy przewodzącymi elementami (ang. creepage),
- odstępy powietrzne pomiędzy przewodzącymi elementami (ang. clearance).

O ile w kwestii relatywnie dużych transformatorów problem sprowadza się praktycznie tylko do odpowiedniej izolacji stałej (powłok drutów nawojowych oraz izolacji rdzenia), to projektując komponenty o wymiarach, których rząd wielkości jest zbliżony do wymaganej szerokości odstępów powierzchniowych i powietrznych, trzeba znacznie dokładniej przemyśleć sprawę geometrii obudowy oraz rozmieszczenia pinów.

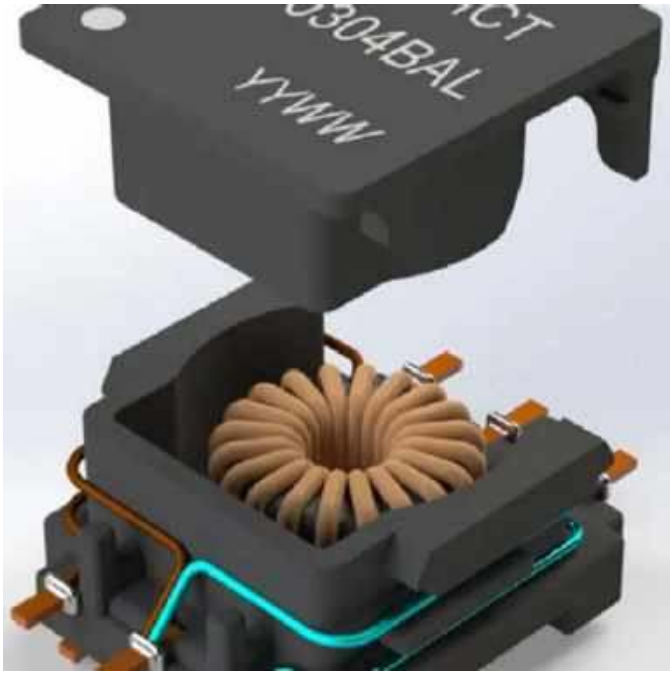
Konstruktorzy zatrudnieni w firmie Bourns stanęli przed problemem miniaturyzacji transformatorów do montażu na PCB, stosowanych w izolowanych blokach zasilających układów cyfrowych, analogowo-cyfrowych torów pomiarowych czy też w obwodach sterowania bramkami modułów IGBT. W przypadku niewielkich przetwornic, bazujących na topologii push-pull, dobrym wyjściem okazuje się zastosowanie rdzenia toroidalnego – głównie ze względu na małe straty (związane z brakiem szczeliny obecnej w rdzeniach dzielonych oraz niewielką dyspersją strumienia magnetycznego). Aby spełnić wymogi bezpieczeństwa konieczne jest odizolowanie jednego z uzwojeń za pomocą potrójnej powłoki izolacyjnej lub obydwu uzwojeń za pomocą izolacji pojedynczej. W transformatorach HCTSM8 inżynierowie Bourns zastosowali połączenie obydwu tych rozwiązań: uzwojenie pierwotne jest nawinięte za pomocą drutu o izolacji potrójnej, a redundancję zapewnia pojedyncza warstwa emalii na uzwojeniu wtórnym.

Zaraz, zaraz… nieprzypadkowo wspomnieliśmy wcześniej, że oprócz izolacji stałej należy jeszcze uwzględnić odstępy powierzchniowe i powietrzne. Jak ma się to jednak do naszego bohatera?



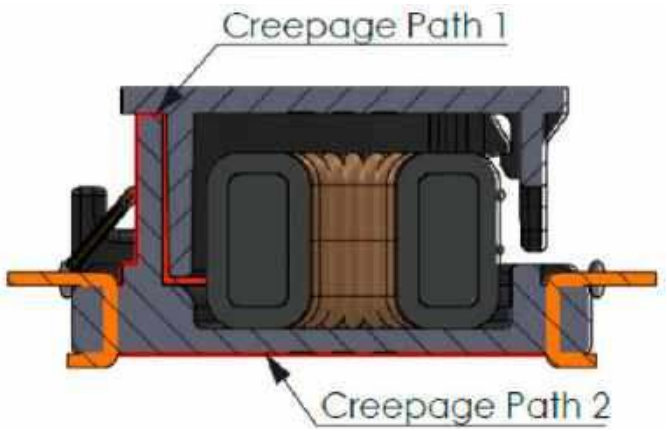
Fotografia 15. Transformator z serii HCTSM8 marki Bourns (po lewej) oraz konwencjonalny transformator z rdzeniem dzielonym – obydwa oferujące 8-milimetrowy odstęp powierzchniowy pomiędzy uzwojeniami (https://t.ly/bVzye)

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Rysunek 12. Konstrukcja transformatora HCTSM8 (https://t.ly/0EUhN)

Aby lepiej zrozumieć problem spójrzmy najpierw na porównanie modelu HCTSM8 z konwencjonalnym transformatorem do montażu SMT, wykonanym jednak w oparciu o rdzeń dzielony (**fotografia 15**). Obydwa komponenty oferują odstępy na poziomie 8 mm, ale tradycyjna konstrukcja, widoczna po prawej stronie fotografii 15, jest ponad 2-krotnie dłuższa niż propozycja marki Bourns – za relatywnie spore wymiary w jednej osi (25 mm pomiędzy padami) odpowiada tworzywowa podstawa izolacyjna, mająca na celu odsunięcie padów od odsłoniętego rdzenia transformatora na odległość, która umożliwia spełnienie wymogów w zakresie odstępów izolacyjnych. Tajemnica miniaturyzacji modelu HCTSM8 leży w kształcie tworzywowej obudowy oraz sposobie wykorzystania jej do poprowadzenia końcówek uzwojeń na odcinkach od toroida do padów lutowniczych. Widać to na **rysunku 12** – sam transformator „siedzi" ukryty we wnętrzu dwuczęściowego korpusu, zaś tory przewodów są odpowiednio oddzielone od siebie tak, by zwiększyć odstępy izolacyjne do wymaganych normami poziomów. Aby lepiej zrozumieć ideę, która przyświecała konstruktorom, warto przyjrzeć się



Rysunek 13. Ścieżki wyznaczające odstęp powierzchniowy w transformatorze HCTSM8 marki Bourns (https://t.ly/Or6Dm)

uważnie dwóm „równoległym" ścieżkom odstępów powierzchniowych, wykreślonym na **rysunku 13** – jak na dłoni widać, że ścianka obudowy diametralnie wydłuża odległość zmierzoną po powierzchni izolacji pomiędzy wyprowadzeniem, znajdującym się po lewej stronie ilustracji, a rdzeniem ukrytym wewnątrz. Projekt z pewnością był niemałym wyzwaniem, ale gra okazała się warta świeczki – niewielki transformator o wymiarach mieszczących się w obrysie 15,2×10,8×6,5 mm spełnia wymogi izolacji wzmocnionej o napięciu 800 V (rms)/1000 V (pk) i jest w stanie przetrwać różnicę potencjałów na poziomie 5 kV @ 60 s pomiędzy uzwojeniem pierwotnym, a obwodem wtórnym!

Podsumowanie

W artykule zaprezentowaliśmy wybrane trendy obecne na współczesnym rynku elementów indukcyjnych. Podobnie jak we wszystkich innych obszarach elektroniki, także i tutaj jednym z najważniejszych motorów napędowych jest postępująca miniaturyzacja – producenci prześcigają się w tym, jak wytwarzać coraz mniejsze komponenty o parametrach lepszych lub przynajmniej porównywalnych z odpowiednikami starszej generacji. Opisane w artykule zagadnienia pokazują także jasno, że przysłowiowy „diabeł tkwi w szczegółach", a pozornie nieistotne drobiazgi mogą znacząco wpływać tak na wydajność układów budowanych w oparciu o podzespoły indukcyjne, jak i nawet na oferowany przez nie poziom bezpieczeństwa elektrycznego.

inż. Przemysław Musz, EP

REKLAMA

UWAGA! Tylko prenumeratorzy czasopism „Elektronika dla Wszystkich", „Elektronika Praktyczna", „Świat Radio" oraz „Elektronik" mogą korzystać z atrakcyjnych rabatów w Sklepie AVT:

- ✓ do 50% na wydania specjalne czasopism Wydawnictwa AVT
- ✓ 20% na kity w wersji A (płytki drukowane do projektów AVT)
- ✓ 10% na pozostałe wersje kitów: (A+, B, C, D)
- ✓ 10% na książki
- ✓ 5% na pozostałe produkty z oferty sklepu

Ponadto każdy prenumerator ww. czasopism korzysta z rabatów od 30% do 50% na zakup czasopism z oferty www.UlubionyKiosk.pl

KLUB AVT ELEKTRONIKA

Jak uzyskać rabat? Podczas zamówienia powołaj się na swój numer prenumeraty – otrzymasz go mailowo po zakupie prenumeraty wraz z kartą członkowską Klubu AVT-Elektronika.

Regulamin Klubu AVT-Elektronika znajdziesz na stronie https://sklep.avt.pl/klub-avt-elektronika

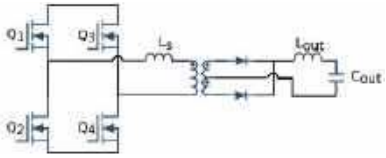
eprasa.pl f9fe7f8d6b

Transformatory do izolowanych przetwornic DC/DC dużej mocy

Topologie PSFB (Phase Shift Full Bridge) i FB-LLC (Full Bridge LLC) – za sprawą bardzo małych strat przełączania i przewodzenia – stosowane są w izolowanych przetwornicach HV o mocy wyjściowej od 500 W do 50 kW, m.in. w ładowarkach pojazdów elektrycznych.

Więcej informacji:
AET Sp. z o.o. Sp.k.
ul. Staroprzygodzka 170,
63-400 Ostrów Wielkopolski
www.aet.com.pl

Topologia PSFB (**rysunek 1**) bazuje na pełnym mostku z przesunięciem fazowym – regulacja mocy odbywa się poprzez sterowanie czasem załączania tranzystorów.



Rysunek 1. Uproszczony schemat topologii PSFB

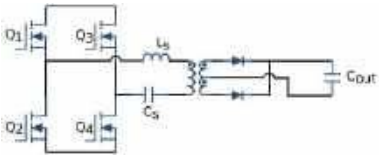
Zalety

- **Wysoka sprawność przy dużych mocach** – dzięki przesunięciu fazowemu tranzystory są kluczowane w momencie, kiedy napięcie na nich jest minimalne, co redukuje straty przełączania.
- **Napięcie wyjściowe** jest sterowane **w szerokim zakresie** poprzez zmianę przesunięcia fazowego pomiędzy Q1 i Q4.
- **Prosta topologia** oznacza niewielką liczbę komponentów (niższe koszty produkcji).

Wady

- **Straty w stanie jałowym** mogą być (ze względu na pracę w szerokim zakresie napięć wyjściowych) większe w porównaniu do innych topologii przetwornic.

Topologia FB-LCC (**rysunek 2**) to przetwornica o konstrukcji opartej na obwodzie rezonansowym (dławik + kondensator) do przełączania energii.



Rysunek 2. Uproszczony schemat topologii FB LLC

Zalety

- **Wysoka sprawność przy dużych mocach** – dzięki pracy w rezonansie można uzyskać bardzo małe straty przełączania i dużą sprawność przy dużych mocach wyjściowych.
- **Szeroki zakres napięcia wyjściowego** regulowany poprzez zmianę częstotliwości rezonansowej.
- **Niski poziom zakłóceń EMI** dzięki pracy w rezonansie.

Wady

- **Skomplikowane sterowanie** – regulacja mocy wyjściowej wymaga zmiany częstotliwości rezonansowej, co komplikuje układ sterowania.

Transformatory odgrywają kluczową rolę w działaniu obu opisanych topologii, dlatego tak istotne jest uwzględnienie strat mocy, częstotliwości i temperatury pracy oraz dobranie odpowiedniego kształtu rdzenia, materiału ferrytowego, a także rodzaju uzwojeń i izolacji.

Transformator do topologii PSFB należy zaprojektować dobierając odpowiedni stosunek zwojów oraz minimalną indukcyjność magnesowania do sterowania w trybie prądowym.

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{(V_{in} - 2 \cdot V_{mosfet_{on}}) \cdot D}{V_{out} + V_{diode_{on}}}$$

Indukcyjność szeregową natomiast należy zaprojektować dla ZVS (Zero Voltage Switching) tak, aby była zdolna magazynować energię.

W **transformatorach do topologii FB LLC** stosunek zwojów dobierany jest tak, by odpowiadał stosunkowi napięcia wyjściowego do wejściowego:

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{(V_{in} - 2 \cdot V_{mosfet_{on}})}{V_{out} + V_{diode_{on}}}$$

W przypadku FB-LCC należy też określić współczynnik jakości Q_e oraz odpowiednie proporcje pomiędzy indukcyjnością magnesowania i indukcyjnością szeregową transformatora.

Firma AET korzysta z zaawansowanego oprogramowania, na podstawie którego zaproponujemy optymalne rozwiązania z uwzględnieniem strat mocy, temperatury pracy, indukcyjności rozproszenia itp. Przy pomocy tego narzędzia klienci mogą zamówić gotowy projekt transformatora, co zaoszczędzi cenny czas i zapewni ścisłe dopasowanie produktu do potrzeb.

REKLAMA

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Rejestrator dźwięku z korektorem graficznym i analizatorem widma na bazie LPC55S28

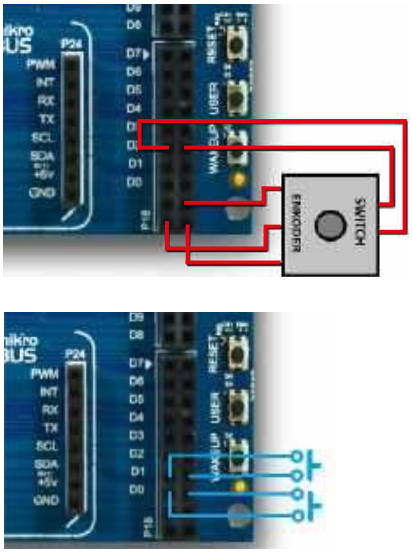
Rodzina procesorów LPC55 bardzo dobrze nadaje się do zastosowań audio. Układy te zawierają – oprócz wewnętrznego 16-bitowego przetwornika ADC, oferującego wiele udogodnień poprawiających jakość konwersji – także sprzętowe interfejsy umożliwiające podłączenie urządzeń dźwiękowych. Również rdzeń układów z tej serii jest przeznaczony do przetwarzania sygnałów: mimo niskiego szczebla zaawansowania (ARM Cortex-M33), zapewnia on bowiem sprzętowe wsparcie arytmetyki zmiennoprzecinkowej. Nawet płytka ewaluacyjna, demonstrująca działanie opisywanego mikrokontrolera, przeznaczona jest głównie do zastosowań audio: zawiera kodek połączony z procesorem za pomocą interfejsu I²S oraz gniazda (wejściowe i wyjściowe) typu mini Jack. Ponadto na płytce znalazł się slot kart SD.

Ogólny opis układu

Chociaż do działania samego rejestratora wystarczyłby sam moduł ewaluacyjny, to w ramach projektu został on rozbudowany o kartę SD (zewnętrzna pamięć znacznie powiększa pojemność rejestratora – czyli długość zapisywanych dźwięków) oraz kolorowy wyświetlacz. To drugie rozwiązanie uprościło obsługę urządzenia, co więcej: aby konstrukcja prezentowała się atrakcyjniej, projekt wzbogacono o wizualizację widma sygnału oraz korektor graficzny. W roli ekranu zastosowano wyświetlacz kolorowy 4" ze sterownikiem ILI9488, dostępny na rynku od niedawna. Jest on wyposażony w szeregowy interfejs SPI (co bardzo ułatwia konstrukcję), a do jego zalet należy również bardzo niska cena i łatwa dostępność na popularnych portalach handlowych. Do sterowania programem zastosowano enkoder 24-pozycyjny oraz dwa przełączniki monostabilne. Elementy te wpięto do złączy, na które wyprowadzone zostały sygnały procesora. Sposób podłączenia elementów zewnętrznych do płytki rozwojowej pokazany został na **rysunkach 1** i **2**.

a)

b)

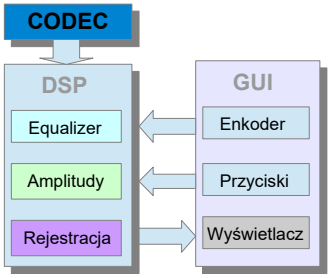


Rysunek 1. Podłączenie enkodera (a) i przełączników (b) do płytki ewaluacyjnej

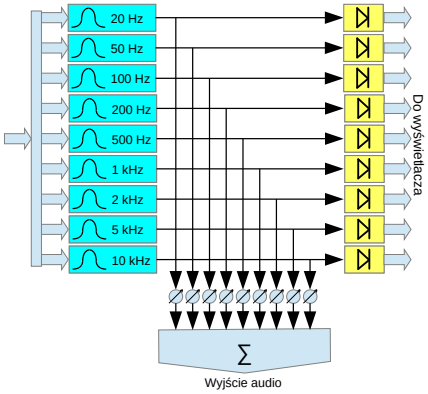
Algorytm programu

Ogólny algorytm działania programu pokazuje **rysunek 3**. Jak widać, składa się on z części przetwarzania sygnału akustycznego (która odpowiada za odczyt dźwięku z kodeka, korekcję częstotliwościową dźwięku za pomocą equalizera, zapis na karcie SD oraz wyznaczanie amplitud używanych przez procedurę wizualizacji widma sygnału) oraz bloku obsługującego interfejs graficzny, tworzący na wyświetlaczu obiekty przeznaczone do regulacji parametrów programu, a także wyświetlania użytecznych danych. Interfejs jest sterowany za pomocą enkodera z przyciskiem oraz dwóch mikroprzełączników.

Rysunek 2. Podłączenie wyświetlacza do płytki ewaluacyjnej

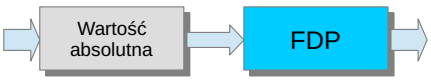


Rysunek 3. Ogólna koncepcja programu



Rysunek 4. Pomiar amplitudy sygnału akustycznego

Schemat blokowy korektora graficznego i układu analizatora widma pokazany został na **rysunku 4**. Rejestracja sygnału polega na zapisywaniu danych na kartę SD, co odbywa się za pomocą interfejsu sprzętowego realizującego transmisję. Jak widać na schemacie, z filtrów cyfrowych korzystają zarówno algorytm korektora graficznego, jak i procedura pomiaru wartości sygnału w poszczególnych pasmach częstotliwości. W celu poprawy działania filtru, jego kod wykonywany jest 4 razy w czasie jednego cyklu taktowania. Tak więc rzeczywista częstotliwość pracy filtrów wynosi: $4 \times f_p$. Cała procedura przetwarzania sygnału została umieszczona w pamięci RAM, a z myślą o dalszym zwiększeniu prędkości jej wykonywania wyeliminowano stosowanie wywołań funkcji, zamiast których wprowadzone zostały makra. Na **listingu 1** zaprezentowano fragmenty programu zawierające kod filtru pasmowego oraz



Rysunek 5. Schemat blokowy equalizera oraz analizatora widma

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Wykaz elementów:

Płytka ewaluacyjna LPC55S28-EVK
Wyświetlacz kolorowy 4" z interfejsem SPI (kontroler ILI9488) o rozdzielczości 480×320 px,
Enkoder inkrementalny 24-pozycyjny z przyciskiem
2×przycisk monostabilny

```
#define PomiarAmplitudy(n,x)\
    static float n##BA = 0;\
    static float n##C1 = 0;\
    n##C1 += (((x<0) ? -x :x)-n##C1)*T_PA;\
    n##BA += (n##C1-n##BA)*T_PA;

#define Filtr(f,q,x)\
        static float uc##f = 0;\
        static float IL##f = 0;\
        uc##f += IL##f * (float)((float)2 * STALA_PI / FP/(float)4) * (float)q * (float)f;\
        IL##f += (x - uc##f - IL##f) * (float)((float)2 * STALA_PI / FP/(float)4) * (float)f / (float)q;\
        uc##f += IL##f * (float)((float)2 * STALA_PI / FP/(float)4) * (float)q * (float)f;\
        IL##f += (x - uc##f - IL##f) * (float)((float)2 * STALA_PI / FP/(float)4) * (float)f / (float)q;\
        uc##f += IL##f * (float)((float)2 * STALA_PI / FP/(float)4) * (float)q * (float)f;\
        IL##f += (x - uc##f - IL##f) * (float)((float)2 * STALA_PI / FP/(float)4) * (float)f / (float)q;\
        uc##f += IL##f * (float)((float)2 * STALA_PI / FP/(float)4) * (float)q * (float)f;\
        IL##f += (x - uc##f - IL##f) * (float)((float)2 * STALA_PI / FP/(float)4) * (float)f / (float)q;\
```

Listing 1. Makra odpowiedzialne za pomiar amplitudy oraz filtrację danych

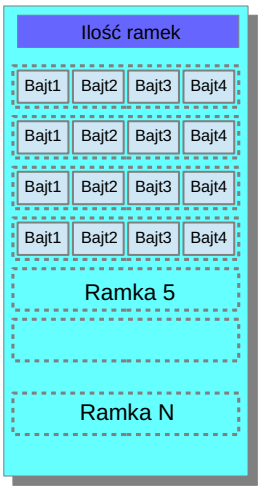
detektora amplitudy. Zasada działania bloku pomiaru amplitudy pokazana jest na **rysunku 5**. Jeśli Czytelnik chciałby zmodyfikować program, należy zwrócić szczególną uwagę na to, aby do przechowywania wartości sygnału i wykonywania na nim operacji matematycznych stosować zmienne typu `float` (pojedynczej precyzji), a stałe zamieniać (metodą konwersji jawnej) także na typ `float`, gdyż tylko on jest obsługiwany sprzętowo. Operacje na zmiennych typu double są o wiele bardziej czasochłonne i mogą spowodować nieprawidłowe działanie programu.

Rejestrowane dane zapisywane są na karcie SD podzielonej na 22 fragmenty. Na każdym z nich można zapisać około pół godziny dźwięku. Reprezentacja danych jednej ścieżki dźwiękowej pokazana została na **rysunku 6**.

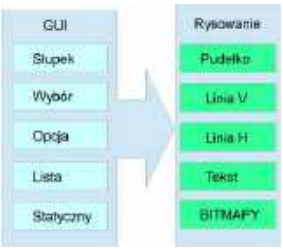
Do wykonania części interfejsu graficznego użytkownika zastosowano bibliotekę napisaną przez autora. Składa się ona z 5 obiektów oraz 5 procedur graficznych, które są stosowane przez interfejs, ale można także korzystać z nich niezależnie od tego ostatniego.

Do budowy interfejsu graficznego służą następujące obiekty:

- Słupek – umożliwia ustawianie wartości,
- Wybór – wywołuje procedurę zdarzenia po wciśnięciu przycisku enkodera,
- Opcja – pozwala ustawić wartość pojedynczej flagi,
- Lista – umożliwia wybranie jednej pozycji z listy napisów,



Rysunek 6. Reprezentacja danych pojedynczej ścieżki dźwiękowej w pamięci karty SD



Rysunek 7. Budowa biblioteki interfejsu graficznego

- Statyczna – wyświetla tekst lub bitmapę.

Do zmiany obiektu na ekranie służą dwa przyciski.

Aby umieścić obiekt interaktywny na wyświetlaczu, należy odpowiednio wypełnić jego strukturę oraz wywołać funkcję: „GUI_Add" i jako parametr podać wspomnianą strukturę konfiguracyjną. Wszystkie deklaracje obiektów używanych przez interfejs użytkownika znajdują się w pliku nagłówkowym GUI. Strukturę interfejsu graficznego pokazuje **rysunek 7**.

Oto wszystkie zaimplementowane funkcje GUI:

- void InicjujPG(),
- void GUI_Init() – inicjalizuje Framework,
- void GUI_Add(E_Kontrol*) – wstawia kontrolkę i wyświetla ją na ekranie,
- void GUI_New() – usuwa wszystkie obiekty,
- void GUI_Hide() – zaciemnia ekran,
- void GUI_Show() – usuwa zaciemnienie ekranu,
- void GUI_Zatwierdz(E_Kontrol*) – rysuje ponownie obiekt,
- void GUI_UstawKontrol(int id) – ustawia aktywny obiekt,
- E_Kontrol* GUI_Podaj(int id) – zwraca strukturę obiektu na podstawie jego numeru identyfikacyjnego.

Do obsługi zdarzeń służy funkcja, którą należy przypisać odpowiedniemu polu obiektu graficznego:

```
void (*Handle)(T_Z, E_Kontrol *c) = NULL;
```

gdzie T_Z: typ wyliczeniowy pokazany na **listingu 2**.

Obsługa urządzenia

Ustawianie parametrów urządzenia odbywa się poprzez zastosowanie zwykłych kontrolek biblioteki, natomiast wyświetlanie pasków wizualizacji widma realizowane jest za pomocą procedury rysowania kształtu prostokątnego. Z powodu dość wolnej transmisji nie robi się tego jednak w sposób bezpośredni – wielkość słupka wskazującego wartość sygnału jest powiększana lub zmniejszana w zależności od zmiany amplitudy.

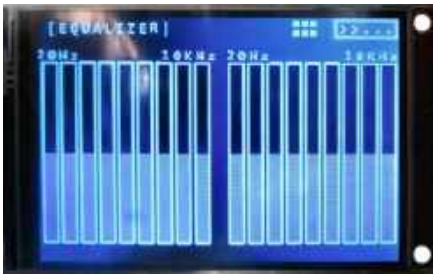
Interfejs składa się z trzech ekranów. Pierwszy z nich służy do wyboru numeru pozycji, pod którą zostanie zapisany lub odczytany dźwięk – **fotografia 1**. Drugi (**fotografia 2**) zawiera elementy do regulacji parametrów equalizera. Na ostatnim wyświetlane jest widmo sygnału (wartości

Fotografia 1. Ekran służący do wyboru pozycji zapisu i sterowania odczytem oraz rejestracją

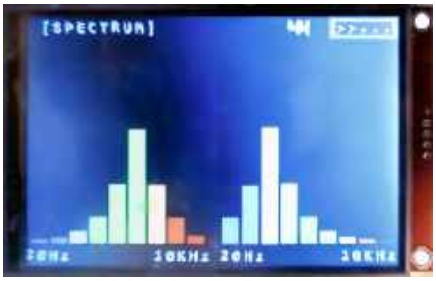
```
enum T_Z
{
    Z_INICJUJ,          //inicjacja objektu
    Z_EN_L,             //ruch enkodera w lewo
    Z_EN_P,             //ruch enkodera w prawo
    Z_EN_SW,            //naciśnięcie przycisku enkodera
    Z_SW1,              //naciśnięty przycisk 1
    Z_SW2,              //naciśnięty przycisk 1
    Z_TIMER,            //skończenie odliczania przez TIMER
                        //(wywoływana jest funkcja wskazywana przez *TH)
    Z_TICK              // wewnętrzny
};
```

Listing 2. Definicja typu wyliczeniowego T_Z

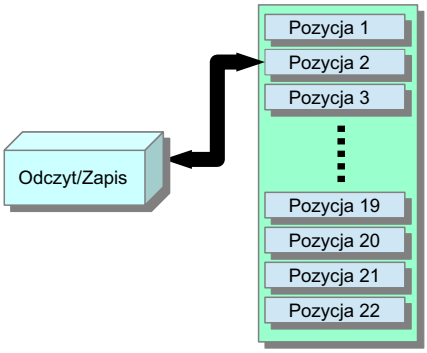
eprasa.pl f9fe7f8d6b



Fotografia 2. Ekran equalizera



Fotografia 3. Wyświetlanie widma sygnału



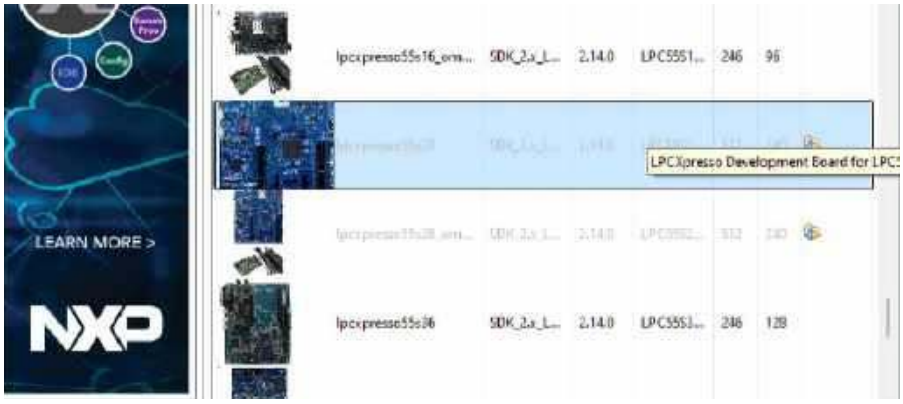
Rysunek 8. Komunikacja pomiędzy programem a kartą pamięci

napięcia dla różnych pasm częstotliwości) – **fotografia 3**. Do przełączania ekranów służy obiekt typu „Wybór", leżący w prawym górnym rogu ekranu.

Do użycia dostępne są 22 pozycje pamięci. Obszar karty SD podzielony jest właśnie na tyle równych fragmentów, z których każdy umożliwia zapisanie około 30 min dźwięku. Całkowita wielkość zastosowanej karty wynosi 8 GB. Schemat przesyłania danych pomiędzy kartą a mikrokontrolerem pokazano na **rysunku 8**.

Zapisanie i modyfikacja programu

Moduł ewaluacyjny LP55S28EV wyposażony jest we wbudowany programator

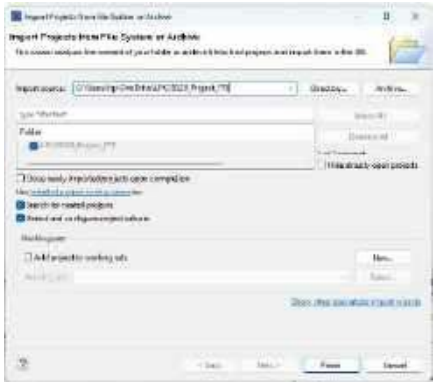


Rysunek 9. Wybór pakietu SDK dla naszego projektu

MCU-Link. Aby jednak uruchomić program na mikrokontrolerze, należy go najpierw wpisać do pamięci Flash. Potrzebne do tego jest oprogramowanie działające na komputerze PC – MCUXpresso IDE. Dzięki wspomnianemu środowisku możemy zaprogramować nasz moduł oraz dowolny procesor firmy NXP, jak również przeglądać i modyfikować kod naszego programu. Aby skompilować program, musimy zainstalować pakiet SDK odpowiedni dla płytki ewaluacyjnej z procesorem LPC55S28. Najwygodniejszym sposobem instalacji pakietów jest wejście na stronę startową środowiska IDE i wybranie odpowiedniej opcji. Najprościej ekran powitalny uruchomić za pomocą sekwencji menu: HELP/WELCOME, a następnie na ekranie, który się wyświetli, wybrać polecenie „Install SDK" – **rysunek 9**.

Aby przenieść nasz projekt do procesora płytki rozwojowej, trzeba wykonać kilka kroków.

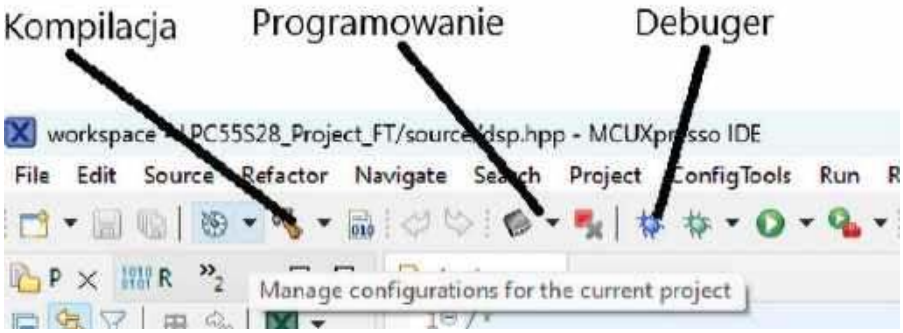
1. Dodać projekt do przestrzeni roboczej (**rysunek 10**).



Rysunek 10. Dodawanie projektu do przestrzeni roboczej

2. Z głównego menu wybrać 'File'/'Open Project from File System'.
3. Teraz możemy już zaprogramować płytkę lub uruchomić Debugger, wybierając odpowiednie pozycje z paska narzędzi. Jeśli chcemy dokonać zmian w kodzie, należy go powtórnie skompilować – patrz **rysunek 11**.

Tomasz Krogulski



Rysunek 11. Kompilacja i uruchomianie programu

REKLAMA
Mnóstwo doskonałych artykułów, tylko na:
EP.com.pl

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Internet Rzeczy w pomiarach środowiskowych (12)

Dołączanie czujnika CO_2 typu SCD41 oraz czujnika jakości powietrza BME688 do modułu Enviro Weather

Płytka Enviro Weather umożliwia pomiary parametrów środowiska: ciśnienia, temperatury i wilgotności, za pomocą czujnika BME280 oraz poziomu oświetlenia (LTR-559). Po uzupełnieniu zestawu o układy SCD41 (czujnik poziomu CO_2, temperatury i wilgotności) i BME688 (sensor jakości powietrza, ciśnienia, temperatury i wilgotności) oraz wyświetlacz e-paper otrzymujemy atrakcyjny zestaw pomiarowy z możliwością zasilania bateryjnego. Całość pozwala na dosyć dokładną ocenę komfortu użytkowania pomieszczenia.

Autor dziękuje Panu Maciejowi Michnie z Centrum Badań i Rozwoju Nordic Semiconductor w Krakowie za udostępnienie zestawów sprzętowych Power Profiler Kit II (PPK2).

Poprzednie odcinki znajdują się pod adresem: **https://ulubionykiosk.pl/media**

Gwałtowny rozwój Internetu Rzeczy jest spowodowany w dużej mierze przez szybki rozwój scalonych czujników różnych parametrów fizycznych: temperatury, ciśnienia, wilgotności, oświetlenia, koloru, ruchu, stężenia gazów i pyłów w powietrzu oraz wielu innych. Szczególnie szybki rozwój nastąpił w dziedzinie pomiarów jakości powietrza w pomieszczeniach. Różne rodzaje czujników gazów oraz stosowane technologie pomiaru zostały opisane w artykule „Cyfrowe czujniki gazu" [1].

CO_2 jest kluczowym wskaźnikiem jakości powietrza w pomieszczeniach (IAQ), ponieważ wysokie jego stężenie wpływa negatywnie na sprawność poznawczą i samopoczucie człowieka. Czujniki CO_2 na bazie techniki niedyfrakcyjnej podczerwieni NDIR oferują wysoką czułość i dokładność pomiaru stężenia gazu (np. SCD30 firmy Sensirion), jednak do ich wad należą dość spore rozmiary i wysoka cena. Na rynku pojawiają się także czujniki wykonane z użyciem nowych technologii, jak STC31-C firmy Sensirion (działający na zasadzie pomiaru przewodnictwa cieplnego, co zapewnia doskonałą powtarzalność i długoterminową stabilność).

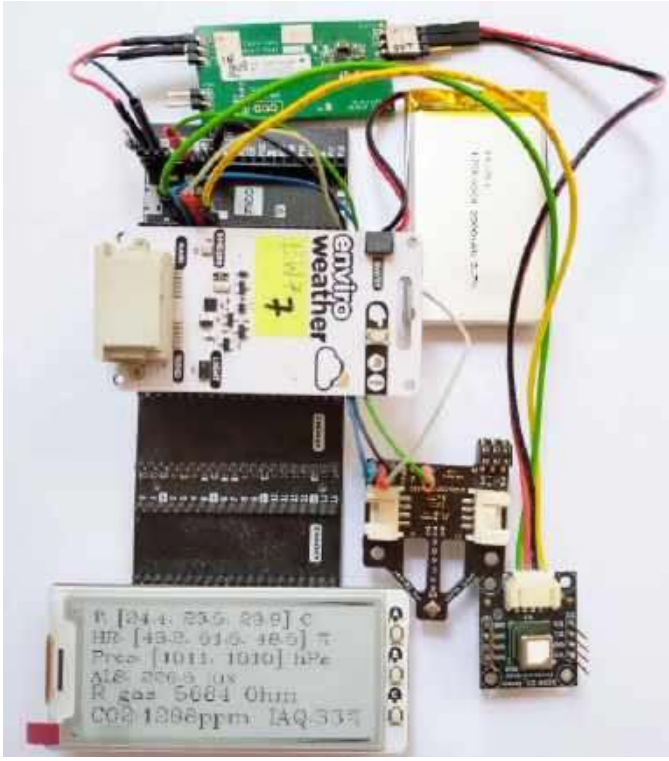
Czujnik CO_2 typu SCD41 marki Sensirion

W połowie roku 2020 firma Sensirion wprowadziła na rynek SCD40 – pierwszy zminiaturyzowany czujnik CO_2 na bazie technologii PAS (Photoacoustic Spectroscopy), opisanej szerzej w [1].

Cechy czujnika SCD41 [6]:

- zakres pomiarowy CO_2: 400...5000 ppm,
- dokładność (400…2000 ppm): ±50 ppm,
- powtarzalność: ±10 ppm,
- czas odpowiedzi (skok 400...2000 ppm): 60 s,
- zakres pomiaru wilgotności: 0…100%,
- zakres pomiaru temperatury: –10…60°C,
- zasilanie: 2,4…5,5 V (typ. 3,3 V lub 5 V),
- pobór prądu: pik (typ./maks.) – 175/205 mA, średni @ 3,3 V – (pomiar co 5 s/30 s/5 min): 15/3,2/0,45 mA, w trybie bezczynności – 200 µA,
- czas rozruchu (> 2,25 V): 30 ms (maks.),
- czas pojedynczego pomiaru (maks.): CO_2 + RHT: 5000 ms, RHT: 50 ms,
- komunikacja: I²C (400 kHz maks.), adres 0x62.

Napięcie zasilania czujnika powinno być pozbawione tętnień lub spadków napięcia przekraczających 30 mV. SCD4x komunikuje się



z użyciem protokołu opartego na specyfikacji magistrali I²C firmy NXP. Szyny SDA i SCL wymagają dołączenia rezystorów podciągających. Dane wysyłane do czujnika i odbierane z niego składają się z sekwencji 16-bitowych poleceń i/lub 16-bitowych słów (każde z nich należy interpretować jako liczbę całkowitą bez znaku, przy czym najbardziej znaczący bajt jest przesyłany jako pierwszy). Każde słowo danych jest od razu uzupełniane 8-bitową sumą kontrolną CRC. W kierunku zapisu obowiązkowe jest przesłanie sumy kontrolnej. SCD41 oferuje cztery różne typy sekwencji poleceń I²C: odczyt sekwencji, zapis sekwencji, wysyłanie polecenia oraz sekwencje wysłania polecenia i pobrania wyniku.

Po starcie zasilania układ przechodzi w stan bezczynności. SCD41 oferuje trzy tryby pomiaru: okresowy, okresowy o niskim poborze mocy oraz pojedynczy.

Typowa sekwencja komunikacji w trybie pomiaru okresowego wygląda następująco:

1. Czujnik jest włączany do stanu bezczynności.

eprasa.pl f9fe7f8d6b

2. Urządzenie nadrzędne (master) I²C wysyła polecenie *start_periodic_measurement*. Automatycznie wykonywane są pomiary. Interwał aktualizacji sygnału wynosi 5 s.
3. Master I²C okresowo odczytuje dane za pomocą polecenia *read_measurement*.
4. Gdy czujnik ma przestać okresowo wykonywać pomiary, master wysyła polecenie *stop_periodic_measurement*, aby przywrócić czujnik do trybu bezczynności (500 ms).

SCD41 oferuje tryb okresowego pomiaru o niskim poborze mocy z interwałem aktualizacji wyniku wynoszącym około 30 sekund. Opisywany tryb jest inicjowany za pomocą polecenia *start_low_power_periodic_measurement* i odczytywany w podobny sposób, jak pomiar okresowy przy użyciu polecenia *read_measurement*.

Czujnik oferuje dodatkowo tryb pomiaru pojedynczego (na żądanie):

1. Układ jest włączany poleceniem *wake_up*, jeśli wcześniej został wyłączony poleceniem *power_down*.
2. Master I²C wysyła polecenie *measure_single_shot* i czeka na wskazany maksymalny czas trwania polecenia (5000/50 ms).
3. Master odczytuje dane poleceniem *read_measurement*.
4. Kroki 2 i 3 są powtarzane zgodnie z wymaganiami aplikacji.
5. W razie potrzeby wyłączenie czujnika jest możliwe przy użyciu polecenia *power_down*.

Najkrótszy możliwy interwał próbkowania w trybie pomiarów pojedynczych wynosi 5 sekund. Aby jeszcze bardziej zmniejszyć zużycie energii, można zastosować kluczowanie zasilania czujnika pomiędzy pomiarami albo użyć poleceń *power_down*/*wake_up*.

SCD41 udostępnia dwie funkcje kalibracji terenowej: wymuszoną ponowną kalibrację (FRC) i autokalibrację (ASC).

Należy pamiętać, że białej membrany zabezpieczającej przed kurzem i wodą, znajdującej się na górze nasadki czujnika, nie wolno zdejmować.

Moduł SEK-SCD41

Moduł SEK-SCD41 firmy Sensirion zawiera tylko czujnik SCD41, gniazdko JST PH 2,0 mm oraz dwa rzędy padów do wlutowania listew goldpin udostępniających zasilanie i sygnały szyny I²C (na płytce brakuje natomiast rezystorów podciągających linie interfejsu). W zestawie dostarczane są dwa kable: jeden zakończony wtykami goldpin, a drugi – wtykiem RJ45, umożliwiającym dołączenie modułu do mostka SEK-SensorBridge, umożliwiającego – wraz z oprogramowaniem ControlCenter – natychmiastową pracę z czujnikami firmy Sensirion. Główną funkcjonalnością ControlCenter jest wykonywanie i wizualizacja pomiarów na żywo z różnych czujników. Dokładniejszy opis pracy z tym zestawem znajduje się w artykule „Moduł czujników środowiska SEN5x firmy Sensirion" [3].

Moduł BME688 Breakout Board firmy pi3g

Czujnik BME688 firmy Bosch został dokładnie opisany w artykule pt. „Czujnik gazu Bosch BME688 ze Sztuczną Inteligencją" [2]. Moduł BME688 Breakout Board firmy pi3g zawiera układ BME688 fabrycznie skonfigurowany do pracy z szyną I²C [8].

Płytka Enviro Weather (PIM628)

Widok płytki Enviro Weather (PIM628) pokazano na **fotografii tytułowej**. Na dolnej stronie płytki jest bezpośrednio wlutowana płytka Raspberry Pi Pico W, udostępniająca gniazdko microUSB oraz przycisk BOOTSEL. Zestaw był już wielokrotnie opisywany w artykułach publikowanych w poprzednich wydaniach „Elektroniki Praktycznej", dlatego też zainteresowanych Czytelników zachęcamy do zapoznania się z poprzednimi odcinkami niniejszego cyklu.

Czujnik ciśnienia, temperatury i wilgotności BME280

Układ scalony BME280 firmy Bosch wykonuje pomiary ciśnienia (300...1100 hPa, 18/20 bitów), temperatury (–40°C...+85°C, 18/20 bitów) oraz wilgotności względnej (0...100%, 16 bitów) w technologii pojemnościowej [11]. Udostępnia on pomiary wilgotności względnej w zakresie 0...100% z rozdzielczością 0,008% RH/LSB oraz dokładnością ±3% RH (w zakresie 20...80% RH). Czas odpowiedzi wynosi (τ0...63%) 1 s, dryft długoterminowy (20...80% RH) 0,5% RH/rok, a histereza ±1% RH. Na płytce Enviro Weather układ BME280 jest skonfigurowany do pracy ze standardem komunikacji I²C i zasilaniem 3,3 V.

Czujnik światła otoczenia LTR-559

Układ LTR-559 firmy LiteOn to scalony czujnik światła otoczenia (ALS, Ambient Light Sensor) oraz czujnik zbliżeniowy (PS, Proximity Sensor). Układ ma dwa kanały pomiarowe o charakterystyce spektralnej zbliżonej do oka ludzkiego (bez podczerwieni oraz z uwzględnieniem pasma IR). Pomiar jest wykonywany w liniowym zakresie 0,01...64 000 lx z rozdzielczością 16 bitów. Sensor został dokładniej opisany w artykule [4].

Układ scalony PCF85063A – zegar RTC

Układ scalony PCF85063A firmy NXP to zegar czasu rzeczywistego (RTC) i kalendarz zoptymalizowany pod kątem niskiego zużycia energii [4]. Na płytce Enviro Weather układ PCF8563A jest zasilany napięciem z szyny V+_A0 (3,3V). Dokładniejszy opis implementacji zegara można znaleźć w [4].

Pico Inky Pack – moduł z wyświetlaczem e-paper

Pico Inky Pack (PIM634) firmy Pimoroni to moduł z czarno-białym wyświetlaczem e-paper o przekątnej 2,9" i rozdzielczości 296×128 pikseli, przeznaczony do użycia z Raspberry Pi Pico oraz Raspberry Pi Pico W. Ma wbudowany kontroler z interfejsem SPI oraz trzy mikroprzyciski. Jest zasilany z szyny 3V3 modułu Pico.

Pico Graphics to zunifikowana biblioteka graficzna opracowana przez Pimoroni i umożliwiająca sterowanie wyświetlaczami z poziomu płytki RPi Pico w języku MicroPython.

Dołączanie czujników do płyki Enviro Weather

Moduły z czujnikami zostały dołączone do ekspandera z zastosowaniem standardowych kabelków IDC (fotografia tytułowa). Zasilanie modułu BME688 Breakout Board dołączono do szyny 3V3 na płytce Pico W modułu Enviro Weather, a zasilanie modułu SEK-SCD41 – do wyjścia LDO typu LT3045, ustawionego na 3,3 V i dołączonego do szyny VSYS. Linie I²C obu modułów pracują na wspólnej szynie czujników modułu Enviro Weather (GP4 – SDA, GP5 – SCL). Dokładny opis organizacji zasilania płytki Raspberry Pi Pico W oraz Enviro Waether został już omówiony w artykule pt. „Optymalizacja poboru mocy urządzenia IoT z płytką Raspberry Pi Pico W" [5].

Praca czujników z modułem Enviro Weather

Cała procedura wpisywania do płytki Enviro Weather najnowszej wersji firmowego pliku obrazu (uf2) oraz aplikacji Enviro została dokładnie omówiona w poprzednich odcinkach niniejszego cyklu. Tym razem do pamięci trzeba dodatkowo wpisać pliki aplikacyjne z pobranego pliku *Enviro_SCD41_BME688.zip* (https://tiny.pl/cm34mp4b). Podmieniane są jedynie skrypty *main.py* i *config.py*.

Obsługa programowa czujników jest realizowana za pomocą driverów firmy Pimoroni dostarczanych w pliku obrazu MicroPythona.

Podczas wykonywania bloku pomiarowego cała aplikacja (w pliku main.py) uruchamiana jest tylko raz. Dlatego każdorazowo należy zainicjalizować czujniki, a potem odczyt danych pomiarowych. Po wystartowaniu oprogramowania błyska jeden raz biała dioda LED (ACTIVITY). Na początku kodu z pliku const.txt wczytywane są dane wilgotności bazowej (HUM_BASE) i czasu usypiania układu (SLEEP_TIME). Następnie wykonywana jest detekcja obecności wszystkich układów na szynie I²C. Aktywowany jest także dostęp

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Rysunek 1. Odczyt znacznika gotowości danych oraz danych pomiarowych czujnika SCD41

do czujników BME280, BME688 i LTR-599. Potem następuje wysłanie komend zatrzymania pomiarów, inicjalizacji czujnika SCD41 oraz – finalnie – startu pomiaru okresowego.

Następnie odczytywane są poprzednie dane pomiarowe z pliku buf.txt, potrzebne do tego, aby na wyświetlaczu dorysować prostokąt sygnalizujący początek wykonywania pomiaru.

Po odczycie danych pomiarowych z czujników BME280, BME688 oraz LTR-559 w pętli sprawdzany jest znacznik gotowości danych układu SCD41 i trwa oczekiwanie na jego ustawienie (ok. 5 s). Wtedy dane pomiarowe zostają odczytane (**rysunek 1**), po czym następuje komenda zatrzymania pomiaru okresowego.

Do pomiarów szyny I²C zastosowano oscyloskop DSO-X 3204A firmy Keysight z zainstalowanym programowym modułem pomiarowym analizy protokołu I²C [12]. W sposób niemalże intuicyjny pozwala on na analizę zdarzeń na szynie. W pomiarach zostało zastosowane wyzwalanie wpisem na szynie I²C pod adresem SCD41 (czyli 0x62).

Czujniki BME280 i BME688 mierzą ciśnienie, BME280, BME688 i SCD41 – temperaturę i wilgotność, zaś SCD41 – poziom CO_2. Sensor BME688 zwraca ponadto poziom gazów w postaci wartości rezystancji, na podstawie której wyliczany jest indeks jakości powietrza IAQ, wzorowany na analogicznym obliczeniu realizowanym przez driver Pimoroni [11]. Wszystkie wyniki pomiarów i obliczeń są pokazywane na wyświetlaczu e-paper i zapisywane w pliku buf.txt. Na koniec wywoływana jest firmowa funkcja *enviro.sleep*, programująca RTC na wybudzenie procesora oraz wprowadzająca procesor na pewien czas (np. 1 min) w stan uśpienia. Podczas zasilania z wejścia BAT wyłączane jest zasilanie całej płytki Enviro Weather oraz wszystkich dołączonych czujników, z wyjątkiem układu RTC. Sygnał alarmu z RTC wymusza reset procesora.

Przykład pomiaru parametrów środowiska został pokazany na fotografii tytułowej. Wielkości mierzone przez kilka czujników są pokazywane w jednym wierszu, od lewej BME280, BME688 i SCD41.

Oprogramowanie było uruchamiane w środowisku Thonny. Na **listingu 1** pokazano okno Shell po wystartowaniu aplikacji pomiarowej. Różne informacje są wyprowadzane przez aplikację pomiarową oraz przez firmową aplikację Enviro (poprzedzone znacznikiem czasu, nieaktualizowanym).

Pozwalają one na dosyć dokładne zorientowanie się w postępach pracy oprogramowania.

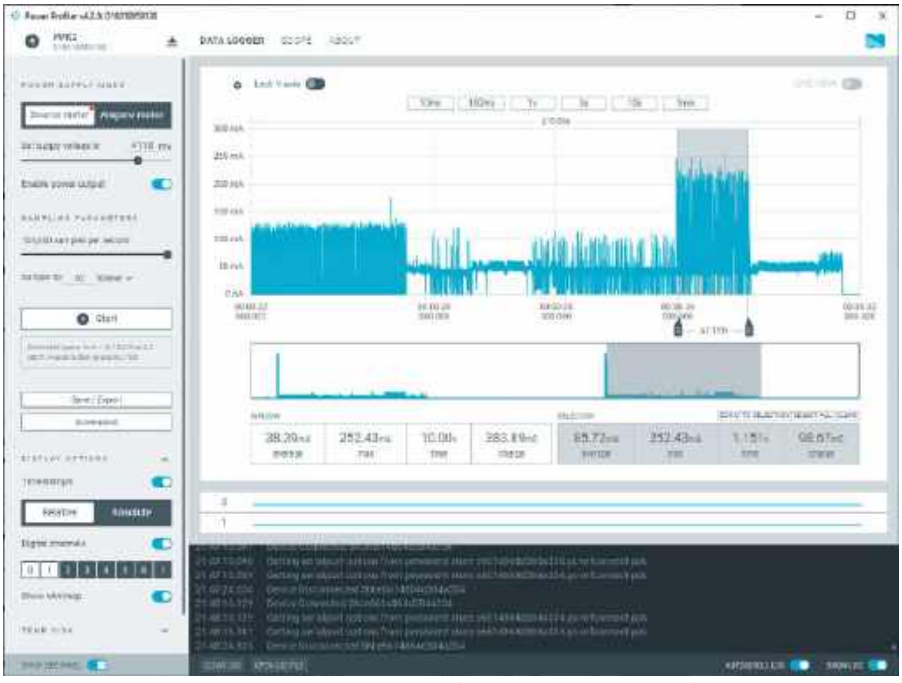
Do dynamicznego pomiaru prądu zasilania bardzo dobrze nadaje się zestaw Power Profiler Kit II (PPK2) firmy Nordic Semiconductor. Jest to samodzielny układ, który bez zewnętrznego sprzętu może mierzyć i dostarczać prądy od poniżej µA do 1 A. Praktyka pokazuje, że zakres pracy rozciąga się do ok. 2 A – wymaga to jednak dołączenia dodatkowego portu USB do drugiego gniazdka PPK2. Dokładny opis PPK2 jest zamieszczony w artykule „Profilowanie mocy z zastosowaniem Power Profiler Kit II" [10].

Na **rysunku 2** został pokazany pomiar poboru prądu płytki Enviro Weather podczas dwóch cykli pomiarowych, po podaniu zasilania na wejście BATT (4,2 V) z zestawu Power Profiler Kit II (PPK2). Pomiary parametrów środowiska są wykonywane co ok. 1 min. Procesor podczas pracy pobiera ok. 50 mA prądu. Płytka Enviro Weather w stanie wyłączenia zasilania (uśpienia) pobiera ok. 30 µA prądu (zasilane jest tylko RTC), zaś po podaniu zasilania na wejście BATT impuls prądu ma wartość 89 mA – potem startuje tylko sam układ RTC, migając słabo czerwoną diodą LED (ok. 0,6 mA). Dopiero przyciśnięcie przycisku POKE powoduje impulsowy pobór prądu ok. 1,4 A (ok. 600 µs) i start aplikacji. W następnych cyklach pomiarowych nie jest potrzebne dalsze przyciskanie klawisza POKE. Jednak przy każdym ponownym włączeniu zasilania procesora (po sygnale przerwania z układu RTC) występuje tak samo wysoki pik prądu rozruchowego, co bardzo zwiększa wymagania dotyczące wydajności prądowej źródła zasilania układu.

Średni pobór prądu podczas pomiaru wynosi ok. 39 mA, a w całym okresie – ok. 6,9 mA (rysunek 2). Wartość ta drastycznie maleje po zwiększeniu odstępów pomiędzy pomiarami. Podczas pracy SCD41 pobór maksymalny wynosi ok. 252 mA i średni ok. 85 mA. Prąd pobierany jest skokowo w postaci regularnych

```
const.txt file found
WIN_NAME:  40   SPLEEP_TIME:  1
LTR-559ALS-01 0x23, BME68688A 0x51,  SCD41 0x62, BME688 0x76, BME280 0x77
Detected devices at I2C1-addresses:
['0x23', '0x51', '0x62', '0x76', '0x77']
Decimal address:  [35, 81, 98, 118, 119]
SCD41 started !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
buf.txt file found
Previous data  ['[23.0, 21.8, 23.8]', '[45.7, 55.4, 46.3]', '[1011, 1011]', '13363', '22.2', '796', '48', '']
Current data   [[23.4, 23.3, 24.1], [44.2, 54.7, 45.8], [1011, 1011], 14032, 22.3, 783, 49]
2000-01-01 00:35:19 [info     / 121kB] > going to sleep for 1 minute(s)
2000-01-01 00:35:19 [debug    / 119kB]   - clearing and disabling previous alarm
2000-01-01 00:35:19 [info     / 117kB]   - setting alarm to wake at 00:36am
2000-01-01 00:35:19 [info     / 115kB]   - shutting down
2000-01-01 00:35:19 [debug    / 113kB]   - on usb power (so can't shutdown). Halt and wait for alarm or user reset instead
2000-01-01 00:36:00 [debug    / 124kB]   - reset
```

Listing 1. Informacje wyświetlane po uruchomieniu aplikacji



Rysunek 2. Pobór prądu płytki Enviro Weather (zasilanie z wejście BATT)

eprasa.pl f9fe7f8d6b

impulsów 200 mA. Przy wymaganiu stabilności napięcia zasilania układu SCD41 na poziomie lepszym niż 30 mV stawia to wysokie wymagania wobec obwodu zasilania.

Podczas zasilania płytki Enviro Weather z gniazdka USB procesor, zamiast wchodzić w stan uśpienia, aktywnie odczytuje w pętli znacznik przerwania układu RTC. Dopiero po jego ustawieniu wymusza reset procesora. Średni pobór prądu płytki (@ 5 V) podczas pomiaru wynosi 39 mA, maksymalny ok. 290 mA (**rysunek 3**). W trakcie oczekiwania pobór prądu wynosi ok. 36 mA. Niski prąd średni wynika z braku szpilek prądowych przy restarcie procesora.

Rysunek 3. Pobór prądu płytki Enviro Weather (zasilanie z USB)

Podsumowanie

Doskonała płytka Enviro Weather, udostępniająca wiele czujników środowiska, została ponownie uzupełniona o podłączenie sensorów kolejnych parametrów, np. SCD41 i BME688. Pomimo pomiaru tych samych wielkości przez kilka czujników, wyniki nieznacznie się różniły. Wynika to z różnic w sposobie pomiaru i czasie reakcji na zmiany. Jednocześnie taka redundancja pozwala na weryfikację pomiarów o wątpliwej wartości użytkowej.

Pomiar wilgotności wykonywany przez czujnik BME688 wykazywał wyraźnie wyższą wartość niż dane z pozostałych czujników. Inny egzemplarz działał poprawnie. W zaleceniach producenta jest podane, że nie wolno dotykać palcem układu scalonego – tłuszcz ze skóry pozostanie na powierzchni czujnika, co wydłuży czas jego odgazowywania, a to spowoduje błędy w danych pomiarowych. W celu zwiększenia dokładności pomiaru CO_2 można w bloku pomiarowym odczytać kilka wyników z czujnika SCD41 (wykonywanych automatycznie co 5 s) i uśrednić je.

Przykład pomiaru parametrów środowiska, pokazany na fotografii tytułowej, uwidacznia typowe parametry środowiska w pomieszczeniu w trakcie końca lata.

Zastosowanie środowiska uruchomieniowego Thonny daje łatwość rozpoczęcia pracy z procesorem RP20240 w języku MicroPython i możliwość wykorzystania wielu przykładowych projektów. Wadą jest praktycznie brak wspomagania w postaci debuggera. Już po pierwszym wykonaniu aplikacji następuje reset procesora i utrata komunikacji środowiska Thonny z płytką Enviro Weather. Oznacza to brak możliwości podglądu informacji wysyłanych przez aplikację. Nie pomaga ponowne dołączenie środowiska do działającej płytki, ponieważ powoduje to zatrzymanie działania aplikacji. Również wystąpienie błędu powoduje zatrzymanie działania programu, bez możliwości zasygnalizowania problemu.

Realizacja oprogramowania bazuje na projekcie „Pomiar indeksu jakości powietrza we wnętrzach, w tym IAQ oraz poziomu CO_2" wykonanego w ramach przedmiotu „Systemy wbudowane i oprogramowanie" na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej przez zespół w składzie: Filip Zawadzki, Tomasz Koźmiński, Wojciech Kryński i Krzysztof Dobosz.

Henryk A. Kowalski
Instytut Informatyki
Politechnika Warszawska

Literatura:

[1] *Systemy dla Internetu Rzeczy (35): Cyfrowe czujniki gazu*, Henryk A. Kowalski, EP 3/2020, https://tiny.pl/czkh1
[2] *Systemy dla Internetu Rzeczy (54): Czujnik gazu Bosch BME688 ze Sztuczną Inteligencją*, EP 11/2021, https://tiny.pl/cspv8
[3] Moduł czujników środowiska SEN5x firmy Sensirion, EP 3/2024, https://tiny.pl/d0fyfcy5
[4] *Stacja pogodowa Enviro Weather firmy Pimoroni*, EP 4/2024, https://tiny.pl/d93r1
[5] *Optymalizacja poboru mocy urządzenia IoT z płytką Raspberry Pi Pico W*, EP 5/2024, https://tiny.pl/d59hg
[6] SCD41, Sensirion, https://sensirion.com/products/catalog/SCD41
[7] SEK-SCD41, Sensirion, https://tiny.pl/nmdwsjrw
[8] ME688breakoutboardBoschairqualitysensor,pi3g,https://tiny.pl/gvvvfb1c
[9] Enviro MicroPython firmware, Pimoroni, https://tiny.pl/dt49f
[10] *Profilowanie mocy z zastosowaniem Power Profiler Kit II*, EP 5/2022, https://tiny.pl/d93rd
[11] BME680, https://github.com/pimoroni/bme680-python
[12] DSOX3024A Oscilloscope: 200 MHz, 4 Channels, https://tiny.pl/b-m1ykyt
[13] Enviro MicroPython firmware, Pimoroni, https://tiny.pl/dt49f

REKLAMA

Kurs programowania mikrokontrolerów Megawin

Na łamach „Elektroniki Praktycznej" publikujemy pierwszy na świecie kurs podstaw programowania interesujących, budżetowych mikrokontrolerów z rdzeniem ARM Cortex-M3 firmy Megawin.

ulubionykiosk.pl

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Lakierowanie ochronne płytek drukowanych

Parametry elektryczne nowo wytworzonych i oczyszczonych płytek drukowanych szybko ulegają pogorszeniu z powodu adsorpcji wilgoci atmosferycznej, zanieczyszczenia powierzchni jonowymi cząstkami powietrza, przyciągania kurzu przez powierzchnię, kondensacji pary itp. W celu uniknięcia tych problemów, płytki przeznaczone do bardziej wymagających aplikacji są często – w ostatnim stadium produkcji – pokrywane lakierami ochronnymi.

Lakierowanie ochronne (conformal coating) jest zazwyczaj wykonywane techniką zanurzania lub natrysku, zwykle warstwą lakieru o grubości 20...50 µm, choć silikony i niektóre specjalistyczne pokrycia osiągają grubość do 100 µm. W przypadku produkcji prototypowej i małoseryjnej pokrywanie może odbywać się przy użyciu pędzla.

Ochrona przed zanieczyszczeniem powierzchni PCB zmniejsza ryzyko korozji ścieżek i połączeń lutowniczych, a także redukuje wzrost dendrytów pomiędzy ścieżkami. Stosowanie powłok jest istotne szczególnie w zastosowaniach motoryzacyjnych, militarnych, lotniczych i przemysłowych, zwłaszcza w obszarach krytycznych pod względem bezpieczeństwa.

Należy jednak wspomnieć o ograniczeniach lakierowania ochronnego. Wszelkie zanieczyszczenia występujące na powierzchni przed lakierowaniem (odciski palców, pozostałości topnika i wilgoci oraz inne zanieczyszczenia chemiczne) zostaną uwięzione w wyniku tej operacji i mogą powodować długotrwałe problemy. Płytki przed lakierowaniem zawsze powinny być umyte i wysuszone, aby osiągnąć optymalne efekty. Mycie płytek przed lakierowaniem poprawi parametry i niezawodność ich działania nawet w przypadku używania topników typu „no-clean".

Lakierowanie ochronne nie jest zbyt efektywne przy zabezpieczaniu aplikacji narażonych na znaczny kontakt z wodą w stanie ciekłym (w odróżnieniu od pary wodnej), w szczególności gdy zawiera ona cząstki zjonizowane. W takich przypadkach wystąpi konieczność zabezpieczania płytek przez zalewanie i hermetyzację – takie operacje zawsze oferują dużo wyższy stopień zabezpieczenia niż w przypadku lakierowania. Zalewanie jest jednak zazwyczaj droższe od lakierowania i wiąże się ze zwiększeniem ciężaru PCBA.

Idealne pokrycie ochronne charakteryzuje się dobrymi własnościami elektrycznymi, małą przenikalnością wilgoci, dobrą odpornością chemiczną i wytrzymałością mechaniczną, a także wysoką przyczepnością do wszystkich materiałów używanych przy montażu płytek (tj. laminatu, maski lutowniczej, miedzi, lutowia i in.). W wielu aplikacjach istotne są własności termiczne, elastyczność zachowana w niskich temperaturach oraz utrzymanie parametrów mechanicznych w podwyższonych temperaturach.

Typowymi testami przeprowadzonymi na pokrytych lakierami płytkach są długoterminowe obciążenia termiczne w obecności wilgoci, odporność w komorze solnej i test na zachowanie przy cyklicznych zmianach termicznych oraz przy szoku termicznym. Tam, gdzie istnieje taka konieczność, mogą być również wykonane testy na odporność chemiczną i palność.

Idealny lakier ochronny pod względem technologicznym powinien być jednoskładnikowy (systemy dwuskładnikowe są niewygodne w użyciu), mieć długi czas przydatności, niską temperaturę utwardzania i krótki czas suszenia.

Więcej informacji:
Semicon Sp. z o.o.
04-761 Warszawa, ul. Zwoleńska 43/43A
https://www.semicon.com.pl
info@semicon.com.pl, tel. +48226158340

Można mówić o różnych czasach suszenia:

- **czas suchości dotykowej**, kiedy pokrycie nie pozostawia śladów przy dotyku,
- **czas suchości całkowitej**, kiedy rozpuszczalnik wyparował całkowicie na całej powierzchni pokrycia,
- **czas utwardzania**, kiedy pokrycie jest w pełni usieciowane.

Lepkość powinna być ponadto łatwo regulowalna. W systemach rozpuszczalnikowych duża zawartość suchej masy zmniejsza emisję rozpuszczalników i tym samym przyczynia się do poprawy ochrony środowiska.

Jednym z mankamentów powszechnie stosowanych płynnych lakierów ochronnych jest niedostateczne pokrywanie ostrych zakończeń lub krawędzi elementów – pokrycie w takich miejscach jest znacznie cieńsze lub nawet nie występuje wcale. Zjawisko to (powodowane niskim napięciem powierzchniowym lakieru) jest nazywane kolokwialnie łuszczeniem krawędziowym. Można je zminimalizować przez odpowiednie dobranie lepkości lakieru – także wielokrotne pokrywanie cienką warstwą daje lepsze efekty niż próba pokrycia jedną grubszą. Firma Electrolube opracowała specjalnie wypełniony lakier ochronny (DCRT) przeznaczony do pokryć o grubości około 100 µm, który lepiej pokrywa krawędzie w stosunku do płynnych lakierów powszechnie stosowanych.

Lakiery ochronne pod względem chemicznym można podzielić na kilka różnych typów.

- **Lakiery akrylowe** (np. Electrolube HPA i APL), składają się z akrylowych polimerów termoplastycznych rozpuszczonych w mieszaninie rozpuszczalników organicznych. Takie lakiery schną przez zwykłe odparowanie rozpuszczalnika (bez procesu sieciowania), miękną w podwyższonej temperaturze, ale także są łatwo usuwalne przez rozpuszczenie, co umożliwia naprawę płytek. Zwykle stosuje się szybkoschnące, niskowrzące rozpuszczalniki.

  Okres przydatności jest zazwyczaj bardzo długi, ponieważ odparowane rozpuszczalniki można łatwo uzupełnić do wymaganej lepkości. Niestety, rozpuszczalniki są palne, a dodatkowo tego rodzaju lakiery są pod ostrzałem krytyki z uwagi na coraz większe restrykcje legislacyjne odnośnie do emisji rozpuszczalników do atmosfery. Lakiery akrylowe wykazują odporność na wilgoć.
- **Lakiery epoksydowe** są bardzo twarde, najczęściej nieprzezroczyste i charakteryzują się doskonałą odpornością na wilgoć i chemikalia. Występują zazwyczaj jako systemy dwuskładnikowe, co czyni je mniej wygodnymi w stosowaniu w porównaniu do innych typów lakierów. Z uwagi na występujący proces sieciowania preparaty te są odporne na ścieranie i wytrzymałe mechanicznie, ale usunięcie ich z płytki po utwardzeniu jest prawie niemożliwe. Tym samym naprawa uszkodzonej płytki staje się sporym problemem.
- **Lakiery poliuretanowe** mają podobne własności do epoksydowych, ale są jeszcze bardziej odporne na ścieranie. Tu również wytrzymałość mechaniczna, odporność na wilgoć

eprasa.pl f9fe7f8d6b

i rozpuszczalniki jest bardzo dobra, ale usieciowana natura tych pokryć utrudnia ich usunięcie w celu naprawy płytek.

- **Lakiery silikonowe** obejmują szeroką gamę produktów o zróżnicowanych własnościach. Tradycyjne odmiany stanowią materiały zarówno bardzo odporne na ścieranie, jak i bardzo elastyczne, co wiąże się z niskimi naprężeniami występującymi na płytce i jej elementach. Utwardzanie tych lakierów następuje albo pod wpływem podwyższonej temperatury, albo w temperaturze pokojowej przy udziale wilgoci atmosferycznej.

Materiały silikonowo-alkidowe (np. Electrolube DCA) charakteryzują się doskonałymi własnościami mechanicznymi, elektrycznymi i chemicznymi, gdyż stopień usieciowania jest zwiększony przez ogrzewanie. Wszystkie materiały silikonowe mogą zwykle pracować w wyższych temperaturach niż inne rodzaje pokryć.

Istnieją też inne specjalistyczne rodzaje powłok PCBA. Lakiery UV mogą być utwardzane błyskawicznie poprzez ekspozycję na nadfiolet – tego rodzaju pokrycia są szeroko stosowane przy masowej produkcji płytek. Miejsca pod elementami zasłonięte od promieniowania UV utwardzają się wolniej, dając tak zwany „efekt cienia". Można go zminimalizować poprzez zmiany chemiczne umożliwiające także proces sieciowania termicznego lub pod wpływem wilgoci. Wtórne utwardzanie następuje wolniej w miejscach zacienionych. Własności materiałów utwardzanych światłem UV są jednak gorsze niż w przypadku materiałów rozpuszczalnikowych.

Pod wpływem protestów związanych z negatywnym wpływem rozpuszczalników na środowisko zostały opracowane i wdrożone lakiery na bazie wodnej. Mają one jednak tendencję do zbyt wolnego schnięcia, a pokrycia osiągają zbyt dużą grubość. Poza tym cechy chemiczne pokryć tego typu ograniczają ich zastosowanie.

W tym miejscu nie można nie wspomnieć o produkcie firmy 3M – Novec Electronic Coating EGC-1700, stanowiącym 2% roztwór fluoroakrylowego polimeru rozpuszczonego we fluorowodoroeterze. Jest on niepalny, niskotoksyczny i spełnia wysokie wymagania przemysłu elektronicznego w zakresie ochrony środowiska. Grubość powłoki przy powlekaniu przez zanurzenie wynosi tylko 1 μm. Lakier ten, tworząc powłokę o małej energii powierzchniowej, zapewnia doskonałą barierę wobec olejów węglowodorowych, silikonowych, płynów syntetycznych oraz roztworów wodnych i chroni skuteczniej niż powłoki polietylenowe i teflonowe.

Istnieje jeden bardzo specyficzny sposób lakierowania płytek, całkowicie różny od opisanych dotychczas. Jest to proces „parylenowy" opracowany przez firmę Union Carbide.

Związek di-p-ksylylen jest poddawany pirolizie w temperaturze około 650°C pod wysoką próżnią. Powstały monomer polimeryzuje na wszystkich powierzchniach obecnych w środowisku próżni, wytwarzając bardzo równomierną powłokę, pozbawioną jakichkolwiek miniporów. W ten sposób płytki zawierające ostre krawędzie są równo pokrywane, w przeciwieństwie do wszystkich innych wspomnianych wcześniej lakierów. Proces ten jest także bardzo efektywny przy pokrywaniu spodnich stron elementów na płytce, gdy występuje szczelina pomiędzy płytką i elementem. Lakierowanie „parylenowe" jest jednak bardzo drogie w porównaniu do metod konwencjonalnych. Możliwe są także chemiczne modyfikacje tego procesu, prowadzące do poprawy własności dielektrycznych albo – alternatywnie – do lepszej stabilności termicznej pokryć.

Ocena pokryć ochronnych podlega różnorodnym normom. Najważniejsze z nich to IEC 61086-1/2/3, IPC-CC-830 i UL 746 E. Norma IPC-CC-830 wywodzi się z MIL-I-46058 i obecnie ją zastępuje.

W tym miejscu należałoby przedyskutować niektóre z najważniejszych własności pokryć ochronnych, znajdujące się zazwyczaj w kartach technicznych. Norma **IEC 61086** rozróżnia trzy klasy pokryć ochronnych ze wzrastającymi wymogami oceny przydatności. **Klasa I** obejmuje pokrycia płytek ogólnego użytku, **klasa II** wysokiej niezawodności i **klasa III –** przeznaczone dla lotnictwa.

Napięcie przebicia to różnica potencjałów, przy której następuje przebicie elektryczne pomiędzy równoległymi ścieżkami przy znormalizowanej odległości na testowym wzorcu Y.

Opór izolacyjny to rezystancja pomiędzy dwiema elektrodami na znormalizowanym wzorcu testowym – elektrody stanowią przeplatany wzór grzebieniowy, którego zęby są podłączone naprzemiennie do elektrody dodatniej lub ujemnej. Wzór Y i wzór grzebieniowy występują zwykle łącznie na jednej płytce testowej.

Testy elastyczności pokryć przeprowadza się na polakierowanej blaszce miedzianej zaginanej wokół trzpienia 3 lub 6 mm i obserwacji pęknięć i rys pokrycia. **Testy podatności na pleśń** można przeprowadzać na polakierowanym panelu szklanym. **Testy palności** wykonuje się na polakierowanych, próbnych pałeczkach z materiału

REKLAMA

Chemia dla elektroniki

SEMICON®

ELECTROLUBE THE SOLUTIONS PEOPLE
KONTAKT CHEMIE
WACKER

– Środki do mycia PCB i szablonów SMT
– Ochrona mechaniczna i przewodzenie ciepła w elektronice
– Kleje silikonowe i uszczelniacze
– Preparaty czyszczące, smarujące i zabezpieczające
– Żywice poliuretanowe i epoksydowe do zalewania układów elektronicznych

Semicon Sp. z o.o.
ul. Zwoleńska 43/43a, 04–761 Warszawa | 22 615–73–71
zamowienia@semicon.com.pl info@semicon.com.pl

Innowacyjne produkty
Innowacyjne technologie

płytki, których końce wprowadza się do znormalizowanego płomienia. Czas palności po usunięciu płomienia stanowi kryterium dopuszczalności – w ten sposób określa się także maksymalną dopuszczalną odległość wędrówki płomienia.

Przy użyciu pokrytych płytek z wzorami Y i grzebieniowymi można wykonać jeszcze wiele innych testów, mających znaczenie dla ochrony środowiska. Obejmuje to np. **cykliczne obciążenia termiczne** i **testy na szok termiczny** pomiędzy wyspecyfikowanymi temperaturami – kolejno po każdym teście stwierdza się, czy wystąpiły złuszczenia lub rozwarstwienia pokrycia lakierowego. Przeprowadza się także **testy cieplno-wilgotnościowe**: kolejne opory izolacyjne muszą być większe niż 10^9 Ω, a napięcie przebicia jest także rejestrowane.

W przypadku klasy II przeprowadza się **test we mgle solnej**, a dla klasy III – **testy na mróz, niskie ciśnienie atmosferyczne** i **badania cieplno-wilgotnościowe**.

W kartach technicznych dla lakierów ochronnych występują także inne własności elektryczne.

Wytrzymałość dielektryczna to napięcie, przy którym następuje przebicie elektryczne powłoki lakierniczej. W katalogach podaje się także **oporność objętościową** i **powierzchniową**, **stałą dielektryczną** i **współczynnik stratności dielektrycznej**. Niska stała dielektryczna materiału lakierniczego jest istotna przy lakierowaniu układów RF, bowiem zbyt wysoka jej wartość może powodować efekt pasożytniczej pojemności pomiędzy ścieżkami powierzchniowymi, które biegną równolegle i blisko siebie – to zaś prowadzi do zmiany charakterystyki częstotliwościowej obwodu. **Odporność na prądy pełzające (CTI)** to przybliżona miara podatności powłoki na uszkodzenia w wyniku korozji elektrycznej występującej wtedy, gdy wysokie napięcie powoduje rozkład powłoki i wytworzenie ścieżki przewodzącego węgla.

Metody i urządzenia do aplikacji lakierów ochronnych

W metodzie pokrywania lakierem poprzez zanurzanie istotna jest szybkość wyjmowania elementów z kąpieli, wpływająca na grubość powłoki – im wolniejsze wyjmowanie, tym cieńsza jest warstwa pokrycia. Grubość pokrycia jest także regulowana innymi czynnikami – lepkością, zawartością suchej masy i temperaturą roztworu lakieru. Płytki zanurza się zwykle pionowo, ale istnieją zaawansowane urządzenia odchylające płytki w różnym stopniu od pionu celem osiągnięcia wymaganej grubości pokrycia. Zazwyczaj na płytce znajdują się miejsca (np. punkty kontaktowe czy złącza), które nie powinny być lakierowane – jeżeli umiejscowione są one poniżej poziomu zanurzenia, konieczne okazuje się maskowanie płytki taśmą albo zrywalną maską – jest to jednak kosztowna i czasochłonna operacja.

W ostatnich latach nastąpił szybki rozwój zrobotyzowanych urządzeń natryskowych, umożliwiających lakierowanie selektywne płytek bez konieczności maskowania. Kombinacja stosowania takich urządzeń z liniami UV i IR zapewnia dużą szybkość produkcji.

Jak wygląda przyszłość techniki lakierowania ochronnego? Obecnie trudno jest porównywać stosowanie tradycyjnych lakierów rozpuszczalnikowych z nowymi technologiami. Oczekuje się zwiększonych nacisków ze strony obrońców środowiska naturalnego w celu redukcji uwalniania rozpuszczalników organicznych do atmosfery, mających negatywny wpływ na globalne ocieplenie i zanieczyszczenie atmosfery. Naciski takie wymuszą zwiększenie środków na odzysk i zagospodarowanie uwalnianych rozpuszczalników, ale także dalszy rozwój lakierów UV i na bazie wodnej – tak, aby dorównywały one jakością tradycyjnym lakierom rozpuszczalnikowym. Konieczne jest także podjęcie dalszych kroków w kierunku rozwoju lakierów o wysokiej zawartości substancji stałych, a nawet całkowicie bezrozpuszczalnikowych.

Wybrane powłoki stosowane w produkcji elektroniki

Kontakt 60 to podstawowy preparat do czyszczenia styków, dostępny w postaci aerozolu. Można używać go z preparatami konserwującymi.

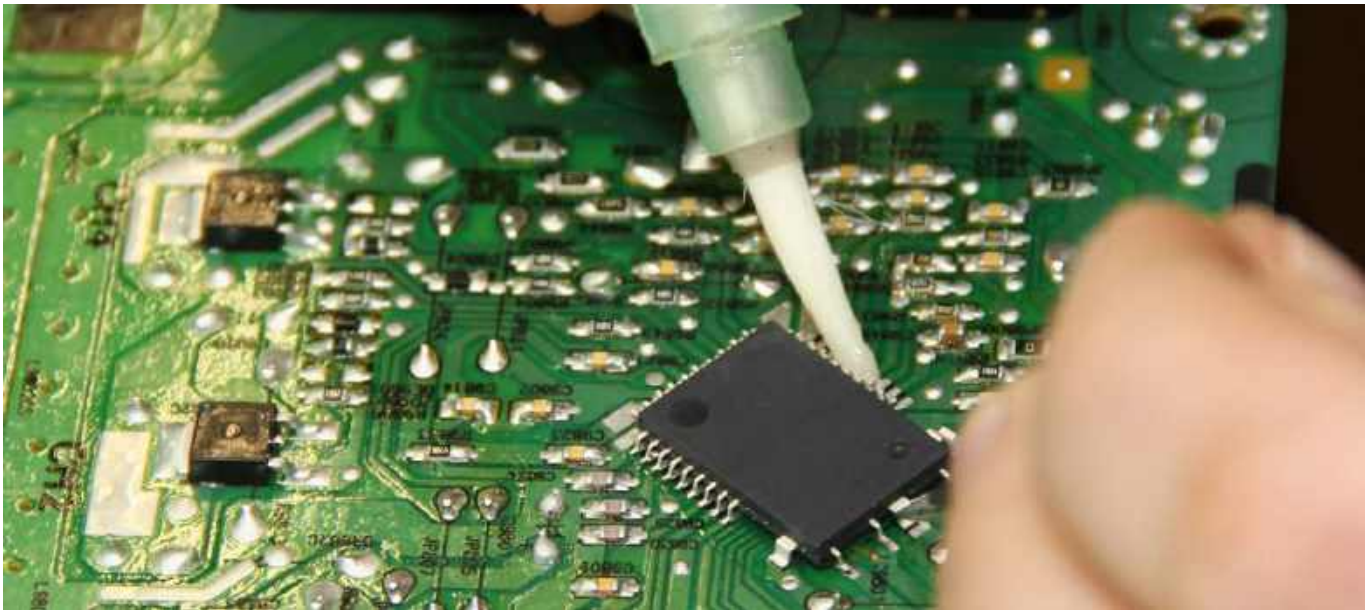
Kontakt PCC – najpopularniejszy środek do ręcznego, selektywnego mycia płytek, dostępny w puszce ze specjalnym aplikatorem.

Electrolube DCA – lakier do płytek oparty na alkydach silikonowych. Oferuje wysoką odporność na przebicia, a zróżnicowane sposoby utwardzania powodują, że nadaje się do aplikacji obwarowanych rozmaitymi normami branżowymi.

Electrolube AFA – bardzo popularny (także w Polsce) lakier akrylowy do płytek PCB. Stanowi stabilny zamiennik powłoki Plastik 70.

EMI 35 – metaliczna powłoka chroniąca przed zakłóceniami elektromagnetycznymi, dostępna w aerozolu oraz w postaci ciekłej (w puszkach 1-litrowych).

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Chemia w warsztacie elektronicznym: czyszczenie, lutowanie i nie tylko

Każdy elektronik w swoim warsztacie potrzebuje sporo „chemii" – preparatów do czyszczenia, klejów, topników itp. Ogromna część z nich to podstawowe materiały potrzebne do lutowania lub mycia PCB po montażu. Bez nich w zasadzie żadne prace związane z elektroniką nie byłyby wykonalne. Istnieją jednak preparaty stosowane nieco rzadziej – np. kleje przewodzące czy lakiery konformalne, a nie bez znaczenia jest też grupa bardzo niszowych materiałów, które – jakkolwiek używane są w bardzo wąskiej grupie zastosowań – okazują się nieocenione (np. przewodzące silikony do wykonywania uszczelek typu form-in-place).

W poniższym artykule opiszemy trzy grupy materiałów stosowanych w warsztacie elektronicznym. Pierwszą z nich stanowią wszelkie preparaty do czyszczenia i mycia płytek drukowanych, elementów, a także złączy czy przełączników (doskonale znane każdemu serwisantowi starszego sprzętu). Do drugiej grupy zaliczają się materiały używane do lutowania, a w trzeciej umieszczono wszelkie inne preparaty, które mogą się przydać elektronikowi.

W artykule intencjonalnie pominięto szeroką grupę materiałów używanych przy produkcji PCB, takich jak różnego rodzaju żywice, środki do trawienia i materiały do elektrolitycznej metalizacji. Jakkolwiek część z nich (jeśli nie wszystkie) mogą znaleźć się w warsztacie elektronika, to ich zastosowanie ogranicza się praktycznie tylko do prototypowego wytwarzania PCB. Ponadto większość z tych materiałów opisywano już wcześniej w artykułach poświęconych produkcji płytek drukowanych.

Czyszczenie

Niezależnie od tego, czy mamy do czynienia z serwisem urządzenia, które stało w zakurzonym kącie przez 10 lat, czy też z nową PCB prosto z fabryki, pierwszym krokiem przed dalszymi pracami powinno być wyczyszczenie naszego pola pracy. W przypadku „świeżych" płytek – pomimo, że najczęściej są one fabrycznie czyszczone i hermetycznie zapakowane – umycie ich przed montażem może pozwolić nam uniknąć przykrych niespodzianek (np. pokrycia płytki resztkami oleju lub pozostałościami po którymś z procesów produkcyjnych, co utrudni lutowanie). Jeśli chodzi o urządzenia serwisowane… spójrzmy na **fotografię 1** i zastanówmy się – czy chcemy pracować z tak brudnym urządzeniem? Nie mówiąc już o tym, co stanie się z kurzem, gdy zaczniemy cokolwiek lutować lub dmuchać na PCB za pomocą lutownicy hot-air.

Fotografia 1. Zakurzony komputer wymagający wyczyszczenia lub umycia przed rozpoczęciem prac serwisowych (źródło: Timo Newton-Syms)

Kluczowym wyzwaniem w czyszczeniu elementów elektronicznych jest konieczność stosowania substancji, które są jednocześnie skuteczne w usuwaniu brudu, kurzu, tłuszczu czy różnorakich osadów, a z drugiej strony są na tyle delikatne, że nie uszkadzają komponentów, nie powodują korozji ani nie pozostawiają po sobie przewodzących pozostałości. Środki te często są dobierane w taki sposób,

eprasa.pl f9fe7f8d6b

aby szybko odparowywały i nie pozostawiały osadów, które mogłyby wpłynąć na funkcjonowanie urządzenia.

Jednym z najczęściej używanych środków czyszczących są alkohole techniczne: izopropanol (IPA), etanol lub jego mieszanka z metanolem (rzadziej także inne alkohole), które sprawdzają się w czyszczeniu zarówno obwodów drukowanych, jak i złączy czy niektórych sensorów. Ich główną zaletą jest doskonała zdolność do rozpuszczania tłuszczów i zanieczyszczeń organicznych, przy jednoczesnym zachowaniu w stanie nienaruszonym większości materiałów używanych w elektronice (takich jak niektóre tworzywa sztuczne, metale czy warstwy ochronne laminatów).

Należy pamiętać, że izopropanol (IPA) i etanol różnią się zarówno pod względem chemicznym, jak i aplikacyjnym. Oba mają wysoką zdolność do rozpuszczania tłuszczów czy zanieczyszczeń organicznych, ale ich właściwości oraz skuteczność w czyszczeniu różnią się, co sprawia, że są używane w różnych sytuacjach i do różnych celów.

Izopropanol (alkohol izopropylowy, C_3H_8O) jest częściej stosowany w elektronice niż etanol. Jego główną zaletę stanowi wyższa skuteczność w rozpuszczaniu tłustych zanieczyszczeń i substancji organicznych, co czyni go szczególnie przydatnym do czyszczenia obwodów drukowanych, złączy oraz innych powierzchni wymagających precyzji. Izopropanol ma również większą lotność (a dokładniej – prężność par) niż etanol, co oznacza, że szybciej odparowuje, pozostawiając powierzchnie czyste i suche bez ryzyka powstawania osadu. Z powodu niskiego poziomu przewodnictwa elektrycznego izopropanol jest idealny do stosowania w sytuacjach, gdy istnieje ryzyko zwarcia lub uszkodzenia wrażliwych układów. Oczywiście nie oznacza to, że można nim czyścić układy pozostające pod napięciem.

Etanol (alkohol etylowy, C_2H_6O), choć również stosowany w elektronice, ma pewne ograniczenia w porównaniu do IPA. Jego zdolność do rozpuszczania tłuszczów i zanieczyszczeń organicznych jest nieco mniejsza, co sprawia, że jest mniej skuteczny w przypadku bardzo zabrudzonych powierzchni. Etanol również odparowuje wolniej niż izopropanol, co może prowadzić do powstawania plam. Ważnym aspektem jest wyższa higroskopijność etanolu, czyli silniejsza tendencja do absorbowania wilgoci z powietrza. Może to być problematyczne w sytuacjach, gdzie nawet niewielka ilość wilgoci mogłaby wpłynąć na działanie elementów elektronicznych czy prowadzić do korozji.

Pod względem czystości izopropanol jest często dostępny w wyższych stężeniach, takich jak 99,9%, co jest szczególnie istotne w zastosowaniach elektronicznych, gdzie wszelkie pozostałości po czyszczeniu mogą prowadzić do zakłóceń funkcjonalnych. Etanol dostępny w sprzedaży ma stężenie 96% i zawiera domieszkę wody, co w niektórych zastosowaniach jest problematyczne. Dodatkowo, etanol techniczny często bywa – intencjonalnie – skażany innymi środkami. W zależności od tego, co jest dodatkiem, może mieć on ograniczone stosowanie do mycia układów elektronicznych itp.

Mimo tych różnic, etanol może być stosowany w elektronice w sytuacjach, gdy izopropanol nie jest dostępny lub gdy wymagane jest czyszczenie elementów, które nie są szczególnie podatne na działanie wilgoci czy osadów. Jednak ze względu na większą wszechstronność i bezpieczeństwo, izopropanol pozostaje preferowanym wyborem w serwisach elektronicznych i zastosowaniach profesjonalnych. Oba alkohole, jeśli są stosowane prawidłowo i w odpowiednich warunkach, mogą efektywnie czyścić urządzenia elektroniczne, choć różnice w ich właściwościach chemicznych i praktycznych zastosowaniach sprawiają, że każdy z nich jest lepiej dostosowany do określonych zadań.

Rozpuszczalniki organiczne, takie jak aceton, nafta, toluen czy heksan, również znajdują zastosowanie w czyszczeniu elektroniki, chociaż są używane bardziej selektywnie w porównaniu do alkoholi. Wynika to z ich specyficznych właściwości chemicznych – z jednej strony mogą być bardzo skuteczne w usuwaniu niektórych zanieczyszczeń, ale z drugiej strony wiążą się z pewnymi ograniczeniami, takimi jak ryzyko uszkodzenia delikatnych materiałów czy toksyczność. Ich zastosowanie wymaga pewnej wiedzy i ostrożności.

Aceton (C_3H_6O) jest jednym z najskuteczniejszych rozpuszczalników organicznych, szeroko stosowanym w przemyśle (także w elektronice), choć z pewnymi zastrzeżeniami. Charakteryzuje się bardzo wysoką zdolnością do rozpuszczania szerokiego spektrum substancji, w tym klejów, lakierów, tłuszczów i zanieczyszczeń organicznych. Z tego powodu jest używany do usuwania uporczywych zabrudzeń, takich jak resztki kleju czy niektóre uszczelnienia. Aceton odparowuje niezwykle szybko i nie pozostawia osadów, co czyni go atrakcyjnym wyborem w przypadkach, gdy wymagana jest szybkość, jednak jego wysoka agresywność sprawia, że może uszkodzić wiele tworzyw sztucznych, gum czy powłok ochronnych stosowanych w elektronice. Z uwagi na to zastosowanie acetonu ogranicza się zazwyczaj do czyszczenia elementów metalowych, szklanych lub innych powierzchni odpornych na jego działanie.

Nafta, często w formie oczyszczonej (np. jako benzyna ekstrakcyjna), jest kolejnym rozpuszczalnikiem dosyć często stosowanym w elektronice, szczególnie do usuwania tłuszczów, olejów i smarów. Nafta ma znacznie łagodniejsze działanie chemiczne niż aceton, co sprawia, że jest bezpieczniejsza dla czyszczonych elementów. Jednakże jej wolniejsze odparowywanie w porównaniu do alkoholi czy acetonu może być problematyczne, zwłaszcza w przypadkach, gdy pozostałości rozpuszczalnika mogłyby wpłynąć na działanie urządzenia. Z tego względu nafta jest częściej stosowana w konserwacji elementów mechanicznych urządzeń, takich jak wentylatory, niż w bezpośrednim czyszczeniu delikatnych obwodów elektronicznych.

Toluen ($C_6H_5CH_3$) to rozpuszczalnik o bardzo silnym działaniu, zdolny do rozpuszczania wielu trudnych zanieczyszczeń, w tym niektórych klejów, lakierów czy gum. Jego zastosowanie w elektronice jest ograniczone ze względu na szkodliwość dla zdrowia, intensywny zapach i potencjalnie szkodliwy wpływ na materiały plastikowe i inne delikatne elementy. Stosuje się go głównie w sytuacjach, gdzie konieczne jest usunięcie trwałych zabrudzeń, których inne środki nie są w stanie rozpuścić, na przykład w serwisach zajmujących się regeneracją starych urządzeń. Toluen wymaga szczególnej ostrożności w użyciu, w tym zapewnienia odpowiedniej wentylacji i środków ochrony osobistej (ochrony dróg oddechowych np. maską z odpowiednim filtropochłaniaczem).

Heksan (C_6H_{14}) jest mniej agresywnym rozpuszczalnikiem organicznym, który znajduje zastosowanie w czyszczeniu delikatnych elementów elektronicznych, szczególnie w sytuacjach wymagających usuwania tłuszczów i lekkich zanieczyszczeń. Heksan odparowuje stosunkowo wolno, ale jego łagodność chemiczna czyni go bezpiecznym dla wielu materiałów, takich jak plastiki, gumy i laminaty. Jest używany głównie w fabrykach do zmywania np. pozostałości topnika, rzadziej stosuje się go w warsztacie elektronicznym.

Każdy z tych rozpuszczalników ma swoje miejsce w konserwacji i czyszczeniu elektroniki, jednak ich wybór powinien być podyktowany konkretnymi zadaniami. Czynniki takie jak rodzaj zanieczyszczenia, materiał czyszczonego elementu, a także bezpieczeństwo użytkowania mają kluczowe znaczenie przy podejmowaniu decyzji. W większości wypadków do umycia naszych urządzeń wystarczający jest IPA.

Należy pamiętać, że etanol, izopropanol i inne rozpuszczalniki organiczne są palne. Zwłaszcza ich pary mogą ulec zapłonowi, co oznacza, że należy ostrożnie używać ich w warsztacie, gdzie znajduje się wiele gorących elementów czy też łatwo o iskrę. Większość z tych preparatów charakteryzuje się temperaturami zapłonu poniżej temperatury pokojowej (!) – wystarczy zatem tylko niewielka

eprasa.pl f9fe7f8d6b

iskra, by doszło do wypadku. Dodatkowo alkohole i wiele innych substancji organicznych pali się płomieniami, które nie są łatwo widoczne, co dodatkowo pogarsza sytuację w przypadku ich zapłonu.

Kolejną grupą środków czyszczących, które można zaliczyć do warsztatowej chemii, są sprężone gazy czy specjalne preparaty w formie aerozolu, które pomagają w usuwaniu kurzu, pyłu czy drobnych zanieczyszczeń mechanicznych z trudno dostępnych miejsc. Te produkty są szczególnie przydatne w czyszczeniu klawiatur, wentylatorów, radiatorów czy wnętrza obudowy komputera. Często stosowane są w połączeniu z antystatycznymi szczotkami, które zapobiegają gromadzeniu się ładunków elektrostatycznych, mogących uszkodzić wrażliwe elementy elektroniczne. Dodatkowo niektóre środki tego typu zawierają składniki zapobiegające osadzaniu się kurzu w przyszłości.

Puszki ze „sprężonym powietrzem" do czyszczenia elektroniki zazwyczaj nie zawierają faktycznego powietrza atmosferycznego, lecz specjalne gazy, które są łatwiejsze do sprężenia i bezpieczne w użyciu. Powietrze składa się głównie z azotu (78%) i tlenu (21%), ale jego sprężenie i przechowywanie w puszkach jest technicznie trudne i – co za tym idzie – kosztowne. Zamiast tego w owych puszkach znajdują się najczęściej skroplone lub sprężone gazy z grupy gazów fluorowanych lub węglowodorowych.

Do typowych gazów stosowanych do czyszczenia należą 1,1-difluoroetan (HFC-152a) oraz 1,1,1,2-tetrafluoroetan (HFC-134a). Mają one podobne właściwości. Są to bezbarwne, nietoksyczne i łatwo sprężalne gazy. Po uwolnieniu z puszki szybko odparowują. Oryginalnie gazy te są używane jako gazy chłodnicze w systemach klimatyzacji. HFC-152a jest tańszy w produkcji i w związku z tym częściej stosowany. W normalnych warunkach gazy te nie są palne, ale w wysokich stężeniach i przy obecności iskry może dojść do zapłonu.

Rzadziej stosuje się butan lub izobutan – substancje podobne do ww., ale – z uwagi na ich łatwopalność – mniej bezpieczne w użyciu. Mogą one zapalić się lub nawet doprowadzić do wybuchu w przypadku nieostrożnego użytkowania. W pewnych wąskich zastosowaniach stosuje się sprężony dwutlenek węgla (CO_2). Jest on całkowicie niepalny i relatywnie przyjazny dla środowiska, ale może osiągać bardzo niskie temperatury po ekspansji, co stwarza ryzyko uszkodzenia delikatnych komponentów elektronicznych. Dodatkowo jeśli pracujemy w słabo wentylowanym pomieszczeniu, podwyższony poziom CO_2 może prowadzić do pogorszenia samopoczucia, senności czy nawet utraty przytomności.

Należy pamiętać, że puszki trzeba trzymać w pozycji pionowej podczas użytkowania, aby uniknąć wypływu ciekłego gazu, który może powodować miejscowe odmrożenia lub uszkodzenia delikatnych powierzchni. Jeśli mamy taką możliwość, puszki z gazem do czyszczenia elektroniki zastąpić można sprężonym powietrzem z kompresora lub nawet azotem z butli, jeżeli wymagana jest duża czystość – powietrze z typowej sprężarki zawierać może zanieczyszczenia w postaci smarów lub wilgoci.

Do bardziej wymagających zastosowań, takich jak czyszczenie złączy czy kontaktów elektrycznych, używa się specjalistycznych preparatów. Są to substancje, które nie tylko usuwają zabrudzenia, ale również poprawiają przewodnictwo elektryczne oraz np. chronią powierzchnię przed korozją czy też powstawaniem warstwy pasywacji, zwiększającej rezystancję styku. Takie środki są często wzbogacane o dodatki smarne lub ochronne, które zabezpieczają elementy przed działaniem wilgoci czy dalszym utlenianiem.

W przypadku urządzeń przemysłowych oraz w zaawansowanej elektronice stosuje się ultradźwiękowe kąpiele czyszczące. Są to metody, w których specjalne płyny czyszczące, o odpowiednio dobranych składach chemicznych, działają w połączeniu z falami ultradźwiękowymi. Technologia ta pozwala na usunięcie uporczywych zanieczyszczeń. Płyny stosowane w ultradźwiękowych myjkach są tak skomponowane, aby były neutralne dla lutów, klejów czy powłok ochronnych. Stosować tam można również inne preparaty, takie jak IPA.

Użycie środków czyszczących w elektronice ma na celu nie tylko utrzymanie urządzeń w dobrym stanie wizualnym, ale przede wszystkim zapewnienie ich niezawodności i trwałości. Zanieczyszczenia mogą prowadzić do przegrzewania się elementów, zmniejszenia przewodności lub całkowitej awarii. Regularna konserwacja, przy użyciu odpowiednich środków, pozwala uniknąć kosztownych napraw i przedłużyć żywotność sprzętu, co jest kluczowe zarówno w zastosowaniach domowych, jak i profesjonalnych. Właściwy dobór preparatów czyszczących, dostosowanych do specyfiki urządzeń, jest więc nieodzowny w nowoczesnej elektronice.

Lutowanie

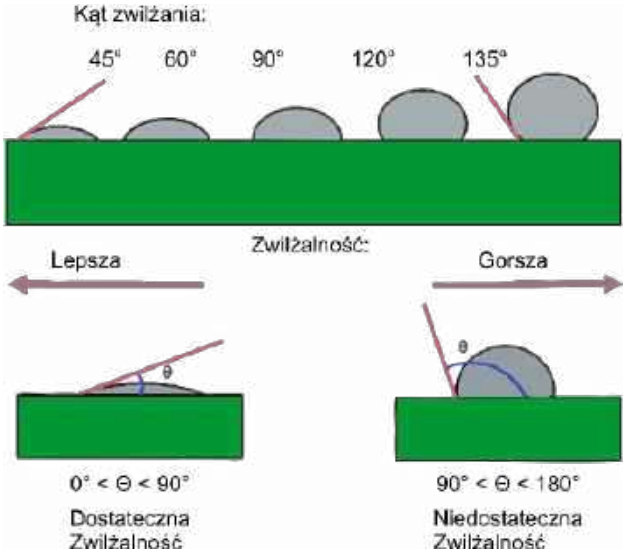
Nieodłączny element procesu lutowania to stosowanie chemii lutowniczej, której zadaniem jest zapewnienie czystości i trwałości połączeń. Topniki – stanowiące jedną z podstawowych grup „elektronicznych" chemikaliów – usuwają tlenki i inne zanieczyszczenia z powierzchni metalu, co zwiększa przyczepność lutowia i zapewnia dobrą jakość połączenia. W zależności od rodzaju i docelowego przeznaczenia stosuje się różne rodzaje topników, od organicznych i nieorganicznych, aż po syntetyczne mieszanki o specjalistycznych właściwościach. Nie mniej ważne są również spoiwa – typowo stosuje się tutaj cynę w formie różnych stopów, a także bardziej złożonych preparatów, takich jak pasty lutownicze. Ponadto w procesie lutowania kluczowe jest odpowiednie przygotowanie powierzchni, do czego wykorzystuje się preparaty czyszczące i odtłuszczające, opisane w pierwszej części artykułu.

Chemia lutownicza, choć często niedoceniana, odgrywa fundamentalną rolę w zapewnieniu precyzyjnego, trwałego i niezawodnego łączenia elementów w nowoczesnej elektronice.

Topniki

Topniki są nieodłącznym elementem procesu lutowania, nie tylko w elektronice. Zadaniem topników, jak sama nazwa wskazuje, jest wspomaganie topnienia spoiwa, a w konsekwencji – ułatwienie tworzenia trwałych i dobrze przewodzących połączeń pomiędzy elementami. Główną metodą działania opisywanych substancji jest usuwanie tlenków i zanieczyszczeń z lutowanych powierzchni, co zapewnia lepszą zwilżalność metalu przez roztopione lutowie i zwiększa siłę oraz jakość połączenia.

Zwilżalność danego materiału to zdolność stopu lutowniczego do rozprzestrzeniania się na jego powierzchni. Jest to kluczowy parametr w procesie lutowania, ponieważ dobra zwilżalność



Rysunek 1. Kropla cyny (szary kolor) na powierzchni lutowanej (zielony kolor). Pokazano kształt kropli dla różnych kątów zwilżania

eprasa.pl f9fe7f8d6b

(kąt zwilżania poniżej 90°) zapewnia trwałe i przewodzące połączenie między elementami. Zwilżalność zależy od właściwości powierzchni materiału (np. czystości, chropowatości, składu chemicznego) oraz od właściwości samego stopu lutowniczego i zastosowanego topnika. Schematycznie zwilżalność oraz kąt zwilżania pokazano na **rysunku 1**.

Zwilżalność jest definiowana przez kąt zwilżania, który powstaje między powierzchnią materiału a kroplą roztopionego lutowia (patrz **fotografia 2**). Jeśli kąt zwilżania jest mały (poniżej 90°), mówi się, że materiał ma dobrą zwilżalność, co oznacza, że lutowie rozprzestrzenia się na powierzchni, tworząc cienką warstwę. Gdy kąt zwilżania jest duży (powyżej 90°), materiał ma słabą zwilżalność – lutowie pozostaje w formie kropli, nie tworząc odpowiedniego połączenia. Topnik i odpowiednie przygotowanie (oczyszczenie – chemiczne lub mechaniczne) powierzchni to gwarancja powstania wysokiej jakości spoiny. Jeśli zaniedbamy któryś z tych elementów, możemy doprowadzić do powstania tzw. zimnego lutu.

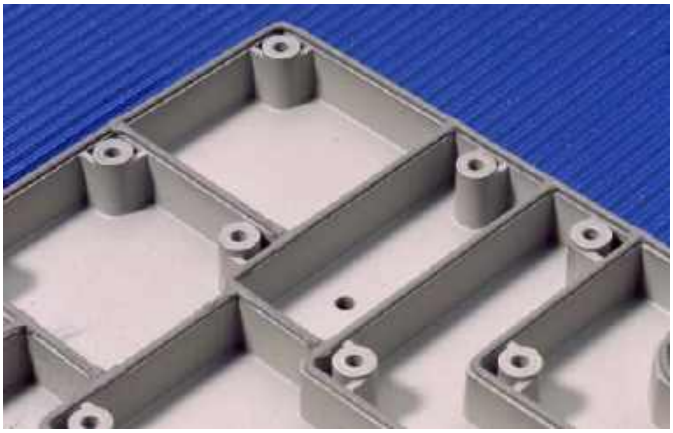
Topniki występują w różnych formach, takich jak pasty, żele, ciecze, a także jako element – rdzeń – drutu lutowniczego (o czym piszemy dokładniej w kolejnej sekcji). Wybór odpowiedniego rodzaju topnika zależy od specyfiki lutowanego elementu, zastosowanego stopu i warunków procesu lutowania.

Ważne właściwości topnika to jego aktywność chemiczna, zdolność do odparowywania bez pozostawiania osadów i zgodność z lutowanymi materiałami. Zastosowanie niewłaściwego topnika może skutkować korozją wyprowadzeń lub ścieżek na PCB, niedostatecznym zwilżeniem lutowanych elementów przez cynę lub pozostawieniem niebezpiecznych dla układu osadów.

Topniki podzielić można na kilka grup w zależności od składu i zastosowania. Najstarszymi topnikami są te oparte na kalafonii, pochodzącej z naturalnej żywicy sosnowej. Są one jednymi z najczęściej używanych w elektronice, ponieważ dobrze radzą sobie z usuwaniem tlenków i są stosunkowo bezpieczne dla komponentów. Dodatkowo kalafonia, jako mało przetworzona substancja pochodzenia naturalnego, jest relatywnie bezpieczna dla środowiska, jak i użytkowników, aczkolwiek – jako substancja pochodzenia roślinnego – może powodować reakcję alergiczną.

Istnieją także bardziej agresywne topniki: oparte na kwasach lub substancjach nieorganicznych. Są one używane głównie w lutowaniu przemysłowym lub tam, gdzie wymagane jest usunięcie trudnych zanieczyszczeń. Z uwagi na fakt, że tego rodzaju topniki są trudne w stosowaniu ze względu na ich wysoką reaktywność, rzadko spotyka się je w warsztacie elektronicznym. Przy pracy z bardziej agresywnymi topnikami trzeba zachować szczególną ostrożność i stosować dodatkowe zabezpieczenia – nie tylko rękawiczki, ale również ochronę górnych dróg oddechowych (w postaci maski z odpowiednim filtropochłaniaczem). Dodatkowo często konieczne może być zastosowanie ochrony dla wrażliwszych elementów urządzenia elektronicznego.

We współczesnej elektronice najczęściej stosuje się topniki syntetyczne lub mieszaniny oparte na związkach organicznych. Tego rodzaju substancje oferują lepsze parametry lutowania, a jednocześnie zwiększają czystość procesu. Istnieje szeroka gama topników różniących się składem – głównie rodzajem i ilością użytego w topniku aktywatora. Topniki RMA (Rosin Mildly Activated) bazują na syntetycznych odpowiednikach żywic naturalnych (kalafonii) w połączeniu z łagodnymi aktywatorami chemicznymi, które pomagają usuwać tlenki z powierzchni metali. Pozostałości po tych topnikach są dość obojętne w porównaniu z agresywnymi topnikami opartymi na kwasach, ale w większości aplikacji i tak wskazane jest czyszczenie PCB po lutowaniu. Topniki RMA stosowane są głównie w sytuacjach, w których wymaga się umiarkowanej aktywności chemicznej i jednocześnie wysokiej niezawodności połączeń. Topniki wodnorozpuszczalne oparte są na syntetycznych kwasach organicznych i polimerach, które można łatwo usunąć



Fotografia 2. Uszczelka form-in-place (FIP)

wodą. Mają dużą aktywność, co czyni je idealnymi do lutowania trudnych do zwilżenia powierzchni, takich jak mocno utlenione metale. Wymagają one jednak dokładnego mycia po lutowaniu, co ogranicza ich użycie w aplikacjach, gdzie czyszczenie jest trudne lub niemożliwe do przeprowadzenia. I wreszcie topniki o wysokiej aktywności (RA – Rosin Activated) charakteryzują się większą zawartością syntetycznych aktywatorów chemicznych, co zapewnia dużą skuteczność w usuwaniu tlenków z trudnych do oczyszczenia powierzchni, jednakże konsekwencją tego jest fakt, że pozostałości topników RA powodować mogą korozję, jeśli płytki po lutowaniu nie zostaną odpowiednio umyte. Z tego względu opisywane preparaty stosowane są na ogół w serwisach, w aplikacjach wymagających intensywnego oczyszczania lutowanych powierzchni, np. przy naprawie starszego sprzętu.

Przy doborze topnika należy zwrócić uwagę na jego specyfikację chemiczną, kompatybilność z lutowanymi materiałami oraz wymagania dotyczące późniejszego czyszczenia. Jedną z pułapek jest stosowanie zbyt agresywnych topników („żeby mieć pewność"), które mogą uszkodzić delikatne elementy elektroniczne czy cienkie ścieżki na PCB. Innym błędem jest używanie nadmiarowej ilości topnika, co może prowadzić do powstawania trudnych do usunięcia pozostałości – te zaś, w niektórych wypadkach, mogą pogarszać izolację na PCB czy też powodować nadmiarową upływność na płytce.

Osobną grupą (pod względem funkcjonalnym, a nie z uwagi na skład chemiczny) są tzw. topniki no-clean. Zawierają one mieszanki syntetycznych żywic i substancji aktywnych, które po lutowaniu pozostawiają po sobie jedynie minimalne ilości neutralnych pozostałości. Są współcześnie najczęściej stosowanymi topnikami w elektronice konsumenckiej i przemysłowej, gdzie kluczowe jest uproszczenie procesu produkcyjnego poprzez eliminację etapu czyszczenia. W zasadzie większość dostępnych obecnie topników stosowanych w niewielkich warsztatach elektronicznych to topniki no-clean.

Topniki no-clean są powszechnie stosowane w urządzeniach konsumenckich, takich jak komputery, telefony czy sprzęt AGD. Jednakże nie sprawdzą się one we wszystkich zastosowaniach. W gałęziach elektroniki, gdzie wymagana jest wysoka czystość i/lub niezawodność, takich jak technologie kosmiczne, medyczne czy wojskowe, pozostałości topnika – nawet jeśli są obojętne chemicznie – mogą stanowić problem. Już minimalne ilości osadów wpływają na właściwości dielektryczne lub przewodzące, co jest niedopuszczalne w precyzyjnych urządzeniach (np. w układach do pomiarów niewielkich prądów, których działanie może być zaburzone upływnością przez dielektryk PCB czy soldermaskę). W takich przypadkach stosuje się zaawansowane metody oczyszczania PCB, bazujące na odpowiednich rozpuszczalnikach i myjkach ultradźwiękowych, które opisano we wcześniejszej części artykułu.

Podsumowując – dobór odpowiedniego topnika wymaga zrozumienia specyfiki lutowanego urządzenia oraz warunków, w jakich

eprasa.pl f9fe7f8d6b

będzie ono pracować. Chociaż topniki no-clean stanowią wygodną opcję w większości przypadków (i dlatego są tak chętnie wybierane), istnieją sytuacje, w których ich użycie może nie być wskazane. Świadome podejście do tej kwestii pozwala uniknąć problemów i zapewnić trwałość oraz bezpieczeństwo połączeń lutowanych w produkowanym bądź serwisowanym systemie.

Spoiwa

Drugim elementem układanki pod nazwą „połączenie lutowane" jest spoiwo – metal, który roztapiany będzie w tym procesie i zwilży lutowane powierzchnie. Lutowia (spoiwa lutownicze) składają się w przeważającej większości ze stopów metali, charakteryzujących się niską temperaturą topnienia, dobrą zwilżalnością i zdolnością do tworzenia trwałych połączeń. Lutowia występują w rozmaitych formach i mają zróżnicowane właściwości, co pozwala na ich dostosowanie do specyficznych zastosowań. W elektronice podstawowym metalem, z jakiego sporządzane są te stopy, jest w ogromnej większości przypadków cyna.

Spoiwo dostępne jest w wielu formach. Najczęściej stosowaną stanowią lutowia w postaci drutu. Zawiera on rdzeń w postaci topnika, co ułatwia proces lutowania. Spoiwa drutowe są dostępne w różnych średnicach, w zależności od wymagań aplikacji (np. wielkości lutowanych elementów). Równie często stosuje się pasty lutownicze – mieszanki drobno zmielonego proszku lutowniczego (metalicznego lutowia) i płynnego topnika. Pasty są używane głównie w procesach montażu powierzchniowego (SMT) – aplikowane za pomocą sitodruku lub specjalnych dozowników strzykawkowych.

Spoiwo dostępne jest również w formie prętów czy sztab czystego spoiwa. Te formy wykorzystuje się, gdy potrzebne są duże ilości spoiwa, np. w zapełnianiu wanien lutowniczych czy automatów do lutowania na fali.

Lutowia podzielić można również z uwagi na ich skład chemiczny. Tradycyjnym spoiwem do lutowania w elektronice było przez wiele dekad lutowie ołowiowe – czyli w istocie cała rodzina stopów, których głównymi składnikami były: cyna i ołów. Najpopularniejszy skład to Sn63Pb37 (63% cyny, 37% ołowiu) – oferował niską temperaturę topnienia (183°C) i bardzo dobre właściwości mechaniczne oraz elektryczne. To spoiwo używane było najczęściej, ale skąd czas przeszły w tym opisie? Ołów zapewnia doskonałą płynność i odporność na zmęczenie termiczne czy mechaniczne połączenia lutowania, ale ze względu na przepisy środowiskowe (m.in. dyrektywę RoHS), stosowanie takich spoiw jest obecnie bardzo ograniczone. Tradycyjne lutowie zastąpione zostało jego bezołowiowym odpowiednikiem, którego główny składnik stanowi cyna, a dodatki stopowe to: srebro (Ag) i miedź (Cu). Jednym z popularniejszych stopów bezołowiowych jest SAC305, który zawiera 96,5 cyny, 3,0% srebra i 0,5% miedzi. Stop ten, w porównaniu do tradycyjnego, ołowiowego lutowia, ma wyższą temperaturę topnienia (ok. 217...227°C), ale jest o wiele bardziej ekologiczny i bezpieczny. Niestety stopy te charakteryzują się też mniejszą płynnością roztopionego lutowia, jak i trochę gorszą odpornością mechaniczną, co powodować może problemy z pękaniem przy długoterminowym użytkowaniu. Nie oznacza to oczywiście, że spoiwa Pb-free są gorsze od ołowiowych – powyższe problemy w dużej mierze zostały rozwiązane np. poprzez optymalizację topników.

Oprócz klasycznego lutowia opisanego powyżej (w wersji ołowiowej i bezołowiowej) dostępna jest cała gama spoiw specjalnych. Są to materiały stosowane w aplikacjach, w których parametry tradycyjnego lutowia nie są z jakiegoś powodu wystarczające. Każdy z materiałów opisanych poniżej charakteryzuje się jakąś wyjątkową własnością, która sprawia, że w pewnych aplikacjach materiał ten okazuje się niezastąpiony.

Pierwszą grupę tworzą lutowia niskotopliwe. Zazwyczaj są one oparte na dodatkach bizmutu (Bi) lub indu (In). Jak sama nazwa wskazuje, charakteryzują się bardzo niską temperaturą topnienia, np. 138°C (stop Sn42Bi58). Stosuje się je np. do lutowania bardzo delikatnych elementów, które nie są odporne na wyższą temperaturę stosowaną przy typowym lutowaniu (od 180°C do 220°C). Dodatkowo bardzo ciekawą aplikacją tych materiałów jest wylutowywanie elementów w zastosowaniach serwisowych. Stosuje się wtedy spoiwo niskotopliwe (najczęściej Sn42Bi58, In52Sn48 lub specjalny stop ChipQuik Bi56Sn30In14 o temperaturze topnienia 79°C) jako „dodatek" wtapiany do istniejącej spoiny – taka mieszanka ma niższą temperaturę topnienia niż tradycyjne spoiwo (ale też wyższą niż zwykłe spoiwo niskotopliwe), dzięki czemu łatwiej jest wylutować element, szczególnie w przypadku gdy ma on dużą masę (a więc i sporą pojemność cieplną) – np. w przypadku dużych złączy THT. Przy takiej pracy należy pamiętać, aby oczyścić pole lutownicze z mieszanki spoiw i przy wlutowaniu nowego elementu zastosować już tylko zwykłe, pojedyncze spoiwo cynowe, gdyż stopy „rozlutownicze", podobnie jak tradycyjne lutowia niskotemperaturowe, charakteryzują się gorszymi parametrami niż klasyczne stopy – w szczególności chodzi tu o parametry mechaniczne gotowej spoiny. Zastosowanie nieodpowiednich materiałów lub ich mieszanki może prowadzić do powstania kruchych, łatwo pękających spoin lub, co gorsza, obniżyć odporność na zmęczenie termiczne i doprowadzić do wczesnej awarii.

Na drugim biegunie skali termicznej znajdują się lutowia wysokotopliwe. Są to stopy używane w aplikacjach o wysokich temperaturach pracy, np. w przemyśle górniczym, naftowym czy szczególnych aplikacjach przemysłowych. Tego rodzaju stopy także oparte są na ogół na cynie (np. SN97Cu3 o temperaturze topnienia do 300°C). Z uwagi na częste domieszki srebra (Ag) lub złota (Au) są one jednak dosyć drogie.

Istnieją też specjalne stopy, których dodatki poprawiają parametry mechaniczne spoiny, głównie jej odporność na zmęczenie mechaniczne czy termiczne (wtedy stosuje się dodatek antymonu (Sb) czy niklu (Ni)). Dostępne są również spoiwa o zwiększonej odporności na korozję (z dodatkiem cynku (Zn)).

Dobór spoiwa w elektronice wymaga uwzględnienia wielu czynników, takich jak skład stopu, wymagania środowiskowe, proces lutowania i warunki pracy urządzenia. Błędy na etapie selekcji stopu lutowniczego mogą prowadzić do problemów z jakością połączeń, korozją lub awariami urządzeń. Dodatkowo po wyborze spoiwa konieczne jest dobranie do niego kompatybilnego topnika, aby zapewnić trwałość i wysoką jakość spoiny.

Kluczowym aspektem jest temperatura pracy urządzenia oraz ewentualne ograniczenia elementów co do temperatury ich lutowania. Następnie analizuje się wymagania aplikacyjne docelowego urządzenia. Dla przykładu: w aplikacjach o dużym obciążeniu mechanicznym (np. motoryzacja) wybiera się spoiwa o większej odporności na zmęczenie mechaniczne i termiczne. Następnie można dobrać formę, w jakiej zastosujemy wybrane lutowie (pasty do lutowania reflow w technologii SMT, drut lutowniczy z topnikiem w rdzeniu do lutowania ręcznego, etc.).

Pozostałe preparaty chemiczne

Kleje i żywice

Istnieje wiele aplikacji kleju na PCB, np. do montażu elementów SMD na spodzie płytki (gdy komponenty znajdują się po obu jej stronach i lutowane muszą być w jednym procesie reflow) lub instalacji ciężkich elementów na PCB. Wybór kleju zależy od specyficznych wymagań aplikacji. Istnieje szereg dodatkowych wymagań, takich jak przewodnictwo elektryczne czy cieplne, odporność na wysoką lub niską temperaturę albo ochrona przed wilgocią lub chemikaliami. Większość materiałów o specjalnych własnościach opisana jest w dalszej części artykułu.

Jednymi z częściej stosowanych preparatów są kleje i żywice epoksydowe – używane do montażu elementów na PCB oraz zalewania całych urządzeń, celem ich hermetyzacji. Z uwagi na wysoką

eprasa.pl f9fe7f8d6b

odporność mechaniczną, chemiczną i środowiskową kleje i żywice epoksydowe stosuje się również w systemach pracujących w trudnych warunkach. Dodatkowo – z uwagi na doskonałe własności dielektryczne – żywice stosuje się również do zalewania urządzeń wysokonapięciowych.

Żywice i kleje epoksydowe to systemy dwuskładnikowe – muszą być one odpowiednio wymieszane, aby nastąpiła reakcja chemiczna prowadząca do utwardzenia kleju/żywicy. Typowo, po wymieszaniu ze sobą składników, pełne utwardzenie następuje po 24...48 godzinach, co może być wyzwaniem w szybkich procesach produkcyjnych. Składniki mieszanki przed utwardzeniem są na ogół niebezpieczne dla zdrowia lub wręcz toksyczne, dlatego przed utwardzeniem materiału należy pracować w dobrze wentylowanym pomieszczeniu, mając na sobie rękawiczki oraz maskę z odpowiednim filtropochłaniaczem. Żywice i kleje epoksydowe mogą być domieszkowane różnymi dodatkami, od barwników poprzez materiały ceramiczne zwiększające przewodność cieplną, aż po proszki metaliczne, które zapewniają ekranowanie elektromagnetyczne. Żywice epoksydowe stosuje się na wiele sposobów. Oprócz klejenia elementów i zalewania urządzeń, można używać ich do impregnacji materiałów (do czego potrzebna jest na ogół komora próżniowa) lub do pokrywania z wykorzystaniem rozpylaczy.

Drugą grupą substancji stosowanych do klejenia czy zalewania urządzeń elektronicznych są kleje/żywice poliuretanowe. Charakteryzują się one większą elastycznością niż materiały epoksydowe, co sprawia, że są one bardziej odporne na wibracje czy uderzenia. Nie są wprawdzie tak odporne na wodę i chemikalia, jak żywice epoksydowe, ale w większości aplikacji sprawdzają się równie dobrze. Wykazują natomiast większą odporność na promieniowanie UV niż żywice epoksydowe. Te materiały to dobry wybór do aplikacji wymagających amortyzacji drgań lub wystawionych na ciągłe działanie światła słonecznego. W procesie produkcyjnym mają podobny charakter, jak żywice epoksydowe.

Kleje silikonowe stosowane są przede wszystkim jako uszczelnienie i ochrona elementów elektronicznych przed wilgocią, kurzem i wibracjami. Dodatkowo silikony stosowane są do klejenia obudów, mocowania przewodów czy też ochrony elementów przed uszkodzeniami mechanicznymi. Silikony są bardzo elastyczne i odporne na zmienne warunki środowiskowe, w tym na szeroki zakres temperatur (od –50°C do +200°C). Zapewniają dobre własności dielektryczne i dużą odporność na wodę, związki chemiczne oraz promieniowanie UV.

Silikony nakładane są na elementy na PCB czy w obudowy w postaci gęstej pasty, więc nie jest wymagane tworzenie specjalnej formy, co dodatkowo upraszcza ich stosowanie. Mają one niski skurcz podczas utwardzania, więc ryzyko uszkodzenia elementów na PCB podczas utwardzania jest minimalne. Na ogół silikony techniczne są nietoksyczne, przez co nie są wymagane specjalne środki bezpieczeństwa przy pracy z nimi (ale warto pracować w rękawiczkach z uwagi na fakt, że silikony – równie łatwo, jak do obudowy – kleją się także do skóry). Te wszystkie czynniki sprawiają, że materiały te są chętnie wykorzystywane w elektronice – dotyczy to zwłaszcza silikonów RTV (Room Temperature Vulcanization, wulkanizujące w temperaturze pokojowej).

Żywice epoksydowe i poliuretanowe – podobnie jak silikony – utwardzają się w czasie od 12 do nawet 48 godzin. Mogą być stosowane różne substancje do przyspieszania procesu sieciowania, jednakże nadal zajmuje to relatywnie dużo czasu, liczonego w skali pojedynczych godzin. Jednakże w wielu aplikacjach konieczne jest uzyskanie połączenia klejonego w czasie minut lub nawet sekund. W takim wypadku stosuje się kleje akrylowe lub cyjanoakrylowe. Charakteryzują się one średnimi parametrami mechanicznymi, ale całkiem dobrą odpornością na wilgoć czy promieniowanie U – nie są jednak zbyt odporne na bardziej agresywne związki chemiczne (oleje, smary czy rozpuszczalniki organiczne). Kleje te mogą łączyć ze sobą różne powierzchnie (tworzywa sztuczne, metale, ceramikę itp.), dzięki czemu stanowią preparaty bardzo uniwersalne, wiążące mocowane powierzchnie w czasie kilku minut (kleje akrylowe) czy nawet kilku sekund (kleje cyjanoakrylowe przy wykorzystaniu przyspieszacza). Kleje te stosuje się najczęściej do montażu niekrytycznych elementów w urządzeniach lub do szybkich napraw serwisowych.

Ostatnią opisaną tutaj grupą klejów są kleje utwardzane światłem UV. Są to na ogół żywice światłoutwardzalne, stosowane do uszczelniania i klejenia małych elementów, zwłaszcza w systemach sensorowych czy układach optycznych (do czego idealnie się nadają z uwagi na dużą przezroczystość kleju). Materiały te mają na ogół przyzwoite własności mechaniczne oraz dobrą odporność na promieniowanie UV i wilgoć po utwardzeniu.

Przy klejeniu czy zalewaniu układów elektronicznych żywicami należy pamiętać o szeregu aspektów. W pierwszej kolejności trzeba sprawdzić kompatybilność wszystkich używanych materiałów (kleju i samych elementów) – niektóre kleje mogą nie wiązać się dobrze z określonymi rodzajami powierzchni, a inne wręcz uszkadzać. Mocowane podzespoły powinny być oczyszczone i odtłuszczone przed rozpoczęciem pracy.

W urządzeniach pracujących w podwyższonej temperaturze należy unikać stosowania klejów cyjanoakrylowych, gdyż mogą one tracić swoje właściwości w takich warunkach. Pozostałe kleje mają wyższą odporność termiczną.

Kleje stosowane w elektronice są niezwykle różnorodne i muszą być starannie dobierane w zależności od wymagań aplikacji. Epoksydy oferują trwałość i odporność, żywice poliuretanowe i silikony zapewniają elastyczność, a kleje cyjanoakrylowe są szybkie i proste w użyciu. Specjalne kleje zapewniają spoiny przewodzące prąd elektryczny lub ciepło i mają fundamentalne znaczenie w specjalistycznych aplikacjach. Niewłaściwy wybór kleju lub jego nieodpowiednie stosowanie może prowadzić do awarii urządzenia, dlatego należy uwzględniać specyficzne wymagania materiałowe, mechaniczne i środowiskowe każdego z preparatów.

Kleje przewodzące

Osobną kategorią preparatów są kleje i lakiery przewodzące. Choć ich podstawową (wspólną) funkcjonalnością jest przewodzenie prądu elektrycznego, to na rynku dostępnych jest wiele produktów tego rodzaju o różniących się parametrach.

Klej przewodzący składa się z dwóch składników (w uproszczeniu): polimerowej matrycy i przewodzącego dodatku. Bazę stanowią polimery, takie jak epoksydy, akryle lub silikony – taka matryca zapewnia adhezję, elastyczność oraz wytrzymałość mechaniczną i ma identyczne własności, jak opisane wcześniej kleje i żywice. Do matrycy dodawane są przewodzące wypełniacze, takie jak proszki metaliczne (na ogół jest to srebro, złoto lub miedź), które zapewniają wysokie przewodnictwo elektryczne. W pewnych zaawansowanych aplikacjach stosować można również nanocząstki srebra, węgla lub nawet grafenu, które zwiększają przewodność kleju.

Tego rodzaju preparaty stosuje się do łączenia przewodników wszędzie tam, gdzie lutowanie jest niemożliwe (np. przy wrażliwych podłożach, takich jak szkło czy ceramika), a także do tworzenia kontaktów elektrycznych w ogniwach słonecznych, wyświetlaczach LCD czy sensorach. Stosuje się je także do prac naprawczych, uzupełniania uszkodzonych ścieżek itp.

Należy pamiętać, że kleje takie mają o wiele gorszą przewodność niż lity metal czy połączenie lutowane, a także kiepską odporność mechaniczną – nie należy na nich polegać, jeśli chodzi o montaż elementów.

Pokrycia konformalne

Pokrycia konformalne to cienkie warstwy ochronne nakładane na powierzchnię płytek drukowanych i zamontowanych na nich

eprasa.pl f9fe7f8d6b

komponentów. Mają za zadanie chronić elektronikę przed szkodliwymi czynnikami zewnętrznymi, takimi jak wilgoć, pył czy chemikalia. Pokrycia te doskonale dopasowują się do kształtu elementów, zapewniając równomierną ochronę nawet w trudno dostępnych miejscach. Elektronika pracująca w agresywnych środowiskach, np. przemysłowych lub medycznych (gdzie jest narażona na działanie chemikaliów odkażających) wymaga takich pokryć, aby uniknąć korozji.

Dodatkowo niektóre pokrycia zapewniają zwiększoną odporność dielektryczną, gdyż żywice oferują wyższe napięcie przebicia niż powietrze. Dzięki temu pokrycia zapobiegają zwarciom między ścieżkami oraz elementami znajdującymi się blisko siebie, co jest szczególnie ważne w układach HV.

Pokrycia konformalne oparte mogą być na opisanych wcześniej epoksydach, poliuretanach czy silikonach. Dodatkowo stosuje się także pokrycia akrylowe oraz fluoropolimerowe. Pokrycia akrylowe stosowane są na ogół w elektronice konsumenckiej i systemach przemysłowych ogólnego zastosowania. Z kolei pokrycia fluoropolimerowe charakteryzują się doskonałą odpornością na chemikalia i wodę, ale ich nakładanie wymaga bardziej skomplikowanego procesu, a sam materiał jest relatywnie drogi. Z uwagi na to stosuje się je w aplikacjach o wyższych wymaganiach, takich jak systemy lotnicze czy kosmiczne.

Istnieje wiele metod nakładania pokryć konformalnych. Do podstawowych metod należą zanurzenie (dip-coating), natrysk czy też malowanie pędzlem. W produkcji masowej stosuje się najczęściej dip-coating lub natrysk (zwłaszcza w aplikacjach wymagających precyzyjnej kontroli grubości). Dodatkowo w wielu wypadkach konieczne jest selektywne nanoszenie, tak aby nie pokryć niektórych elementów, takich jak złącza, czujniki czy mikrofony.

Pokrycia konformalne są kluczowym elementem ochrony elektroniki w trudnych warunkach środowiskowych. Każdy rodzaj powłoki ma swoje specyficzne zalety i ograniczenia, co sprawia, że wybór odpowiedniego materiału zależy od warunków pracy, wymagań środowiskowych i specyfiki urządzenia. Akryle są idealne do ogólnych zastosowań, silikony i poliuretany do aplikacji wymagających elastyczności, a epoksydy i fluoropolimery do zastosowań wymagających maksymalnej ochrony chemicznej i mechanicznej.

Uszczelki przewodzące typu form-in-place

W wielu przypadkach konieczne jest „uszczelnienie" obudowy urządzenia pod względem emisji i/lub odbioru zakłóceń elektromagnetycznych. Oznacza to, że wszystkie uszczelki urządzenia muszą być przewodzące, aby zapewnić pełną osłonę systemu. Tego rodzaju rozwiązania stosuje się w systemach radiowych, a także w urządzeniach klasy tempest, gdzie wszystkie uloty magnetyczne z wnętrza urządzenia muszą być zaekranowane, aby niemożliwe było np. zdalne podsłuchiwanie systemu.

Aby zapewnić optymalną izolację elektromagnetyczną, stosuje się tak zwane uszczelki form-in-place (FIP), wykonywane z przewodzącego silikonu nanoszonego na obwód obudowy urządzenia (najczęściej za pomocą maszyny sterowanej numerycznie). Obudowa jest następnie zamykana, co powoduje, że silikon dopasowuje się do kształtu obudowy i wulkanizuje w docelowej postaci. Ta technologia gwarantuje formowanie precyzyjnych i powtarzalnych uszczelek EMI w miejscach, w których tradycyjne rozwiązania są trudne do zastosowania z powodu ograniczonej przestrzeni.

Na fotografii 2 pokazano uszczelkę form-in-place (FIP) naniesioną na obudowę tuż przed jej montażem. Tego rodzaju uszczelka pozwala na idealne dopasowanie do aplikacji – tak kształt, jak i materiał mogą być dostosowane do potrzeb danego przypadku. Dodatkowo tego rodzaju uszczelki umożliwiają wielokrotne otwieranie obudowy, co zapewnia serwis tak uszczelnionych systemów.

Pasty i kleje termoprzewodzące

Ostatnią grupą materiałów, które należy omówić w tym artykule, są preparaty termoprzewodzące. Do grupy tej należą pasty, kleje oraz elastyczne podkładki, których zadaniem jest poprawianie transportu ciepła, na ogół z grzejących się elementów elektronicznych do radiatorów. Pasty termoprzewodzące są kluczowym elementem w zarządzaniu ciepłem w urządzeniach elektronicznych. Ich główną rolą jest wypełnienie mikroszczelin między powierzchniami, co zmniejsza rezystancję termiczną i poprawia wydajność chłodzenia.

Podobnie jak preparaty przewodzące prąd elektryczny, materiały termoprzewodzące składają się z matrycy nośnej i termoprzewodzącego wypełniacza. Dobór tych materiałów wpływa na finalne parametry produktu. Matryca nośna to substancja, która nadaje paście konsystencję i umożliwia jej łatwe nakładanie. Zapewnia elastyczność i równomierne rozprowadzenie wypełniaczy przewodzących ciepło. Najczęściej stosowane materiały to: silikon, polimery organiczne lub oleje mineralne i syntetyczne. W niektórych pastach do zastosowania w najwyższych temperaturach wykorzystuje się matryce ceramiczne, aby zapewnić większą stabilność w ekstremalnych warunkach. Silikony są najpopularniejszymi matrycami, dzięki dużej elastyczności, trwałości i odporności na temperaturę nawet do ok. 300°C, przy zachowaniu relatywnie niskich kosztów wdrożenia – jeśli jednak cena jest krytycznym parametrem, zamienić można je na syntetyczne lub mineralne oleje, które charakteryzują się jeszcze niższą ceną, ale również gorszą odpornością i trwałością. Polimery organiczne mają lepsze właściwości mechaniczne i odporność, jednakże ich koszt jest większy niż w przypadku silikonów. Polimery dodatkowo mogą być modyfikowane chemicznie, aby zmienić ich parametry. W przypadku klejów termoprzewodzących jako matryce stosuje się kleje, które opisano wcześniej w tym artykule.

W roli materiałów wypełniających stosuje się pyły metaliczne, zwłaszcza metali o wysokiej przewodności cieplnej – aluminium, srebra, złota lub – rzadziej – miedzi, z uwagi na jej mniejszą odporność chemiczną. Dodatek metalicznego wypełniacza powoduje jednak, że pasta (czy klej) mogą także przewodzić prąd. W wielu aplikacjach jest to problematyczne, dlatego też zamiast dodatku metalicznego stosuje się ceramiczne wypełniacze, takie jak tlenki glinu bądź cynku, azotki boru lub glinu. Materiały te wykazują dobre przewodnictwo cieplne i jednocześnie zapewniają izolację elektryczną.

Najnowszym dodatkiem do rodziny materiałów termoprzewodzących są materiały oparte na węglu. Nanocząstki grafitowe (czy nawet grafen) są dodawane jako wypełniacze do past i klejów termoprzewodzących.

Warto w tym miejscu wspomnieć także o przekładkach termoprzewodzących. Na ogół są one wykonane z przewodzącego ciepło silikonu. Stosuje się je w miejscach, gdzie konieczne jest odprowadzanie ciepła z układów, które nie dotykają bezpośrednio powierzchni chłodzącej (np. radiatora). Odległość ta może wynikać z ograniczeń mechanicznych w systemie (wtedy dostępny jest cały szereg podkładek o różnej grubości) lub konieczności izolacji elektrycznej radiatora od elementu.

Podsumowanie

Jak widać, w warsztacie elektronika znaleźć się może wiele preparatów chemicznych. Każdy elektronik musi mieć pod ręką preparaty do lutowania – topnik, spoiwo itp. dobrane do konkretnych prac. Równie ważne są preparaty czyszczące, szczególnie przy pracach serwisowych i produkcyjnych.

Pozostałe materiały, takie jak kleje, lakiery czy zalewy, częściej spotykane są w fabrykach. Wszystkie te preparaty mają swoje określone zastosowania, parametry oraz wynikające z nich wady i zalety. Odpowiedni dobór chemii do danej aplikacji zapewni pożądane parametry urządzenia, a także jego długą i bezawaryjną pracę.

Nikodem Czechowski, EP

eprasa.pl f9fe7f8d6b

W jakim celu lakierujemy płytki PCB i jak wybrać optymalne rozwiązanie?

Ze względu na dynamiczny rozwój technologii, prowadzący do redukcji rozmiarów komponentów elektronicznych, a także z powodu coraz wyższych wymagań stawianych urządzeniom elektronicznym, pracującym w warunkach wysokiego narażenia na niekorzystne warunki środowiskowe, stosowanie powłok ochronnych staje się powszechniejsze.

Cienka, przezroczysta powłoka lakiernicza zabezpiecza płytki PCB oraz układy elektroniczne przed wilgocią, kurzem, zanieczyszczeniami z otoczenia i agresywnymi substancjami chemicznymi. Stanowi również skuteczną ochronę przed korozją, ścieraniem oraz naprężeniami mechanicznymi i wibracjami. Nałożenie powłoki ochronnej wzmacnia odporność na impulsy ESD oraz zwiększa rezystancję izolacji. Lakierowanie – przy relatywnie niskich nakładach finansowych – znacznie wydłuża żywotność urządzeń i zwiększa ich niezawodność, co w konsekwencji przekłada się na mniejszą liczbę awarii, niższe koszty wymiany bądź serwisu oraz utrzymanie dobrej reputacji producenta. Jeśli zdecydujemy się na lakierowanie modułów elektronicznych, kluczowym elementem dla powodzenia tego procesu będzie wybór optymalnego rodzaju powłoki i metody jej nakładania, odpowiedniej dla danego projektu.

Materiał tworzący powłokę na PCB powinien być łatwy w aplikacji. W szczególności przy metodzie natryskowej pożądane są produkty o małej lepkości. Ważnym parametrem – zwłaszcza przy masowej produkcji – jest szybkość utwardzania. Przy wyborze należy uwzględnić wymagania dotyczące zakresu temperatur pracy oraz izolacji elektrycznej zabezpieczanych modułów. Urządzenia, które mają być serwisowane, powinny być lakierowane preparatami łatwo usuwalnymi – mechanicznie bądź przy użyciu odpowiednich rozpuszczalników. Ze względów bezpieczeństwa użytkowników i środowiska polecane są lakiery bez rozpuszczalników, ewentualnie lakiery o małej toksyczności. W niektórych aplikacjach preparat musi spełnić określone standardy transportowe, militarne lub inne wymogi norm branżowych. Poniżej zamieszczamy przegląd dostępnych na rynku materiałów do lakierowania modułów elektronicznych.

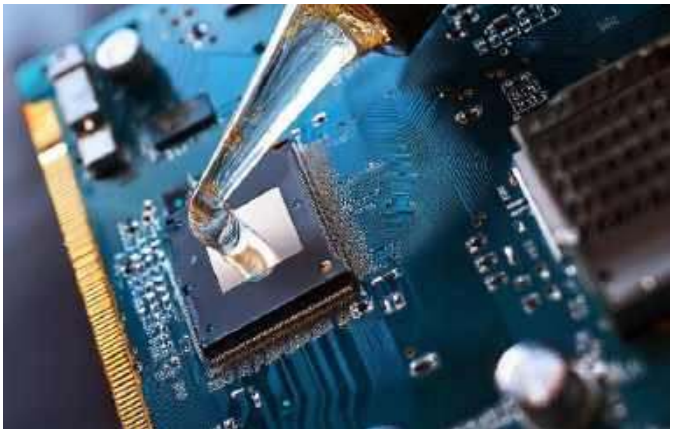
Lakiery akrylowe

Lakiery akrylowe na bazie rozpuszczalnika są stosunkowo proste do wdrożenia i atrakcyjne pod względem ekonomicznym. Proces utwardzania polega na odparowaniu rozpuszczalnika, łatwo można więc dostosować optymalną lepkość poprzez dodanie rozpuszczalnika. Powłoka akrylowa dobrze chroni elektronikę przed wilgocią i umożliwia łatwe serwisowanie, jest jednak dosyć cienka po utwardzeniu (około 25 µm), a z uwagi na dużą zawartość lotnego rozpuszczalnika nakładanie powinno być prowadzone w dobrze wentylowanym pomieszczeniu. Lakiery akrylowe można aplikować zanurzeniowo, natryskowo lub ręcznie, za pomocą pędzla.

Podsumowując: ten typ powłoki PCB zapewnia podstawową ochronę produktów elektronicznych w tak zwanym standardzie przemysłowym, ale jego słabszym punktem jest umiarkowana odporność chemiczna. W ofercie BLelektronik można znaleźć lakier akrylowy ACC11 firmy CHT, spełniający wymagania militarne norm: MIL-I-46058C i IPC-CC-830. Możliwa jest kontrola poprawności pokrycia lakierem płytki pod lampą UV. Produkt dostępny jest w aerozolu w opakowaniach 400 ml oraz w większych, 5-litrowych pojemnikach.

Więcej informacji:
BLelektronik
www.blelektronik.com.pl
tel. +48 12 357 63 78

Sklep internetowy:
www.blelektronik.com.pl/sklep/



Lakiery silikonowe

Lakiery silikonowe, ze względu na swoje wyjątkowe właściwości, są bardzo często wybierane jako warstwa ochronna w elektronice. Wysoce hydrofobowa natura silikonów zapewnia doskonałą odporność na wilgoć i kondensację pary wodnej. Powłoki silikonowe zachowują swoje właściwości w szerokim zakresie temperatur: od –60°C do +200°C. Po utwardzeniu charakteryzują się dużą elastycznością, dzięki czemu skutecznie pochłaniają wstrząsy mechaniczne i dobrze reagują na odkształcenia termiczne. Wykazują doskonałą przyczepność do wielu materiałów i zapewniają wysoką wytrzymałość dielektryczną (>400 V/mil). Preparaty te utwardzają się pod wpływem wilgoci z powietrza, a to wymaga czasu, co przy dużym obłożeniu produkcji może stanowić pewien problem. Lakiery silikonowe można nakładać natryskowo, w tym również metodą selektywnego lakierowania oraz ręcznie przy użyciu pędzla. Ten typ materiału nie nadaje się do lakierowania zanurzeniowego. Słabą stroną lakierów silikonowych jest trudniejsze serwisowanie niż w przypadku rozpuszczalnikowych lakierów akrylowych. Poza usunięciem mechanicznym wymagają one specjalistycznych rozpuszczalników lub kąpieli ultradźwiękowych. Najczęściej stosowane w elektronice lakiery silikonowe to wersje bez rozpuszczalników: bezpieczne dla operatorów i środowiska, za sprawą eliminacji szkodliwych substancji wydzielanych do otoczenia. Ograniczeniu ulega również zagrożenie pożarowe, obecne przy stosowaniu łatwopalnych rozpuszczalników.

W zakresie silikonowych powłok polecamy szczególnie bezrozpuszczalnikowe lakiery ACC17 i ACC15 firmy CHT. Pierwszy z wymienionych produktów – o lepkości około 400 mPas – pozwala na uzyskanie powłoki ochronnej grubości od 100 do 300 µm, a warstwa o grubości około 100 µm będzie sucha w dotyku już

eprasa.pl f9fe7f8d6b

po 4 minutach w temperaturze 25°C i wilgotności 55%. Pełne właściwości zostaną uzyskane po około 15 minutach. Lakier ACC15, o lepkości 1180 mPas, stworzy powłokę ochronną nawet do 1000 µm w czasie około 40 minut. Oba produkty dostępne są w opakowaniach: 1 kg, 5 kg i 20 kg.

Fotoutwardzalne powłoki uretanowo-akrylowe

Powłoki uretanowo-akrylowe utwardzane światłem UV są wyjątkowe ze względu na unikalny mechanizm natychmiastowego sieciowania po wystawieniu na działanie ultrafioletu o odpowiednim natężeniu i długości fali. Szybki proces utwardzania, który może nastąpić w ciągu kilku sekund, znacznie skraca czas produkcji i zwiększa wydajność, umożliwiając producentom usprawnienie produkcji. Oprócz szybkiego procesu utwardzania powłoki UV wykazują również doskonałą adhezję, gwarantującą długotrwałą i skuteczną ochronę zabezpieczonych modułów. Charakteryzują się dobrą odpornością na chemikalia i wilgoć. Mimo że początkowa inwestycja w sprzęt do utwardzania promieniami UV może być znacząca, długoterminowe korzyści, wynikające ze zwiększenia mocy produkcyjnych i poprawy jakości, zwykle uzasadniają koszty. Godne polecenia są produkty firmy NOVACHEM TECHNOLOGY: Optimax® 8750 UV, Optimax® 8753 UV. Oprócz sieciowania UV oba materiały mają wtórny mechanizm utwardzania światłem widzialnym i ciepłem w miejscach, do których światło nie dociera. Są to idealne powłoki ochronne szczególnie do gęsto upakowanych płytek PCB.

Lakiery poliuretanowe

Lakiery poliuretanowe występują w formie preparatów jedno- i dwuskładnikowych. Można je nakładać przez zanurzanie, natryskiwanie lub pędzlem. Jednoskładnikowe poliuretany, produkowane zwykle na bazie rozpuszczalników, są łatwe w aplikacji, ale ich utwardzanie wymaga czasu. Natomiast formuły dwuskładnikowe utwardzają się znacznie szybciej, ale wymagają podwyższonych temperatur. Powłoki PU wykazują dobrą elastyczność – szczególnie w niskich temperaturach, mają wysoką odporność na chemikalia i uszkodzenia mechaniczne. Stosowanie preparatów poliuretanowych wymaga odpowiedniego zabezpieczenia i ochrony osobistej pracowników, przeprowadzenia szkolenia oraz dobrej wentylacji, z tego względu lakiery PU są obecnie mniej popularne.

Na rynku dostępne są również mniej tradycyjne rozwiązania w tym zakresie, takie jak:

Powłoki epoksydowe – zazwyczaj są to preparaty dwuskładnikowe, co znacznie komplikuje proces aplikacji. Epoksydy tworzą zwykle bardzo twarde powłoki, charakteryzują się doskonałą odpornością na wilgoć i chemikalia, są wytrzymałe mechanicznie, ale usunięcie ich z płytki po utwardzeniu jest praktycznie niemożliwe.

Powłoki cienkowarstwowe/„nano” na bazie rozpuszczalników fluorowęglowodorowych, nakładane metodą natryskową lub zanurzeniową, tworzą bardzo cienką warstwę. Proces utwardzania jest niezwykle szybki, ale ten rodzaj powłoki nie zapewnia poziomu ochrony powierzchni, jaki oferują inne metody powlekania.

Materiały parylenowe to wyjątkowy rodzaj powłok nakładanych metodą osadzania z cienkiej warstwy monomeru w wyniku pirolizy. Lakierowanie „parylenowe” jest jednak bardzo kosztowne w porównaniu do metod konwencjonalnych.

Podsumowanie

Wybór powłoki ochronnej wymaga czegoś więcej niż tylko określenia rodzaju materiału i metod nakładania. Musimy wziąć pod uwagę wiele czynników, w tym złożoność komponentów, przepisy środowiskowe, potencjalne przeróbki i usuwanie powłoki czy też założenia budżetowe. Jeżeli potrzebują Państwo wsparcia w doborze preparatu do zabezpieczenia modułów elektronicznych, zapraszamy do kontaktu.

REKLAMA

BL elektronik

Optymalne rozwiązania dla elektroniki i energetyki

FHU BL elektronik
ul. Josepha Conrada 65, 31-357 Kraków
Tel. +48 12 357 63 78
kontakt@blelektronik.com.pl
blelektronik.com.pl
sklep.blelektronik.com.pl
e-sklep

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Sterowanie tranzystorami MOSFET niskim napięciem

Tranzystory MOSFET są bardzo lubiane przez konstruktorów, przede wszystkim ze względu na zerowy pobór prądu przez bramkę w stanie ustalonym. Wystarczy przyłożyć odpowiednie napięcie – i już. Napięcie to musi jednak być „odpowiednio" wysokie – czyli właściwie jakie?

Tranzystory dużej mocy z reguły steruje się napięciami bramka-źródło rzędu kilkunastu woltów, aby zapewnić jak największe otwarcie kanału. Oczywiście trzeba pamiętać o zabezpieczeniu izolatora podbramkowego przed przebiciem, bo przebity tranzystor jest mało użyteczny, a niekiedy wręcz mało estetyczny... Z tym faktem się nikt nie kłóci, każdy to popiera, możemy się rozejść. Zresztą w urządzeniach dużej mocy z reguły znajdziemy też odpowiednio wysokie napięcie, którym moglibyśmy owe tranzystory wysterować, więc problemu praktycznie nie ma.

Sprawa wygląda zupełnie inaczej, kiedy mamy układ zasilany dosłownie kilkoma woltami, a do tego źródło energii stanowi np. bateria. Tranzystory bipolarne, którym wystarczy napięcie poniżej 1 V do prawidłowego wysterowania, będą wówczas nieodpowiednie z racji płynącego (cały czas otwarcia) prądu bazy. Trzeba sięgnąć po ich unipolarnych kolegów. Załóżmy, że w omawianym przykładzie obciążenie będzie podłączane od strony masy, czyli potrzebujemy tranzystora z kanałem typu n. Tranzystory te mają również lepsze parametry (pod kątem rezystancji otwartego kanału i napięcia progowego) niż ich komplementarni kuzyni. Sterowaniem zajmie się wyjście mikrokontrolera, gdyż nie wymagamy krótkich czasów przełączania, ot – zwykłe „włącz-wyłącz" dla silnika prądu stałego.

Najprostszy wariant układu prezentuje schemat widoczny na **rysunku 1** – uwzględnia tranzystor, wyjście mikrokontrolera, diodę zabezpieczającą i nic więcej. Czy czegoś tu brakuje? Na pierwszy rzut oka nie, zresztą takich układów działają miliony na całym świecie i jakoś jeszcze się on nie zawalił. Wysoki stan logiczny na wyjściu mikrokontrolera wprawia tranzystor w stan przewodzenia, z kolei niski – zatyka go. Czasy przełączania są krótkie, bo wydajność prądowa wyjść współczesnych mikrokontrolerów okazuje się całkiem spora i przeładowywanie pojemności wejściowej może trwać krótko.

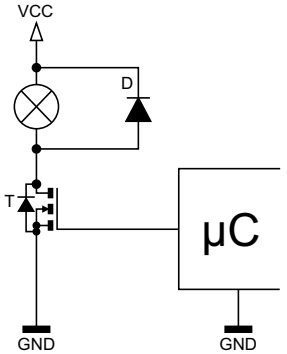
Szczenięciem elektronicznym będąc, zaprzęgnąłem taki układ do sterowania silnikiem pobierającym prąd maksymalny bodajże rzędu 2 A ze źródła napięcia 5 V. Mikrokontroler ATmega8, tranzystor IRLML0030TR, który na dodatek ma w nocie katalogowej dumny napis „logic level". I ja zatem, jakże dumny, użyłem go. Deklarowany prąd drenu sięgał wartości 5,3 A, rezystancja otwartego kanału 40 mΩ przy 4,5 V napięcia bramka-źródło – po prostu bajka. A potem kląłem, na czym świat stoi… W losowych momentach podczas przełączania mikrokontroler się zawieszał, po czym uległ zniszczeniu. Cytując klasyka: no i nici z rumakowania.

Moje spostrzeżenie było takie, że – podczas przełączania tranzystora – na jego bramce (względem masy) pojawiały się impulsy szpilkowe. Wyglądały tak, jakby generowała je pojemność zwrotna tego elementu, czyli pojemność dren-bramka: przy wyłączaniu tranzystora była to „szpilka" w górę, zaś przy załączaniu – „szpilka" w dół. Diody zabezpieczające wejście mikrokontrolera dzielnie to wszystko przekazywały do jego zasilania, aż zapewne któraś z nich uległa awarii lub cały układ odmeldował się wskutek impulsu napięcia (o zbyt wysokiej wartości) na linii zasilającej.

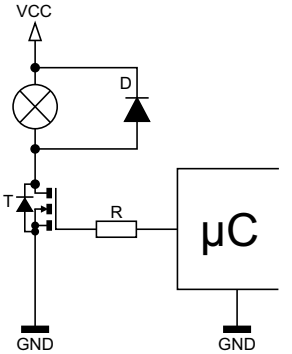
Układ, który nie działa, jest generalnie mniej pożądany od takiego, który jednak działa (najlepiej jeszcze w sposób przewidywalny). Podejrzewałem, że winne problemom są te nieszczęsne diody zabezpieczające, przez które „zmillerowana" pojemność zwrotna pchała prąd. Dlatego układ z **rysunku 2** zadziałał już prawidłowo, a został zmodyfikowany jedynie o szeregowy rezystor umieszczony między mikrokontrolerem a bramką. Rozwiązanie takie zyskało dwie zasadnicze zalety względem schematu z rysunku 1.

Po pierwsze, rezystor daje pewną izolację między delikatnym mikrokontrolerem a brutalnym, zakłóconym otoczeniem tranzystora wykonawczego typu MOSFET. Kilkaset omów lub „sztampowa" wartość 1 kΩ okażą się wystarczające, by ograniczyć prąd diod do bezpiecznej dla nich wartości podczas przełączania obciążenia. Przecież taka „szpilka" będzie miała wartość maksymalną nie wyższą niż napięcie zasilające obciążenie, w tym przypadku 5 V. Jeżeli przyjmiemy R=1 kΩ, to uzyskujemy pewność, że przez diody zabezpieczające nie będzie płynęło więcej niż 5 V/1 kΩ=5 mA (w praktyce – mniej, bo trzeba uwzględnić ich napięcie przewodzenia, jednak taki zgrubny rachunek wystarczy do oszacowania sytuacji).

Po drugie, zaletą okazuje się zmniejszenie poziomu emitowanych zakłóceń przez kluczowane obciążenie, a to z racji wydłużenia

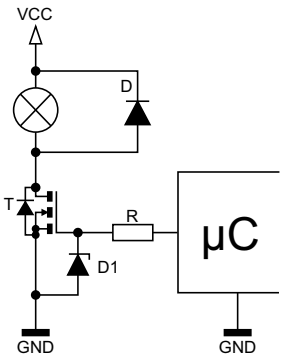


Rysunek 1. Podstawowy układ sterowania tranzystorem MOSFET za pomocą mikrokontrolera



Rysunek 2. Wersja układu z rysunku 1 zmodyfikowana o rezystor szeregowy

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Rysunek 3. Dioda transil zabezpieczająca dielektryk podbramkowy przed przebiciem

czasu przełączania. Mniej strome zbocza oznaczają węższe widmo zajmowane przez zakłócenia powstające w tym momencie, a za opisanym zjawiskiem idzie również redukcja ich energii. Efekt Millera dodatkowo wydłuża ten czas, zwiększając pozornie pojemność, którą ów szeregowy rezystor musi przeładować.

W porządku, a co z zabezpieczeniem dielektryka podbramkowego, przecież wspomniane wcześniej impulsy szpilkowe mogą go przebić! No… nie mogą. Załóżmy najgorszy możliwy przypadek, czyli następującą sytuację: na bramce nadal utrzymuje się napięcie +5 V względem masy (czyli też źródła), zaś przez pojemność zwrotną próbuje się do tego dołożyć dodatkowa szpilka, której wysokość przecież nie może być wyższa niż napięcie zasilające obciążenie – w tym wypadku również 5 V. Czyli 5 V+5 V=10 V, zaś dopuszczalne napięcie bramka-źródło zastosowanego tranzystora wynosi 20 V. Oczywiście nasze oszacowania są mocno nadmiarowe, ponieważ musi nastąpić obniżenie potencjału bramki, aby potencjał drenu zaczął rosnąć, ale przywołany przykład dobrze obrazuje, że nie ma się czego bać. Gdyby jednak napięcie zasilające osiągnęło wysoki poziom, warto dodać tranzystorowi na przykład diodę typu transil, możliwie blisko jego wyprowadzeń – **rysunek 3**. Będzie ona pilnowała maksymalnego potencjału bramki, ponieważ diody zabezpieczające wyprowadzenie mikrokontrolera już tego nie uczynią podczas przełączania („przeszkadza" im bowiem szeregowy rezystor).

Skoro mamy opracowaną topologię układu, trzeba pochylić się nad doborem tranzystora. Wiemy, że zależy nam, aby w stanie przewodzenia prezentował sobą możliwie niską rezystancję otwartego kanału. To zaś oznacza, że jego napięcie progowe musi być niższe od napięcia zasilającego mikrokontroler. Niższe, tylko o ile? Albo raczej: ilokrotnie? Typowo przyjmuje się, że „zdrowy" naddatek napięcia progowego wynosi 3-krotność tej wartości. To oznacza, że tranzystor z napięciem progowym 4 V może być w pełni wysterowany napięciem 12 V, co wynika z silnego zakrzywienia charakterystyki przejściowej powyżej napięcia progowego.

Idźmy w drugą stronę: mamy zasilanie napięciem 5 V, jakie zatem napięcie progowe musi mieć tranzystor, by się w pełni otworzył? Kalkulator mówi, że około 1,7 V. Wertując przepastne noty katalogowe, napotkać można jednak pewien szkopuł, wynikający z różnic technologicznych. Szczegóły pokazane są na **rysunku 4**, który zawiera fragment noty katalogowej tranzystora IRLML0030TR: chodzi o rozrzuty tego parametru. I to niemałe. Jego typowa wartość nas zadowala, minimalna – tym bardziej, bowiem stosunek $U_{zas}/U_{gs(th)}$ rośnie do 3,8, czyli prezentuje się bardzo dobrze. Ale – przy maksymalnej wartości tego parametru – ów współczynnik maleje do niemal 2.

Można teraz obrać dwie drogi: albo poszukać innego tranzystora, w którym maksymalna wartość napięcia $U_{gs(th)}$ będzie (w skrajnie niekorzystnym dla nas wypadku) nie większa niż 1,7 V, albo zastanowić się nad tym, co ów tranzystor ma przełączać. Jeżeli przełączany prąd będzie się zaliczał do kategorii wysokich (jak na tranzystor w obudowie SOT23), rzędu kilku amperów, wówczas intuicyjnie optowałbym za zmianą tranzystora. Ale przy prądzie, załóżmy, 1 A, warto „potargować się z diabłem" i zajrzeć dalej do noty katalogowej. Znajdziemy tam charakterystykę wyjściową, wykreśloną z reguły dla kilku temperatur – **rysunek 5**. Przy zadanym prądzie chcemy uzyskać jak najniższy spadek napięcia, czyli patrzymy na lewą krawędź wykresów (zaznaczoną na czerwono).

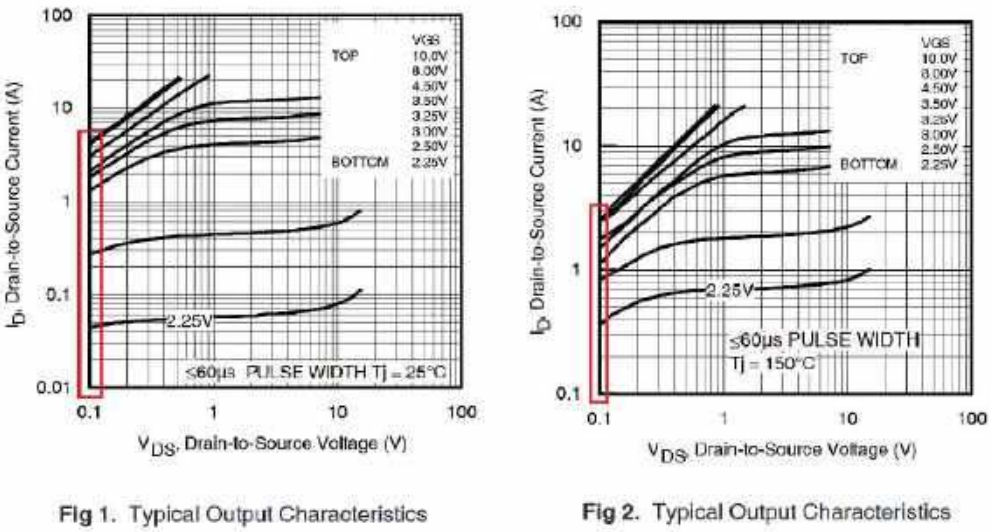
Możemy odczytać, że przy napięciu 4,5 V i przy spadku między drenem a źródłem rzędu 100 mV jesteśmy w stanie pozwolić sobie na przepływ prądu drenu o natężeniu około 3 A (lub nieco mniej przy temperaturze 150°C). Mamy więc około trzykrotny nadmiar względem naszych potrzeb. W praktyce okaże się, że przy prądzie 1 A ów spadek napięcia będzie jeszcze mniejszy, ograniczony już niemal wyłącznie do wartości wynikającej z rezystancji otwartego kanału. Dlatego warto zajrzeć dalej do noty katalogowej, aby nie odrzucać przedwcześnie elementu, który tylko na pierwszy rzut oka wydaje się nieodpowiedni do danej aplikacji.

Michał Kurzela, EP

Electric Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	30	—	—	V	V_{GS} = 0V, I_D = 250µA
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.02	—	V/°C	Reference to 25°C, I_D = 1mA
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	33	40	mΩ	V_{GS} = 4.5V, I_D = 4.2A ②
		—	22	27		V_{GS} = 10V, I_D = 5.2A ②
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	1.3	1.7	2.3	V	V_{DS} = V_{GS}, I_D = 25µA

Rysunek 4. Dopuszczalne rozrzuty napięcia progowego tranzystora IRLML0030TR



Rysunek 5. Charakterystyki wyjściowe tranzystora IRLML0030TR w różnych temperaturach

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Innowacyjne rozwiązania dla budownictwa i rzemiosła

Firma Conrad Electronic – znany dystrybutor komponentów i wyposażenia dla elektroników – jest także zaufanym partnerem w zakresie zaopatrzenia niezbędnego do realizacji publicznych i prywatnych projektów dotyczących infrastruktury budynkowej i e-mobilności.

Przyszłość dotyczy nas wszystkich: branża budowlana i wykwalifikowani specjaliści mają znaczący wkład w tworzenie wydajnej, zrównoważonej i inteligentnej infrastruktury publicznej oraz prywatnej. Dobrze wyszkoleni profesjonaliści potrzebują odpowiedniego sprzętu oraz spersonalizowanych usług, aby z powodzeniem wykonywać swoje zadania w nowych i starszych budynkach. Conrad Electronic zapewnia wszystkie elementy potrzebne do osiągnięcia sukcesu.

Energetyka przyszłości na wyciągnięcie ręki

Efektywność energetyczna i inteligentna infrastruktura to dwa niezbędne warunki dla zrównoważonej przyszłości. Zielona transformacja w sektorze budowlanym jest w pełnym rozkwicie, często wspierana przez inteligentne i zintegrowane rozwiązania automatyki. Conrad Sourcing Platform oferuje profesjonalistom z branży budowlanej szeroki wybór produktów z zakresu inteligentnego sterowania budynkami, innowacyjnych technologii budowlanych, rozwiązań solarnych i e-mobilności. Jedną z dobrze znanych marek jest Fluke – producent przyrządów pomiarowych, oferujący m.in. wielofunkcyjny analizator mocy FLK-SMFT-1000/PRO. Urządzenie to umożliwia optymalizację wydajności systemów fotowoltaicznych poprzez ich ciągłe monitorowanie i wykrywanie usterek na wczesnym etapie.

Więcej informacji:
Conrad Electronic
www.conrad.pl
tel. +48126229800 (pon.-pt. 8–17)
bok@conrad.pl

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Fotografia 1. Dzięki ofercie Conrad Sourcing Platform profesjonaliści z branży budowlanej i rzemiosła mają zapewniony dostęp do najwyższej klasy wyposażenia (źródło: FoxGrafy – stock.adobe.com)

Renowacja zamiast budowy od podstaw: Modernizacja nieruchomości zyskuje na popularności

Obecnie coraz więcej uwagi poświęca się modernizacji i konserwacji istniejących nieruchomości. Także w tym przypadku poszukiwani są wykwalifikowani specjaliści, którzy profesjonalnie zrealizują projekty renowacji i remontów. Dobry partner w zakresie zaopatrzenia wie, co jest ważne w projektach modernizacyjnych. W związku z tym Conrad Sourcing Platform zapewnia najwyższej klasy sprzęt i usługi – od odpowiednich narzędzi poprzez kalibrację urządzeń pomiarowych, aż po zamawianie kabli i węży ciętych na metry. W portfolio znajdują się także precyzyjne technologie pomiarowe, w tym profesjonalne kamery termowizyjne marki Flir, rozwiązania w zakresie zasilania i instalacji elektrycznych oraz produkty niezbędne na placu budowy, takie jak szczypce marki Knipex.

Wszechstronny i bezpieczny sprzęt – do każdego zadania

Zużycie i straty są na budowie codziennością, a każde nowe zlecenie przynosi inne wyzwania. Aby w każdej chwili być gotowym do działania, niezbędny jest odpowiedni sprzęt – ponieważ czas to pieniądz, a profesjonalna praca wymaga wysokiej jakości narzędzi. Niezależnie od tego, czy chodzi o plac budowy, czy warsztat: dzięki szerokiemu asortymentowi klienci biznesowi znajdą na stronie **conrad.pl** odpowiednie wyposażenie do każdego projektu. W ofercie dostępne są również produkty ochrony osobistej marki 3M oraz urządzenia Bosch Professional, których akumulatory, dzięki międzybranżowemu sojuszowi akumulatorowemu, są kompatybilne z wieloma urządzeniami innych producentów.

Conrad – sprawdzony partner w zakresie zaopatrzenia technicznego

Conrad Electronic od 1923 roku jest niezawodnym partnerem w dziedzinie technologii i elektroniki, a dziś jako Sourcing Platform oferuje wszystkie części do udanego zaopatrzenia w produkty techniczne. Klienci biznesowi otrzymują tutaj dokładnie to, czego potrzebują, aby ich projekty lub biznes odniosły sukces: szeroki i wszechstronny asortyment ponad 850 000 produktów, rozwiązania i usługi zorientowane na klienta oraz profesjonalne wsparcie indywidualne. Dzięki dopasowanym rozwiązaniom eProcurement Conrad upraszcza złożone procesy zamówień i pomaga przedsiębiorstwom z różnych branż i o różnej wielkości zaoszczędzić czas i pieniądze. Klienci indywidualni również korzystają z profesjonalnych produktów i usług. Firma rodzinna ma swoją siedzibę w Hirschau (wschodnia Bawaria) i jest reprezentowana na rynku w siedemnastu krajach europejskich.

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Oszczędzanie energii w teorii i w praktyce (5)

W poprzednich częściach naszego cyklu omawialiśmy wybrane aspekty oszczędzania energii z użyciem różnego rodzaju czujników i układów peryferyjnych. Generalnie rezultaty były dość dobre i większość układów pobierała mniej niż miliamper, a i pobór liczony w dziesiątkach mikroamperów też był osiągalny – co zwiastuje długi czas pracy przy zasilaniu bateryjnym lub akumulatorowym. Nic nie stoi zatem na przeszkodzie, by zaprojektować np. monitor środowiska umieszczony w środku lasu, z dala od siedzib ludzkich – układ będzie pracował nawet kilka czy kilkanaście lat. Nie będzie on jednak zbyt przydatny, jeśli nie zapewnimy dostępu do zebranych danych. Potrzebna zatem jeszcze metody łączności bezprzewodowej – takiej, która zagwarantuje niezawodne dostarczenie danych, zapewni maksymalnie duży zasięg i energooszczędność. Pobieżny rzut okiem do not popularnych, gotowych modułów wskazuje, że w najlepszym razie możemy mieć tylko dwie z tych trzech rzeczy. Ale czy aby na pewno? Sprawdzimy to, ale najpierw potrzebne będzie kilka informacji ogólnych o łączności radiowej i dostępnych opcjach.

Poprzednie odcinki znajdują się pod adresem:
https://ulubionykiosk.pl/media

Podstawy łączności radiowej, pasma ISM i ich problemy

W tym artykule nie będzie omawiana dokładnie budowa i zasada działania urządzeń radiowych – zagadnienie to wykracza daleko poza tematykę naszego opracowania. Zachęcamy jednak Czytelników do samodzielnego poszerzania swojej wiedzy w tym zakresie, gdyż jest to fascynująca gałąź elektroniki. Nie zmienia to faktu, że pewne zagadnienia z zakresu komunikacji radiowej i tak muszą być wstępnie omówione.

Moduły łączności radiowej można skategoryzować wedle trybu łączności (jednokierunkowa lub dwukierunkowa), pasma, na którym operują i rodzaju użytej modulacji (OOK/ASK, FSK, PSK). Moduły oferujące łączność jednokierunkową są najtańszą opcją, gdyż wyprodukowanie oddzielnie nadajnika i odbiornika kosztuje mniej niż tworzenie bardziej złożonego transceivera, integrującego obie te funkcje. Podstawową wadą tych układów jest brak jakiejkolwiek gwarancji, że odbiornik otrzyma nadaną informację w całości i bez błędów. Takie rozwiązanie jest dobre do dzwonka bezprzewodowego albo prostego termometru zewnętrznego, gdzie odległość między stacją bazową a nadajnikiem wynosi ledwo kilka metrów. Jeśli jednak chcemy przesyłać istotną telemetrię na duże odległości, rozwiązanie takie jest całkowicie niewystarczające. Z tego też

eprasa.pl f9fe7f8d6b

powodu będziemy omawiać tylko układy łączności dwukierunkowej, oferujące automatyczne potwierdzenie odbioru pakietu danych i automatyczną retransmisję w razie błędów.

Kolejnym istotnym zagadnieniem jest wybór odpowiedniego pasma komunikacyjnego. Wszystkie dostępne od ręki pasma są skategoryzowane jako pasma ISM (ang. Industrial, Scientific, Medical – przemysłowe, naukowe, medyczne), niewymagające licencji. Dopuszczalna moc nadajnika ograniczona jest do czterech watów, ale w kontekście łączności radiowej wartość tę wyraża się jako 36 dBm (decybeli względem jednego miliwata). Jest to maksymalna, efektywna, izotropowa moc nadawania (EIRP – Effective Isotropic Radiated Power), obejmująca zarówno moc samego nadajnika, jak i zysk energetyczny anteny kierunkowej względem teoretycznej anteny izotropowej (nadającej we wszystkich kierunkach z tą samą sprawnością). Im większy zysk energetyczny anteny nadawczej, tym mniejsza moc nadajnika jest potrzebna do uzyskania tego samego zasięgu łączności. Wracając do samych pasm ISM – do wyboru jest kilka różnych zakresów częstotliwości, przy czym nie wszystkie są dostępne we wszystkich krajach na świecie. ITU zezwala na używanie pasma 433 MHz w krajach regionu pierwszego, obejmującego Europę, Afrykę, Wspólnotę Niepodległych Państw, Mongolię i Bliski Wschód na zachód od Zatoki Perskiej, łącznie z Irakiem. Innym, dostępnym globalnie pasmem ISM jest pasmo 2,4 GHz. Przedziałów widma w ramach ISM jest oczywiście więcej, ale nie każde jest obecnie wykorzystywane w praktyce. Duża popularność pasma 433 MHz uczyniła je nadmiernie zatłoczonym, a przez to niezbyt praktycznym, jeśli chcemy uzyskać pewną łączność na duże odległości. Podobnie pasmo 2,4 GHz współdzielone jest przez łączność Wi-Fi, Bluetooth i wiele różnych urządzeń komercyjnych, przez co również na nim czasem może być trudno o uzyskanie pewnej łączności.

W komunikacji cyfrowej stosuje się trzy główne rodzaje modulacji, różniące się poziomem złożoności od strony konstrukcyjnej. Najprostszą formą modulacji, stosowaną w najtańszych modułach 433 MHz, jest modulacja ASK, zwana też OOK. Z praktycznego punktu widzenia nadajnik generuje stałą częstotliwość nośną, a strumień bitowy włącza lub wyłącza wyjście tego nadajnika. Innymi słowy, sygnał jest nadawany lub nie, zależnie od tego, jaki stan panuje na wejściu. Odbiornik wykrywa fale na danej częstotliwości nośnej i zmienia stan swojego wyjścia zależnie od obecności tegoż sygnału. Najprostsze układy tego typu nie oferują żadnej metody kodowania informacji, więc ten obowiązek spada na projektanta. W takiej sytuacji najczęściej stosuje się schemat kodowania Manchester, zaś projektant decyduje o wielkości pakietu, obecności bitów parzystości, sum kontrolnych i tym podobnych elementów poprawiających szansę na odebranie poprawnych danych. Ta forma modulacji ma jeszcze jedną wadę: małą odporność na zakłócenia. Gdy sygnał odbierany jest zbyt słaby, znika w szumach i nie da się go od nich odróżnić. Praktyczna prędkość transmisji jest też ograniczona do maksymalnie stu bitów na sekundę. Z drugiej strony, jeśli zredukujemy szerokość pasma nadajnika i odbiornika do kilkunastu lub kilkudziesięciu herców, co znacznie zwiększy selektywność, a także użyjemy niskiej prędkości nadawania, to w teorii możemy uzyskać ekstremalnie duże zasięgi łączności. Radioamatorzy od lat budują takie układy i osiągają zasięgi nawet kilkuset kilometrów, nadając z mocą liczoną w dziesiątkach miliwatów. W praktyce jednak zaprojektowanie takiego układu i wprowadzenie go na rynek jest wyjątkowo kosztownym przedsięwzięciem ze względu na konieczność certyfikacji każdego układu i modułu nadawczego. Producenci transceiverów biorą te koszty na siebie, wliczając je w cenę pojedynczego modułu – przy produkcji idącej w setki tysięcy sztuk rocznie koszt ten jest pomijalny.

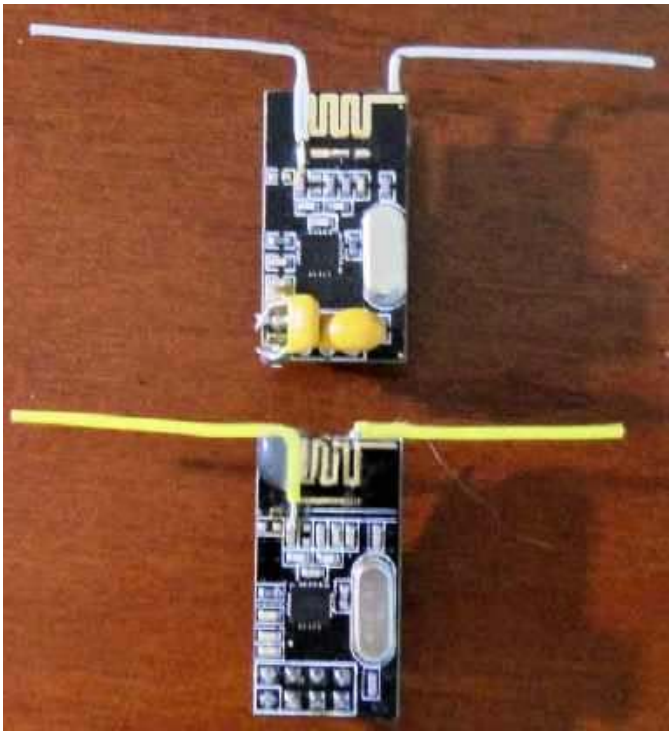
Modulacja FSK polega na nadawaniu sygnału o stałej amplitudzie, którego częstotliwość jest nieznacznie zmieniana zależnie od wartości bitu lub bitów. Układ jest nieco bardziej skomplikowany, ale modulacja FSK – podobnie jak klasyczna FM – jest bardziej odporna na zakłócenia i szumy. Większość modułów rozwiązuje też problem kodowania informacji w pakiety, potwierdzania lub negowania odbioru oraz retransmisji. Poszczególne moduły oferują zróżnicowane maksymalne prędkości transmisji, dla przykładu: moduł RFM12B firmy HopeRF może osiągnąć szybkość wymiany danych na poziomie 115,2 kbps z cyfrowym filtrem i 256 kbps bez niego. Moduł ten nadaje z maksymalną mocą EIRP wynoszącą 7 dBm.

W przypadku modulacji PSK częstotliwość i amplituda nadawania pozostają stałe, a zmieniana jest jedynie faza generowanego sygnału. Zarówno nadajnik, jak i odbiornik, są dużo bardziej skomplikowane, ale sam sygnał okazuje się jeszcze bardziej odporny na zakłócenia, a przez wybranie większej liczby faz pojedynczy symbol może kodować 4, 8 czy 16 różnych wartości, co zwiększa efektywność transmisji – w przypadku tej samej liczby bitów nadajnik pracuje znacznie krócej. Ze względu na większą złożoność, a przez to i cenę, moduły z modulacją PSK są spotykane rzadko, a niewielka korzyść z nieznacznie większego zasięgu, prędkości i tolerancji na zakłócenia czyni je mniej atrakcyjnym wyborem.

Wspomniano o dużym zaśmieceniu pasm 433 MHz i 2,4 GHz. Pasmo 433 MHz jest używane od kilku dekad przez najróżniejsze urządzenia, od dzwonków bezprzewodowych, pilotów bram garażowych czy termometrów po różnego rodzaju zabawki zdalnie sterowane i własne konstrukcje elektroników amatorów. Proste moduły radiowe na to pasmo są wyjątkowo tanie, ale przez to również nie są one najlepiej zaprojektowane ani zbyt dokładnie zestrojone. Chcąc pracować w tym paśmie, projektant urządzenia powinien rozważyć użycie bardziej zaawansowanego modułu radiowego, który pozwoli automatycznie wybrać najlepszy z dostępnych kanałów w obrębie pasma. Zaawansowane moduły zazwyczaj mają wskaźnik jakości połączenia bądź poziomu odbieranego sygnału. W przypadku pasma 2,4 GHz sytuacja wygląda podobnie z tą różnicą, że najniższa część spektrum – pokrywająca się z kanałem 0 Wi-Fi – jest najbardziej zaśmiecona, gdyż ten właśnie kanał jest domyślnym ustawieniem we wszystkich dostępnych na rynku urządzeniach Wi-Fi, a na domiar złego ustawienie to rzadko jest zmieniane przez użytkowników. Warto tu wspomnieć, że moduły w rodzaju bardzo popularnego nRF24L01+ firmy Nordic Semiconductor mają więcej kanałów, niż obejmuje dopuszczalna część pasma ISM 2,4 GHz, rozciągająca się w zakresie od 2,4 GHz do 2,5 GHz. Moduł nRF24L01+ oferuje bowiem maksymalną częstotliwość pracy równą 2,525 GHz. Poza wyborem optymalnego kanału można też zredukować prędkość transmisji danych – ma to szczególny sens, gdy przesyłamy niewielką liczbę bajtów, raz na jakiś czas. Wspomniane moduły nRF24L01+ będą ponawiać nadawanie, póki nie odbiorą pakietu ACK zamiast nACK lub póki nie zostanie wyczerpany limit czasu lub powtórzeń. Moduł automatycznie dodaje do pakietu preambułę ułatwiającą synchronizację oraz sumę kontrolną,

REKLAMA

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Fotografia 1. Moduły nRF24L01+ z dorobionymi antenami dipolowymi ćwierćfalowymi. Efektywny zasięg komunikacji takich modułów uległ podwojeniu względem wersji oryginalnej

co pozwala odbiornikowi automatycznie zweryfikować otrzymany pakiet i potwierdzić odbiór.

Najważniejszym aspektem używania modułów radiowych, mającym największy wpływ na zasięg i niezawodność komunikacji, jest antena. Typowe anteny PCB nie oferują zbyt dobrych parametrów, a ponadto są wrażliwe na orientację nadajnika względem odbiornika. Z drugiej strony tworzenie skomplikowanej anteny typu Yagi-Uda dla maksymalizacji zasięgu może mijać się z celem, dodatkowo niepotrzebnie podnosząc koszty. **Fotografia 1** pokazuje moduł nRF24L01+, w którym antena PCB została odcięta od układu i zastąpiona prostym dipolem wykonanym z drutu (zdjęcie to pojawiło się już w pierwszej części cyklu). Zakładając, że oba moduły mają anteny o zysku 5,19 dBi (wartość idealna dla prostej anteny ćwierćfalowej), sumaryczny zysk wyniesie +10,38 dB i o tyle wzrośnie nasz budżet łącza, oparty na sumie mocy nadajnika i czułości odbiornika.

Warto by było wiedzieć, jaki budżet łącza jest nam faktycznie potrzebny. Możemy na początek policzyć straty propagacji za pomocą poniższego wzoru:

$$L_{FS} = 20log_{10}\left(4\pi\frac{dystans}{dlugoscfali}\right)$$

przy czym dystans i długość fali muszą być wyrażane w tych samych jednostkach. Przy odległości 1 km i częstotliwości nośnej 433 MHz straty propagacji wyniosą około 85,2 dB, a w przypadku 2,4 GHz aż 100 dB. Wartości te są orientacyjne i dotyczą sytuacji, gdy nic nie stoi na drodze między antenami nadajnika i odbiornika. W terenie zabudowanym straty rosną, zwłaszcza w wyższych pasmach częstotliwości. Dla przykładu: straty w budynku biurowym rosną o 30 dB na każde 30 metrów odległości. Biorąc moduły RFM12 i sumując moc nadajnika oraz czułość odbiornika, a także uwzględniając wpływ zewnętrznych anten, zyskujemy łączny budżet ~127 dB, zostawiamy więc sobie niewielki margines. Teoretycznie w przestrzeni biurowej nasze łącze będzie miało zasięg około 120 metrów. Jest to założenie optymistyczne, ale dość realne, jeśli całość jest poprawnie złożona, oprogramowana i ustawiona.

Tabela 1. Średni pobór prądu modułów nRF24L01+ przy transmisji pakietu 8 bajtów raz na sekundę, z trzema automatycznymi powtórzeniami

Tryb	Pobór prądu	Czas	Średni pobór prądu
Standby I	26,0 µA	996,07 ms	25,90 µA
TX	11,3 mA	1,94 ms	21,88 µA
RX	12,6 mA	2,00 ms	25,20 µA
		Razem:	72,97 µA

Największy wróg oszczędzania energii

Spoglądając na notę katalogową nRF24L01+, można dojść do wniosku, że układ ten nie jest zbyt energooszczędny. Gdy moduł znajduje się w trybie Power Down, pobiera średnio 900 nA, a w trybie Standby I, gdy obwody nadawcze i odbiorcze jeszcze nie pracują, pobiera 26 µA. To nie wygląda źle. W trybie Standby II, gdy układ szykuje się do inicjalizacji obwodów RF, pobór rośnie do 325 µA, a start głównego oscylatora wymaga aż 400 µA prądu przez 1,5 ms. Gdy układ nadaje z mocą 0 dBm, pobór rośnie do 11,3 mA, a w czasie pracy w roli odbiornika wartość ta dochodzi do 12,6 mA przy prędkości komunikacji 250 kbps. W tym trybie czułość odbiornika wynosi –93 dBm. Przy mocy nadajnika 0 dBm to jest nasz budżet na połączenie przy prędkości 250 kbps. Moc nadawania można podnieść do 4 dBm kosztem poboru prądu, ale możemy zrezygnować z tej zmiany, gdy użyjemy lepszej anteny.

W rzeczywistości średni pobór prądu przez moduł radiowy jest znacząco niższy. Maksymalny prąd pobierany jest tylko w czasie nadawania i odbioru, przez resztę czasu moduły pozostają w stanie uśpienia lub gotowości. Policzmy zatem, jaki będzie średni pobór prądu modułu nRF24L01+ przy założeniu, że chcemy przesłać osiem bajtów informacji raz na sekundę. Użyjemy rozwiązania, które Nordic nazywa Enchanced ShockBurst. Zakładając prędkość 250 kbps, trzy bajty adresu i dwa bajty CRC, pojedynczy pakiet ma 121 bitów, a jego nadanie trwa 484 µs. Po wysłaniu pakietu układ przełącza się w tryb odbioru i oczekuje na pakiet ACK, typowy czas oczekiwania to 500 µs. Jeśli w tym czasie pakiet nie zostanie otrzymany albo otrzymany zostanie pakiet nACK, układ ponawia transmisję. Załóżmy kiepskie warunki radiowe, przez co pakiet musiał zostać nadany cztery razy. Daje nam to 1,936 ms czasu nadawania i 2 ms czasu odbioru. Przez resztę czasu układ pozostaje w stanie Standby I. Średni pobór prądu pokazano w **tabeli 1**.

Rezultat jest całkiem przyzwoity, niecałe 73 mikroampery średniego poboru prądu przy optymistycznym zasięgu nawet kilometra w idealnych warunkach i około 30 metrów w teście, jaki wykonał twórca modyfikacji z fotografii 1 wewnątrz budynku. Nagle nasz prądożerny moduł okazuje się nie aż taki prądożerny. Należy jednak zaznaczyć, że średni pobór prądu jest niski, ale chwilowy jest znacznie wyższy i jeśli źródło energii ma zbyt duży opór wewnętrzny, napięcie pod tym obciążeniem może nadmiernie spaść, prowadząc do resetu całego urządzenia. Do tego układ nRF24L01+ wymaga napięcia zasilania w zakresie 2,7...3,3 V. Przy zasilaniu z ogniwa litowo-jonowego może mieć sens dodanie wydajnej i energooszczędnej przetwornicy typu Buck. Taka charakterystyka pracy jest jednak typowa dla wielu modułów radiowych, stąd też tak wysokie wartości zalecanej wydajności prądowej zasilacza, które można znaleźć w notach katalogowych.

LoRa, czyli radiolinia dalekiego zasięgu

Oznaczeniem **LoRa** określa się konkretny sposób modulacji i prowadzenia łączności. Skrót ten pochodzi od angielskich słów Long Range, co oznacza łączność długodystansową. Istnieje też druga nazwa – **LoRaWAN** – odnosząca się do protokołu łączności sieciowej, głównie między bramką LoRa a układami końcowymi, podczas gdy samo LoRa odnosi się do sprzętowej implementacji mechanizmu łączności radiowej. LoRa wykorzystuje pasma subgigahercowe oraz modulację spread spectrum

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Tabela 2. Współczynnik rozproszenia a odstęp sygnału od szumu

Współczynnik rozproszenia (SF)	Liczba możliwych wartości symbolu	SNR
7	128	–7,5 dB
8	256	–10 dB
9	512	–12,5 dB
10	1024	–15 dB
11	2048	–17,5 dB
12	4096	–20 dB

(rozproszone widmo), by uczynić sygnał bardziej odpornym na zakłócenia i łatwiejszym do oddzielenia od tła. Dzięki temu łączność LoRa może osiągać zasięg do 10...15 km. Rekordowy dystans łączności LoRa wynosi aż 1336 km – łączność udało się nawiązać pomiędzy transponderem statku płynącego u wybrzeża Portugalii a bramką LoRaWAN na Wyspach Kanaryjskich. Zasięgi sieci LoRa są tak duże ze względu na znaczny budżet łącza, wynoszący typowo 150...170 dB. Poza technologią spread spectrum, zwiększającą odporność na zakłócenia, same pakiety danych mają też znaczną redundancję w formie bitów parzystości i bajtów CRC, dzięki czemu odbiornik może z większą łatwością korygować błędy w odbiorze. Niesie to za sobą jeden, negatywny skutek: dłuższy czas transmisji.

Modulacja spread spectrum polega na przypisaniu każdemu kolejnemu symbolowi informacji kilku...kilkunastu kolejnych bitów transmitowanych przez nadajnik. W przeciwieństwie do bardziej tradycyjnych metod transmisji każdy symbol jest w tym przypadku reprezentowany przez odpowiednio wygenerowany sygnał chirp. Stosunek liczby bitów do liczby zakodowanych przez nie symboli nazywany jest współczynnikiem rozproszenia (Spreading Factor – SF). **Tabela 2** pokazuje tę zależność w standardzie LoRa, a także uzyskany odstęp sygnału od szumu.

Warto zaznaczyć, że wybrany współczynnik rozproszenia musi być znany zarówno przez nadajnik, jak i odbiornik. Drugim, istotnym parametrem jest współczynnik kodowania (Coding Rate – CR). Wartość ta podaje, ile bitów jest używanych do transmisji informacji, kodowanej przez cztery bity danych. Typowe wartości wynoszą od 4/5 do 4/8. Im więcej bitów korekcyjnych, tym łatwiej odbiornik może skorygować błędy spowodowane zakłóceniami. Jeśli ten parametr ma wartość 4/5, oznacza to, że na każde cztery bity danych dodawany jest jeden bit korekcji. Dla CR=4/8, każde cztery bity danych otrzymują cztery bity korekcyjne, a więc właściwy pakiet danych podwaja swoją objętość. Trzecim parametrem determinującym czas transmisji oraz zasięg jest szerokość pasma nadawania. Im to pasmo jest szersze, tym mniejszy będzie zasięg, ale większa przepustowość. Poszczególne kraje ograniczają maksymalną szerokość pasma w różnym stopniu. Dla Polski maksymalna szerokość pasma przy transmisji LoRa w paśmie 433 MHz nie powinna przekraczać 20 kHz. Znając parametry transmisji, można obliczyć dokładnie czas jej trwania – producenci układów LoRa udostępniają stosowne wzory i tabele w swoich notach katalogowych. Dla przykładu: używając modułu Ra-02 z układem SX1278 firmy Nordic, przy współczynniku rozproszenia równym 12 i CR=4/8, czas transmisji pakietu 8 bajtów wyniesie odpowiednio ~4,8 sekundy dla pasma przenoszenia 15,6 kHz i ~9,6 sekund dla 7,8 kHz. Jeśli zredukujemy SF do wartości 8, uzyskamy odpowiednio 332 ms i 665 ms, kosztem redukcji odstępu sygnału od szumu, a zatem i budżetu połączenia. Układ ów przy maksymalnej mocy nadawania pobiera aż **120 mA**. Jeśli transmisja trwa ponad dziewięć sekund, trudno to nazywać energooszczędnością. W takiej sytuacji należy zastanowić się nad zastosowaniem odnawialnego źródła energii, jeśli urządzenie znajduje się w dużej odległości od „cywilizacji".

Fotografia 2. Trzyelementowa antena Yagi firmy Apogee

Wiemy już zatem, że za duży zasięg i sporą odporność na zakłócenia trzeba zapłacić wysoką cenę z punktu widzenia poboru prądu. Ale tylko przy założeniu nadawania z maksymalną mocą. Co, jeśli tę moc zmniejszymy? Nota SX1278 podaje, że przy mocy 7 dBm układ będzie pobierał już tylko 20 mA. Tracimy 13 dB z naszego budżetu połączenia, ale zyskujemy sześciokrotną redukcję zapotrzebowania na energię. Jeśli urządzenie nadawcze jest stacjonarne, można rozważyć zastosowanie anteny o dobrej charakterystyce kierunkowej. Antena typu bi-quad, znana z zastosowań w łączności Wi-Fi, oferuje zysk 7...10 dBi, a bardziej złożona antena Yagi-Uda pozwala uzyskać do 15 dBi (zysk takiej anteny zależy od szerokości pasma i liczby elementów). **Fotografia 2** prezentuje trzyelementową antenę Yagi-Uda na pasmo 433 MHz o zysku 3 dBi, a **fotografia 3** – antenę zawierającą osiem elementów, dzięki czemu osiąga ona zysk 12 dBi. Antena paraboliczna daje 20...60 dBi, zależnie od średnicy anteny, dzięki swojej ekstremalnie dużej kierunkowości. Jeśli jednak urządzenie nadawcze musi być małe i/lub się przemieszcza, jesteśmy ograniczeni do kilku typów anten dookólnych. Zazwyczaj stosuje się wtedy proste anteny monopolowe ćwierćfalowe o zysku ok. 2,15 dBi lub półfalowe o zysku 5,15 dBi. Antena o długości 5/8 fali ma największy zysk, około 6,6 dBi, dalsze zwiększanie jej długości redukuje ten zysk bardzo szybko. Anteny tego typu osiągają te teoretyczne wartości tylko

REKLAMA

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Fotografia 3. Ośmioelementowa antena Yagi produkcji chińskiej

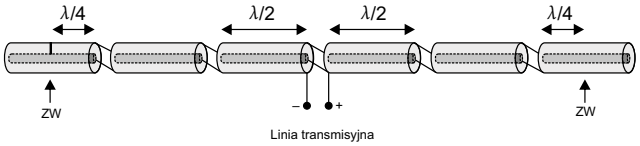
wtedy, gdy znajdują się nad płaszczyzną masy o znacznej wielkości, zazwyczaj równej minimum kilku długościom fali. Większy zysk, nawet do 10 dBi, oferuje antena CoCo (Coaxial Colinear), zbudowana z segmentów przewodu współosiowego o długości połowy fali, których przewodniki i ekrany są ze sobą łączone naprzemiennie, jak na **rysunku 1**. Antena taka ma duże wzmocnienie w płaszczyźnie prostopadłej do samej anteny, ale w pozostałych kierunkach maleje ono dość szybko. Antena CoCo ma duży zysk tylko wtedy, gdy zawiera wiele elementów.

Generalnie rzecz ujmując, anteny dookólne będą wypadać gorzej względem kierunkowych o zbliżonej wielkości lub złożoności. Osobnym zagadnieniem jest dopasowanie impedancji samej anteny do wyjścia modułu radiowego – poszczególne typy anten i różne ich długości osiągają różne impedancje i dobre dopasowanie ich do układu nadajnika jest niezwykle istotne, gdyż w przeciwnym wypadku energia zostanie „odbita" przez antenę z powrotem do układu RF i go uszkodzi. Brak dopasowania prowadzi też do większych strat i gorszej pracy samej anteny.

Innym rozwiązaniem znacznie zwiększającym teoretyczny zasięg łączności LoRa (ale też i łączności z użyciem innych modułów radiowych) jest po prostu użycie wielu modułów tak, by stworzyć sieć typu Mesh na monitorowanym obszarze. Od strony sprzętowej nadal używane są te same moduły, ale oprogramowanie mikrokontrolerów nimi sterujących jest dużo bardziej skomplikowane. Typowym rozwiązaniem jest tworzenie samoorganizującej się sieci, w której każde urządzenie zachowuje w pamięci listę innych urządzeń i najkrótszą drogę do głównego transceivera, czyli bramki. Każde nowe urządzenie nawiązuje łączność z sąsiadami, by poznać swoją lokalizację w sieci i stworzyć listę połączeń. Jeśli jakieś urządzenie zniknie z sieci, sieć się przeorganizuje przy pierwszej próbie nawiązania z nim połączenia. Prymitywniejszą formą takiej sieci jest system, gdzie każde urządzenie po otrzymaniu pakietu odczekuje losowy odstęp czasu dłuższy niż czas transmisji, po czym wysyła ten pakiet ponownie jeden raz. W końcu pakiet taki trafi do bramki. Rozwiązanie tworzące sieć urządzeń będzie oczywiście droższe, ale ma sens, jeśli każdy z węzłów realizuje jakieś zadanie poza funkcjonowaniem tylko w roli routera czy repeatera.

Optymalizacja komunikacji

Moduły radiowe, także LoRa, pobierają spory prąd w trakcie nasłuchu. W przypadku zwykłej łączności FSK czy ASK, pobór prądu w czasie odbioru jest porównywalny do poboru prądu w czasie nadawania. Jeśli mamy zapewnione stałe źródło zasilania, zużycie energii nie stanowi zwykle większego problemu. Jeśli jednak chcemy używać sieci urządzeń zasilanych bateryjnie, to takie rozwiązanie jest absolutnie wykluczone. Zamiast ciągłego nasłuchu urządzenia mogą zsynchronizować swoje zegary, a potem nasłuchiwać tylko co jakiś czas. Dla przykładu: moduł nRF24L01+, nasłuchując tylko przez 10 ms z każdej sekundy, pobierze średnio 149,2 μA. Jeśli jeden cykl nasłuchu będzie miał miejsce co dziesięć sekund, pobór prądu wyniesie średnio 38,6 μA. Dalsze wydłużanie odstępów zbliży nas do średniego poboru prądu w stanie Standby I, czyli 26 μA. Oczywiście możemy całkowicie uśpić



Rysunek 1. Schemat anteny CoCo wykonanej z odcinków przewodu współosiowego. W punktach oznaczonych skrótem ZW oplot przewodu łączy się z rdzeniem

układ nRF24L01+, wtedy pobór prądu spada do 900 nA, ale trzeba też uwzględnić czas potrzebny na wybudzenie układu, czyli około 1,5 ms. W tym czasie układ pobiera większy prąd potrzebny na start rezonatora. Tymczasem przejście z trybu Standby I lub II do odbioru lub nadawania trwa tylko 130 μs. Z drugiej strony nawet po całkowitym uśpieniu układu nadal można go programować, a nawet zapisywać i odczytywać dane z jego buforów TX i RX.

Większość modułów radiowych potrafi mierzyć poziom odbieranego sygnału. Można zatem zoptymalizować komunikację między urządzeniami, by te ustalały między sobą optymalną moc nadawczą i prędkość transmisji. Mniejsza moc da mniejszy pobór prądu, a większa prędkość – krótszy czas nadawania i odbioru. Ma to szczególny sens w łączności LoRa, gdy odległość między urządzeniami lub warunki propagacji są zmienne. Urządzenia mogą też negocjować między sobą najbardziej optymalny kanał, zaczynając od kanału domyślnego. Jeśli przez dłuższy czas urządzenia nie nawiążą udanego połączenia, powinny wrócić do tego kanału domyślnego, minimalnej prędkości i maksymalnej mocy celem wznowienia komunikacji.

Jeśli jedno z urządzeń mierzy kilka parametrów środowiskowych, warto – zamiast przesyłać co sekundę bieżące wartości – raportować tylko zmiany większe niż określony próg minimalny. Dla przykładu stacja pogodowa nie musi raportować każdego podmuchu wiatru, zamiast tego może obliczyć wartość średnią i szczytową w czasie jednej minuty i jeśli ten wynik jest inny niż poprzedni po zaokrągleniu do najbliższego metra na sekundę, to wtedy podawać nowe wartości do stacji bazowej. Inną metodą jest gromadzenie danych, aż przyjdzie żądanie ich dostarczenia. Opaski sportowe i monitory aktywności zazwyczaj komunikują się ze smartfonem tylko wtedy, gdy ten wyśle im zapytanie, dopiero po jego otrzymaniu przekazują wszystkie skumulowane pomiary. Sprytny programista może zaimplementować jakąś formę kompresji danych lub notować tylko zmiany wartości przekraczające określony próg, uwzględniając czas wystąpienia zmiany. Sensowne może też być wybranie takiego momentu komunikacji, gdy poziom zakłóceń od innych urządzeń jest najniższy. W warunkach miejskich, w paśmie 2,4 GHz, „zatłoczenie" spada, gdy ludzie idą spać, wyłączając laptopy, odkładając smartfony i kończąc używanie słuchawek Bluetooth.

Zakończenie

Łączność bezprzewodowa jest fascynującym zagadnieniem, a prowadzenie jej przy ograniczonym budżecie energetycznym – choć mogło się wydawać wyzwaniem nie do przezwyciężenia – okazało się zadaniem może nie prostym, ale też nie przesadnie skomplikowanym. Czytelnika może zdziwić brak omówienia takich rozwiązań, jak Wi-Fi czy modemy sieci 3-, 4- i 5G. W rzeczywistości łączność Wi-Fi jest bardzo prądożerna, a korzyść w formie dużej prędkości transmisji jest tracona przez długi czas nawiązywania połączenia. Dodatkowo jedyną metodą osiągnięcia dużego zasięgu staje się ponownie użycie anten kierunkowych (autor swego czasu korzystał z łącza Wi-Fi na dystansie 2 km z użyciem anteny bi-quad), co sprawia, że w praktyce układy w rodzaju nRF24L01+ stają się bardziej atrakcyjne. Zagadnienie modemów telefonii komórkowej wymaga osobnego artykułu i taki też się ukaże w tym cyklu.

Paweł Kowalczyk, EP

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Zabezpieczanie i organizacja przewodów w urządzeniach elektronicznych

Odpowiednio zabezpieczone i zorganizowane przewody w urządzeniu elektronicznym zmniejszają jego awaryjność oraz ułatwiają serwis bądź ewentualną modyfikację. Ważny jest też aspekt wizualny, który ma wpływ na ocenę urządzenia przez użytkowników. Zaprezentowane w artykule praktyczne rozwiązania mają za zadanie przybliżyć tę bardzo istotną tematykę.

Typy przewodów, które zostaną wykorzystane w urządzeniu, należy ustalić już we wstępnej fazie jego projektowania. Do najbardziej popularnych należą przewody taśmowe, wielożyłowe oraz pojedyncze przewody, skupione w większe wiązki. W zależności od wybranego rodzaju okablowania zmienia się sposób jego zabezpieczenia oraz organizacji.

Fotografia 1. Zastosowanie przewodów taśmowych w urządzeniach modułowych

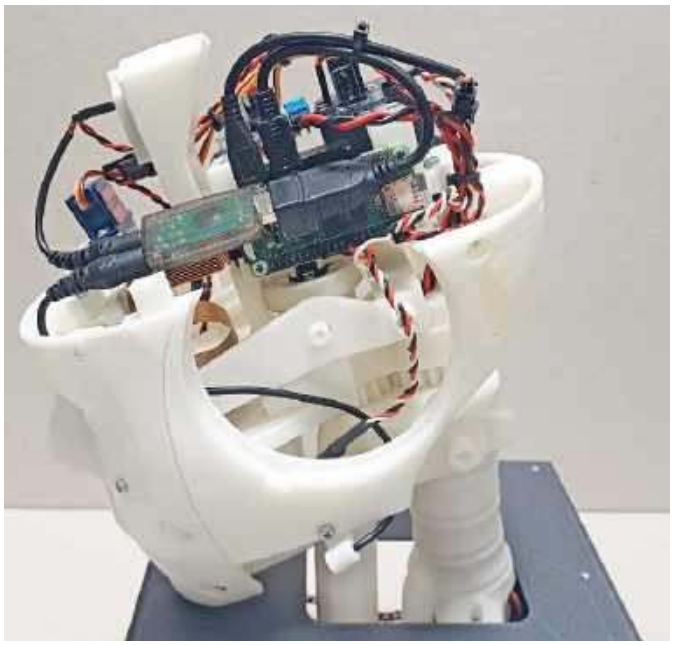
Przewody taśmowe

Jeżeli urządzenie składa się z kilku modułów, często najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie przewodów taśmowych. Przykład pokazuje **fotografia 1**. Jest to wnętrze robota mobilnego, w którym układ elektroniczny został podzielony na kilka połączonych ze sobą bloków funkcjonalnych. Sposób ten świetnie sprawdza się w skomplikowanych urządzeniach prototypowych, wymagających częstych modyfikacji. Przewody taśmowe nie wymagają dodatkowego zabezpieczenia.

Przewody wielożyłowe

Aby zasilić urządzenie elektroniczne z sieci energetycznej, konieczne jest wykorzystanie odpowiedniego przewodu wielożyłowego. Jego najważniejsze parametry to rodzaj przewodu oraz liczba i przekrój żył. Jednak równie istotna jest także informacja o zewnętrznej średnicy przewodu, na podstawie której dobiera się odpowiednią odgiętkę, dzięki której we właściwy sposób przewód zostanie wprowadzony do wnętrza obudowy. Odgiętka zabezpiecza także okablowanie przed uszkodzeniami mechanicznymi. Przykład jej zastosowania pokazuje **fotografia 2**.

Fotografia 2. Odpowiednie wprowadzenie przewodu do obudowy za pomocą odgiętki



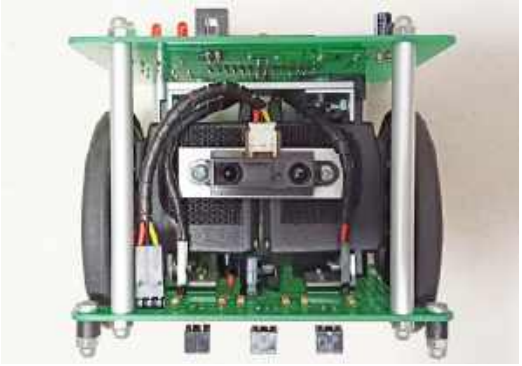
Fotografia 3. Przykład użycia przewodów wielożyłowych

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Przewody wielożyłowe są używane także do przesyłania danych cyfrowych oraz analogowych – często wybiera się do tego celu odmiany wyposażone w ekran ochronny, eliminujący różnego rodzaju zakłócenia. Czasami są one także zakończone specjalistycznymi złączami. Przykładem mogą być przewody wielożyłowe ze złączem jack 3,5 mm, co widać na **fotografii 3**. W ten sposób w głowie robota wykonano połączenia pomiędzy kartą dźwiękową USB a wzmacniaczem audio oraz mikrofonem.

Ponieważ przewody wielożyłowe mają dodatkową izolację, nie jest konieczne ich dodatkowe zabezpieczenie.

Fotografia 4. Połączenia pomiędzy płytką drukowaną a komponentami elektronicznymi znajdującymi się na obudowie urządzenia



Fotografia 5. Zastosowanie spiralnej owijki do zabezpieczenia przewodów

Fotografia 6. Skręcenie ze sobą pojedynczych przewodów

Przewody pojedyncze skupione w większą wiązkę

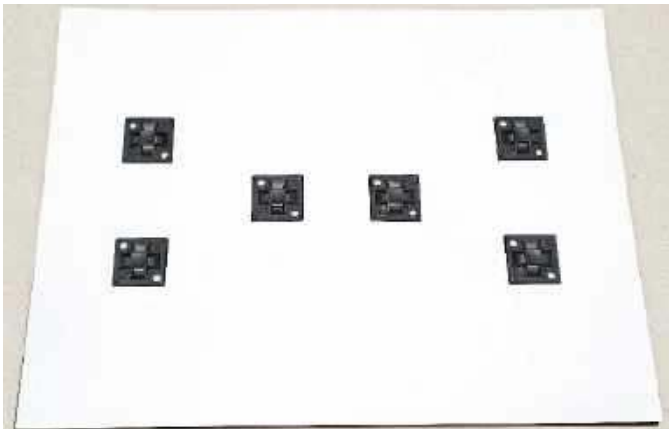
W różnego rodzaju urządzeniach, w których konieczny jest montaż komponentów elektronicznych na panelu obudowy, do wykonania połączeń stosuje się pojedyncze przewody skupione w większe wiązki. **Fotografia 4** prezentuje wnętrze zegara w kształcie robota oraz wykonane połączenia pomiędzy płytką drukowaną i komponentami elektronicznymi, znajdującymi się na obudowie. Jak można zauważyć, na każdą wiązkę kablową jest założony oplot ochronny zakończony osłonami termokurczliwymi. Takie rozwiązanie jest dosyć czasochłonne, ale znacznie zwiększa walory estetyczne wnętrza urządzenia.

Fotografia 7. Spięcie przewodów za pomocą opasek kablowych

Fotografia 8. Spięcie przewodów za pomocą rzepów

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Fotografia 9. Przykładowe uchwyty do organizacji przewodów



Fotografia 10. Pozycjonowanie uchwytów samoprzylepnych za pomocą szablonu

Mniej atrakcyjnym wizualnie, ale za to bardziej praktycznym sposobem na zabezpieczenie przewodów jest spiralna owijka. Jej zaletę stanowi możliwość założenia takiej osłony na już wykonane połączenia pomiędzy komponentami, co nie jest możliwe w przypadku oplotu. Przykład zastosowania spiralnej owijki prezentuje **fotografia 5**.

Jeżeli nie jest konieczne dodatkowe zabezpieczenie okablowania, pojedyncze przewody można ze sobą skręcić. Efekt takiego rozwiązania pokazano na **fotografii 6**.

Organizacja przewodów

Przewodów taśmowych nie ma konieczności organizować, ważne jest tylko, aby były docięte na odpowiednią długość. Jednak zarówno przewody wielożyłowe, jak i pojedyncze skupione w wiązkę, bardzo często wymagają dodatkowego uporządkowania. Czasami wystarczą same opaski kablowe, co można zauważyć na **fotografii 7**.

Alternatywą dla opasek kablowych są rzepy, ich zastosowanie prezentuje **fotografia 8**.

Innym sposobem na organizację przewodów jest zastosowanie różnego rodzaju uchwytów. Dostępne są zarówno modele przyklejane, jak i przykręcane, co widać na **fotografii 9**.

Bardzo istotne jest odpowiednie umiejscowienie uchwytów. Jeżeli zostaną zastosowane uchwyty przykręcane, projektując obudowę, należy przewidzieć do nich otwory montażowe. W przypadku uchwytów przyklejanych dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie szablonów. Metodę tę wyjaśnia **fotografia 10**.

Fotografia 12. Uchwyt kabla zintegrowany z obudową

Dzięki takiemu rozwiązaniu uchwyty zostaną przyklejone prosto i symetrycznie, więc przewody także zachowają odpowiednią estetykę. Przykład przymocowanych przewodów pokazuje **fotografia 11**.

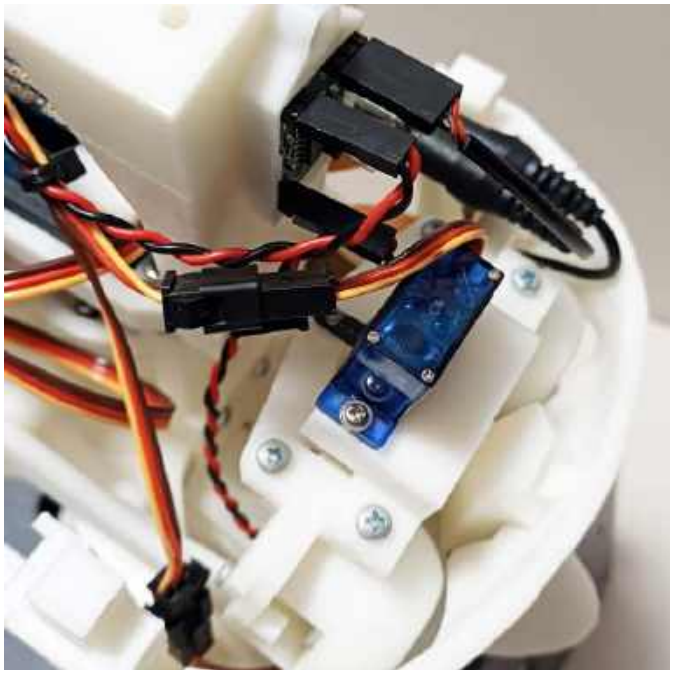
Można również samemu zaprojektować odpowiedni uchwyt zintegrowany z obudową. Takie rozwiązanie można zobaczyć na **fotografii 12**.

Organizacja przewodów jest dosyć czasochłonna, niestety czasami – po pewnym czasie pracy urządzenia – niektóre komponenty mogą ulec uszkodzeniu. W szczególności chodzi o elementy takie jak silniki czy czujniki. Aby nie była konieczna ponowna organizacja przewodów, wystarczy przy stykach takich elementów zastosować dodatkowe złącza. Przykład takiego rozwiązania jest pokazany na **fotografii 13**, gdzie niewielkie złącza zastosowano przy serwomechanizmach sterujących głową robota humanoidalnego.

Mam nadzieję, że zawarte w artykule praktyczne informacje będą inspiracją do budowania bardziej niezawodnych i atrakcyjniejszych wizualnie urządzeń. Zachęcam także do odwiedzenia strony www.zw-robotics.pl, gdzie opisane są urządzenia, w trakcie budowy których kierowano się zasadami zawartymi w artykule. W razie jakichkolwiek uwag lub pytań zapraszam do kontaktu.

Zygmunt Wypich
zygmunt.wypich@zw-robotics.pl

Fotografia 11. Przymocowanie przewodów za pomocą uchwytów



Fotografia 13. Zastosowanie dodatkowych złączy do elementów narażonych na uszkodzenie

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Implementacja systemu Linux na platformie STM32MP (1)

Wszyscy doskonale znamy komputery SBC Raspberry Pi, często używane w wielu projektach amatorskich i komercyjnych. A gdyby tak zastosować płytkę z wydajnym procesorem aplikacyjnym z rodziny STM32? Jakie nowe możliwości daje nam seria STM32MP1? Niniejszy artykuł otwiera nowy kurs, w ramach którego skupimy się na implementacji systemu Linux z wykorzystaniem platformy ewaluacyjnej STM32MP157F-DK2.

Wśród większości pasjonatów elektroniki niezwykle popularne są minikomputery jednopłytkowe (SBC) z rodziny Raspberry Pi. Wynika to z doskonałej dostępności licznych poradników, jak i programów pozwalających użytkownikowi szybko rozpocząć swoją przygodę z systemami operacyjnymi w systemach embedded. Niestety często pojawia się potrzeba zastosowania dodatkowego mikrokontrolera, który musi zostać podłączony do naszej płytki Raspberry Pi – czy to za pośrednictwem USB, czy też UART-a, a to samo w sobie powoduje rozbudowanie całego projektu, na co nie zawsze jest miejsce w obudowie. Warto zwrócić wówczas uwagę na rozwiązania oferowane przez procesory aplikacyjne STM32MP.

Czym jest STM32MP?

Mikroprocesory z rodziny STM32MP znajdują swoje zastosowanie m.in. w systemach wbudowanych opartych na Linuksie, przemysłowych urządzeniach sterujących, IoT, aparaturze medycznej, telekomunikacji i wielu innych. Ogólnie rzecz ujmując: wszędzie tam, gdzie wymagana jest wysoka wydajność, połączona nierzadko z koniecznością implementacji jednego z systemów czasu rzeczywistego (RTOS), opracowanych na mikrokontrolery.

Seria STM32MP13x bazuje na pojedynczym rdzeniu ARM Cortex-A7, zaś rodzina STM32MP151 to również pojedynczy rdzeń ARM, ale z dodatkowym koprocesorem Cortex-M4, zintegrowanym w samym układzie. STM32MP153 i STM32MP157 mają już po dwa rdzenie Cortex-A7 i pojedynczy mikrokontroler Cortex-M4.

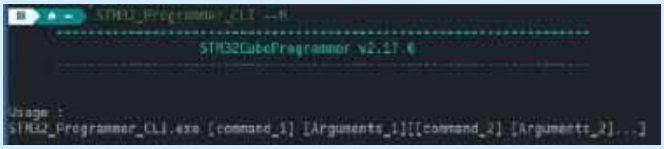
Jeszcze wyżej w rankingach wydajności plasują się rodziny STM32MP251 (pojedynczy rdzeń ARM Cortex-A35 ze zintegrowanym rdzeniem Cortex-M33), STM32MP253 (2 rdzenie ARM Cortex-A35 wraz z rdzeniem Cortex-M33), STM32MP255 i STM32MP257 (z dodatkową jednostką AI NPU, pozwalająca na brzegowe przetwarzanie danych z użyciem algorytmów sztucznej inteligencji).

Jak widać, rodzina mikroprocesorów STM32MP jest bogata w wiele różnych wersji, różniących się liczbą i architekturą rdzeni oraz oferowanymi możliwościami peryferyjnymi. Pomimo tak wielu istotnych różnic, rozpoczęcie przygody z tymi procesorami aplikacyjnymi zaczyna się w dość podobny sposób. W dalszej części artykułu zaprezentuję sposób instalacji systemu Linux Yocto.

W moim przypadku korzystam z komputera z systemem Linux Manjaro. Opisywanej procedury nie testowałem na żadnym innym

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie **https://ulubionykiosk.pl/media**

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Rysunek 1. Pomoc programu STM32_Programmer_CLI

systemie operacyjnym, jednak osoby zaznajomione ze środowiskiem linuksowym powinny bez problemu dostosować poszczególne operacje do posiadanej dystrybucji.

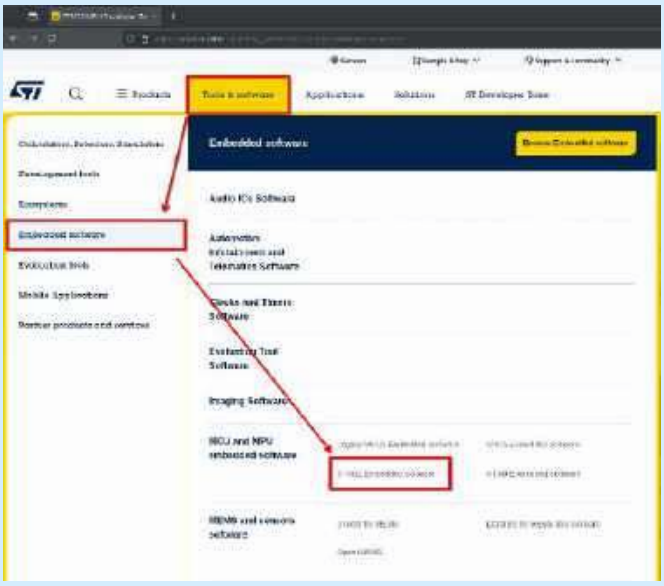
Przygotowanie środowiska

Przed wgraniem systemu do pamięci znajdującej się na płytce ewaluacyjnej, należy zainstalować oprogramowanie STM32CubeProgrammer z oficjalnej strony ST Microelectronics. Oprogramowanie jest darmowe i dostępne na dowolny system operacyjny. Procedura instalacji zależy od używanego OS.

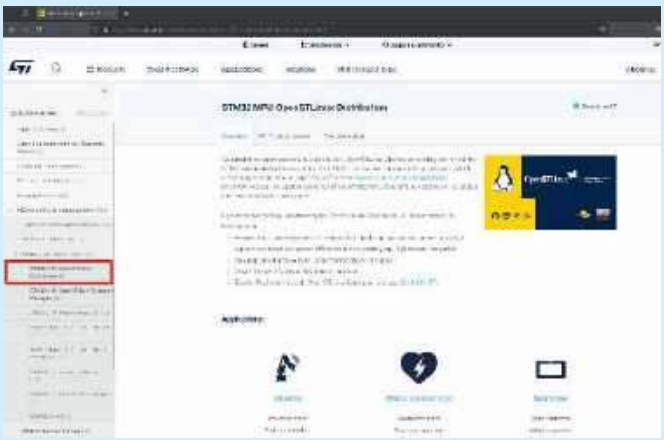
W przypadku systemów Linux należy zainstalować dodatkowy pakiet bibliotek USB-DFU (ang. Device Firmware Update). W przypadku systemów opartych na poszczególnych dystrybucjach polecenie instalacyjne różni się, tj:

- Debian: `sudo apt-get install libusb-1.0-0`
- Arch: `sudo pacman -S libusb`

W następnej kolejności należy nadać uprawnienia do obsługi portu USB programowi STM32CubeProgrammer. Do tego celu służy komenda:



Rysunek 2. Wyszukiwanie repozytorium odpowiedniego do używanej przez nas platformy sprzętowej na stronie https://st.com



Rysunek 3. Wybór systemu operacyjnego na stronie https://st.com

```
cd <STM32CubeProgrammer install directory>/Drivers/rules
```

po wykonaniu której trzeba jeszcze skopiować pliki do odpowiedniego katalogu systemowego:

```
sudo cp *.* /etc/udev/rules.d/
```

Ostatnimi dwiema komendami restartujemy uprawnienia obsługi USB i tym samym nasz program jest w pełni skonfigurowany do pracy:

```
sudo udevadm control -reload-rules
sudo udevadm trigger
```

Po poprawnej instalacji wpisanie polecenia:

```
STM32_Programmer_CLI -h
```

spowoduje wyświetlenia pomocy programu (**rysunek 1**). W przypadku błędnej instalacji należy samodzielnie załadować plik bin do zmiennych systemowych PATH, przy czym procedura różni się w zależności zarówno od posiadanego systemu operacyjnego, jak i samej konfiguracji, tak więc należy wykonać ją samodzielnie.

Wgranie systemu operacyjnego

W tym momencie pozostaje nam już tylko pobranie i wgranie systemu operacyjnego z strony **https://st.com**. Na **rysunkach 2...5** zaprezentowano ścieżkę poruszania się po stronie st.com w celu zlokalizowania interesującego nas pliku. W przypadku chęci wgrania systemu operacyjnego na płytkę STM32MP2 należy wybrać odpowiedni dla niej pakiet instalacyjny. Dalsze kroki pozostają już takie same jak dla STM32MP1. Pobrany plik należy rozpakować do dowolnego folderu – ważne, by przed wykonaniem operacji był on pusty.

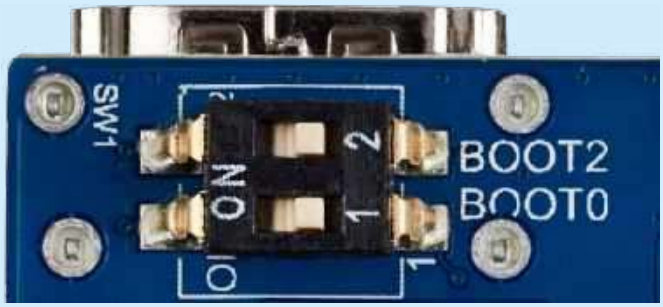
Procedura instalacji systemu Linux na płytce STM32MP157F-DK2 rozpoczyna się od ustawienia przełączników SW1 (sekcje BOOT0 i BOOT2) w pozycji OFF – patrz **fotografia 1**. W następnej kolejności instalujemy kartę pamięci micro SD w slocie kart

Rysunek 4. Wybór właściwego pakietu oprogramowania

Rysunek 5. Przycisk pobierania oprogramowania STM32MP157F-DK2 (https://t.ly/muTqI)

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie
https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Fotografia 1. Właściwe ustawienie przełączników BOOT0 i BOOT2 na płytce

Rysunek 6. Odczyt indeksu portu USB za pomocą komendy STM32_Programmer_CLI -l usb

Rysunek 7. Komenda instalacji systemu operacyjnego

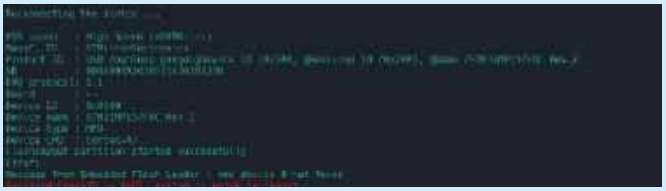
i podłączamy zasilanie (gniazdo USB C PWR). Drugi port USB C OTG podłączmy do komputera – zostanie on użyty do instalacji systemu na karcie pamięci.

Interesuje nas numer portu, pod którym identyfikuje się podłączone urządzenie – w terminalu wpisujemy więc polecenie:

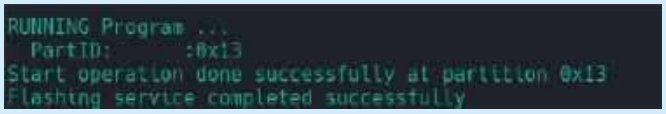
```
STM32_Programmer_CLI -l usb
```

zaś potrzebny nam indeks portu odczytujemy w pierwszej linii wyświetlonej listy parametrów (**rysunek 6**). Następnym poleceniem jest:

```
STM32_Programmer_CLI  port=[port]  -w  [sciezka_do_pliku_z_rozszerzeniem_.tsv]
```



Rysunek 8. Komunikat wyświetlany w przypadku użycia źle sformatowanej karty pamięci



Rysunek 9. Widok okna terminalu w czasie instalacji systemu operacyjnego

Rysunek 10. Ekran wyświetlany po prawidłowym przeprowadzeniu procesu instalacji systemu operacyjnego (https://t.ly/muTqI)

(patrz **rysunek 7**). Warto zaznaczyć, że w tym momencie powinniśmy znajdować się w folderze zawierającym nasz wcześniej wypakowany plik. W przypadku źle sformatowanej karty pamięci otrzymamy komunikat widoczny na **rysunku 8.** Należy wówczas ponownie wykonać formatowanie – zalecany system plików to FAT-32. Prawidłowa instalacja jest procesem powolnym i może trwać nawet do 20 minut, tak więc należy uzbroić się w cierpliwość na tym etapie pracy (**rysunek 9**).

Po zakończeniu instalacji odłączamy zasilanie płytki, przełączamy przełączniki SW1 (BOOT0 i BOOT2) w pozycję ON, a następnie ponownie podłączamy zasilanie. W tym momencie również należy uzbroić się w cierpliwość, pierwsze uruchomienie systemu wymaga bowiem dodatkowego czasu – każde kolejne będzie już znacznie szybsze. **Rysunek 10** prezentuje widok ekranu poprawnie uruchomionej płytki.

inż. Wiktor Hubaj

REKLAMA

Programowanie modułów ESP32 w środowisku ESP-IDF (6)

Interfejs I²C

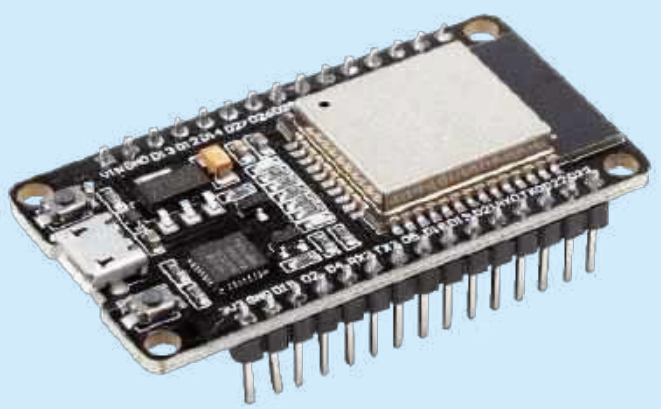
Poprzednie odcinki znajdują się pod adresem: **https://ulubionykiosk.pl/media**

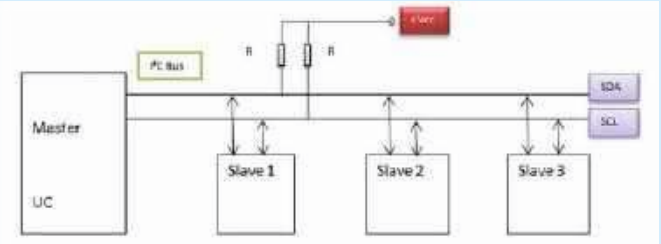
Protokół I²C opracowany został jeszcze w latach 80. minionego wieku, ale wciąż jest stosowany w praktyce. Służy do wymiany danych (najczęściej w ramach jednej płytki drukowanej) pomiędzy układami scalonymi, wyposażonymi w interfejs pozwalający na podłączenie i komunikację za pomocą wspólnej magistrali. ESP32 wspiera protokół I²C od strony sprzętowej, zaś środowisko ESP-IDF zapewnia niezbędne wsparcie programistyczne.

Główne cechy protokołu I²C

Protokół I²C jest szeregowym, synchronicznym protokołem dwukierunkowej wymiany danych. Od strony elektrycznej magistrala składa się z dwóch linii: do przesyłania danych (oznaczanej najczęściej jako SDA) oraz zegarowych impulsów synchronizujących (oznaczanej jako SCL). Interfejsy wszystkich układów dołączonych do magistrali są typu otwarty dren, więc mogą aktywnie wymusić na magistrali jedynie stan niski. Z tego powodu linie SDA i SCL muszą być podciągane do napięcia zasilania za pomocą osobnych oporników. Układy podłączone do magistrali pełnią funkcję mastera (układu nadrzędnego) lub slave'a (układu podrzędnego). Na **rysunku 1** pokazano schemat typowej magistrali I²C z podłączonymi układami.

Każdą transmisję – zarówno zapisu, jak i odczytu danych pomiędzy masterem a slave'em – zawsze inicjuje urządzenie nadrzędne. Przesył danych otwiera sekwencja START, po której wysyłany jest 7-bitowy (lub, w trybie rozszerzonym, 10-bitowy) identyfikator układu, do którego kierowana jest transmisja. Poziom ostatniego, ósmego bitu identyfikatora określa, czy chodzi o zapis (poziom niski), czy odczyt (poziom wysoki). Urządzenie, którego identyfikator został wysłany, potwierdza swoją gotowość sygnałem ACK, czyli wymusza na linii SDA stan niski w czasie 9. taktu zegara. W następnej kolejności, w przypadku zapisu, wysyłane są przez mastera bajty danych. W przypadku odczytu to zaadresowane urządzenie podrzędne wysyła bajty danych w takt zegara SCL. Transmisję zamyka sekwencja STOP, po której magistrala powinna zostać zwolniona.





Rysunek 1. Schemat typowej magistrali I²C z podłączonymi układami

Interfejsy API sterowników I²C

ESP32 ma wbudowane dwa kontrolery sprzętowe odpowiedzialne za obsługę komunikacji za pośrednictwem magistrali I²C. Pojedynczy kontroler I²C może działać jako master lub slave. Do podłączenia do magistrali I²C służą predefiniowane porty: GPIO21 jako SDA i GPIO22 jako SCL, jednak można te funkcje zmienić programowo i wybrać inne linie wejścia/wyjścia.

ESP-IDF dostarcza bibliotekę driver/i2c.h, która steruje blokami peryferyjnymi I²C modułu ESP32. Najistotniejsze procedury biblioteki to:

- `i2c_param_config()` – inicjalizacja sterownika I²C. Funkcja ma dwa parametry:
  - `i2c_port_t` – numer portu: I²C_NUM_0 lub I²C_NUM_1,
  - `i2c_config_t` – wskaźnik na strukturę zawierającą takie parametry konfiguracyjne, jak: tryb pracy, numery użytych portów GPIO do podłączania linii SDA i SCL, prędkość

```
i2c_config_t conf = {
 .mode = I²C_MODE_MASTER, //tryb pracy
 .sda_io_num = 21, //numer GPIO połączony z SDA
 .scl_io_num = 22,  //numer GPIO połączony z SCL
 .sda_pullup_en = GPIO_PULLUP_ENABLE, //włączenie wewnętrznego podciągania SDA
 .scl_pullup_en = GPIO_PULLUP_ENABLE,  //włączenie wewnętrznego podciągania SCL
 .master.clk_speed = 400000, //szybkość zegara
};
```

Listing 1. Przykładowa definicja struktury i2c_config_t

```
#include <stdio.h>
#include „driver/i2c.h”
#include „esp_log.h”

#define I²C_MASTER_SCL_IO 4           // Wybór pinu SCL
#define I²C_MASTER_SDA_IO 5           // Wybór pinu  SDA
#define I²C_MASTER_NUM I²C_NUM_0       // Wybór portu I²C
#define I²C_MASTER_FREQ_HZ 100000      // Ustawienie częstotliwości zegara I²C frequency (100 kHz)
#define I²C_MASTER_TX_BUF_DISABLE 0    // Wyłączenie bufora TX
#define I²C_MASTER_RX_BUF_DISABLE 0    // Wyłączenie bufora RX

static const char *TAG = „i2c_scanner”;
```

Listing 2. Dołączenie plików nagłówkowych i definicja najważniejszych stałych (na podstawie: [1])

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie **https://ulubionykiosk.pl/media**

eprasa.pl f9fe7f8d6b

```
void i2c_master_init() {
    // Konfiguracja ustawień mastera I²C
    i2c_config_t conf;
    conf.mode = I²C_MODE_MASTER;
    conf.sda_io_num = I²C_MASTER_SDA_IO;
    conf.sda_pullup_en = GPIO_PULLUP_ENABLE;
    conf.scl_io_num = I²C_MASTER_SCL_IO;
    conf.scl_pullup_en = GPIO_PULLUP_ENABLE;
    conf.master.clk_speed = I²C_MASTER_FREQ_HZ;
    conf.clk_flags = 0;
    // Zastosowanie konfiguracji do drivera I²C
    i2c_param_config(I²C_MASTER_NUM, &conf);
    // Instalacja drivera I²C
    i2c_driver_install(I²C_MASTER_NUM, conf.mode, I²C_MASTER_RX_BUF_DISABLE, I²C_MASTER_TX_BUF_DISABLE, 0);
}
```

Listing 3. Ciało funkcji inicjalizującej kontroler I²C (na podstawie: [1])

zegara. Przykład struktury można zobaczyć na **listingu 1.**

i2c_driver_install() – instalacja sterownika. Funkcja ma 5 parametrów:

- i2c_port_t – numer portu I²C,
- i2c_mode_t – tryb pracy: master lub slave,
- kolejne 2 parametry określają rozmiar buforów: nadawczego i odbiorczego. Jeżeli urządzenie będzie pracować w trybie mastera, mogą być one ustawione na 0,
- ostatni parametr to flagi związane z przerwaniami. Jeżeli w obsłudze magistrali I²C nie korzystamy z przerwań, wartość parametru może wynosić 0.

```
void i2c_scanner() {
    printf("Scanning I²C bus...\n");
    // Iteracja po wszystkich możliwych adresach I²C
    for (int addr = 1; addr < 127; addr++) {
        // Utworzenie uchwytu co listy poleceń I²C
        i2c_cmd_handle_t cmd = i2c_cmd_link_create();
        i2c_master_start(cmd);
        // Wysyłka adresu I²C z bitem zapisu
        i2c_master_write_byte(cmd, (addr << 1) | I²C_MASTER_WRITE, true);
        i2c_master_stop(cmd);

        // Wykonanie poleceń I²C i sprawdzenie odpowiedzi
        esp_err_t ret = i2c_master_cmd_begin(I²C_MASTER_NUM, cmd, pdMS_TO_TICKS(1000));
        i2c_cmd_link_delete(cmd);

        // Jeżeli urządzenie odpowiada, zwracamy jego adres do konsoli
        if (ret == ESP_OK) {
            printf("Found device at address 0x%02x\n", addr);
        }
    }
    printf("I²C scan complete.\n");
}
```

Listing 4. Ciało funkcji realizującej skanowanie szyny I²C (na podstawie: [1])

i2c_master_write_to_device() – wysłanie danych do urządzenia podrzędnego. Funkcja może być wywoływana tylko w celu obsługi układów pracujących w trybie master i przyjmuje 5 parametrów:

- i2c_port_t – numer portu I²C,
- device_address – 7-bitowy adres urządzenia podrzędnego, do którego będą zapisywane bajty danych,
- write_buffer – wskaźnik do bufora z bajtami do wysłania,
- write_size – rozmiar bufora zapisu (wyrażony w bajtach),
- ticks_to_wait – maksymalny czas oczekiwania na zakończenie przesyłania danych.

Funkcja jest dostępna, począwszy od wersji ESP-IDF v.4.4. Alternatywnie można używać funkcji i2c_cmd_link_create(), i2c_master_start(), i2c_master_write_byte(), i2c_master_write(), i2c_master_stop(), i2c_master_cmd_begin(), i2c_cmd_link_delete().

i2c_master_read_from_device() – odczyt danych z urządzenia podrzędnego. Funkcja może być wywoływana tylko do obsługi układów pracujących w trybie master i ma 5 parametrów:

- i2c_port_t – numer portu,
- device_address – 7-bitowy adres urządzenia podrzędnego, z którego będą odczytywane bajty danych,
- read_buffer – wskaźnik do bufora odczytywanych danych,
- read_size – rozmiar bufora odczytu (w bajtach),
- ticks_to_wait – maksymalny czas oczekiwania na zakończenie odczytu danych.

Funkcja jest dostępna od ESP-IDF v.4.4. Alternatywnie można używać funkcji i2c_master_start(), i2c_master_write(), i2c_master_read(), itd.

Przykład oprogramowania korzystającego z interfejsu I²C

W katalogu /esp-idf/esp-idf-v4.4/examples/peripherals/i2c znajdują się przykłady programów dla środowiska ESP-IDF v.4.4, które w swoim działaniu implementują obsługę interfejsu I²C. Program **i2c_simple** pokazuje, jak nawiązać komunikację z dołączonym do magistrali I²C układem MPU9250 i jak odczytać jego rejestr zawierający kod identyfikujący. W przykładzie **i2c_self_test** pokazano sposób odczytu danych z sensora BH1750, a dodatkowo zademonstrowano komunikację pomiędzy dwoma modułami ESP32 dołączonymi do magistrali współdzielonej z sensorem: jeden z modułów pełni funkcję nadrzędną, a drugi – podrzędną. Program **i2c_tools** zawiera zestaw narzędzi programistycznych pozwalających na: konfigurację portów GPIO ESP32 modułu dołączanych do magistrali I²C, skanowanie magistrali w poszukiwaniu dołączonych układów z interfejsem I²C, a także odczytywanie i zapis danych do rejestrów dostępnych za pośrednictwem I²C.

Jako przykład użycia biblioteki driver/i2c.h posłuży nam jeszcze inny program, dostępny w internecie pod adresem [1]. Jest to aplikacja prostego skanera dołączonych do magistrali układów z interfejsem I²C. Program pozwala wykryć adresy wszystkich układów, które potwierdzą sygnałem ACK wysłany adres odczytu. Program kolejno wysyła w pętli 7-bitowe adresy w zakresie od 1 do 127 i oczekuje na potwierdzenie. Jeżeli w odpowiedzi na wysłany adres pojawi się potwierdzenie (sygnał ACK), moduł wyśle na konsolę komunikat informujący o adresie wykrytego układu.

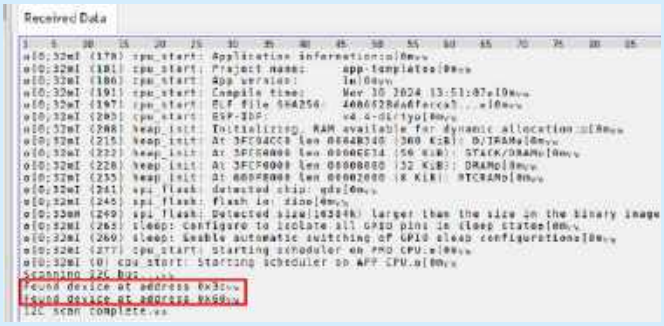
Na **listingu 2** pokazano pliki nagłówkowe wszystkich dołączanych bibliotek, w tym najważniejszej dla nas w tym momencie biblioteki funkcji do obsługi interfejsu (i2c.h). Dodatkowo zdefiniowano porty GPIO 4 i 5 do obsługi linii SCL i SDA, numer użytego kontrolera (portu), a także szybkość zegara SCL (100 kHz). Zadeklarowano także fakt, że bufory transmisji Rx i Tx nie będą używane.

Listing 3 zawiera procedurę inicjalizacji obsługi magistrali I²C. Na początku procedury i2c_master_init() wywoływana jest funkcja i2c_param_config(), ustawiająca parametry sterownika. Kolejna funkcja i2c_driver_install() instaluje i inicjalizuje działanie kontrolera.

Pokazana na **listingu 4** funkcja i2c_scanner() realizuje podstawowe zadanie programu, którym jest wyszukiwanie dołączonych do magistrali I²C układów. Do wykonania tej operacji użyte zostały funkcje API realizujące kolejne kroki zaadresowania i uzyskania potwierdzenia od urządzenia podrzędnego.

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Rysunek 2. Efekt działania programu

```
void app_main() {
    // Inicjalizacja mastera I²C
    i2c_master_init();
    // Start skanowania magistrali I²C
    i2c_scanner();
}
```

Listing 5. Ciało funkcji main (na podstawie: [1])

i2c_cmd_link_create() – funkcja utworzenia i inicjalizacji listy poleceń I²C. W przypadku powodzenia zwracany jest uchwyt do bufora listy, zaś w przypadku wystąpienia błędu – wartość 0.

i2c_master_start() – polecenie wygenerowania sekwencji START. Parametrem jest uchwyt do bufora listy. Funkcja może być wywoływana tylko w przypadku urządzenia pracującego w trybie master.

i2c_master_write_byte() – funkcja wysyłania pojedynczego bajtu na magistralę I²C, wywoływana z trzema parametrami:

- cmd_handle – uchwyt do bufora listy,
- dane – wysyłany bajt danych. W omawianym przykładowym programie na pierwszych 7 bitach znajduje się adres urządzenia podrzędnego, a ostatni, ósmy bit przyjmuje poziom niski, wskazując, że mamy do czynienia z operacją zapisu,
- ack_en – flaga włączenia oczekiwania na potwierdzenie ACK. W omawianym przykładzie parametr ma wartość 1 (true).

Funkcja może być wywoływana tylko w przypadku urządzenia pracującego w trybie master.

i2c_master_stop() polecenie wygenerowania sekwencji STOP. Parametrem jest uchwyt do bufora listy. Funkcja może być wywoływana tylko w odniesieniu do bloku skonfigurowanego jako master.

i2c_master_cmd_begin() funkcja wysyłania wszystkich poleceń I²C z listy, wywoływana z 3 parametrami:

- i2c_num – numer portu I²C, który ma być zastosowany do transmisji (0 lub 1),
- cmd_handle – uchwyt do bufora listy,
- ticks_to_wait – maksymalna liczba taktów oczekiwania przed zgłoszeniem osiągnięcia limitu czasu.

Funkcja zwraca predefiniowaną wartość ESP_OK, jeżeli wszystkie polecenia zakończyły się powodzeniem. W przypadku omawianego przykładowego programu oznacza to odebranie potwierdzenia ACK od urządzenia podrzędnego.

Funkcja może być wywoływana tylko w odniesieniu do bloku I²C pracującego w trybie master.

i2c_cmd_link_delete() funkcja usuwania używanej listy poleceń, wywoływana z jednym parametrem:

- cmd_handle – uchwyt do bufora listy do usunięcia.

Wszystkie polecenia wpisywane są na listę poleceń cmd_handle, następnie zostają one zrealizowane, po czym lista jest usuwana w pętli, której licznik stanowi adres wywoływanego urządzenia podrzędnego. Zakres adresu od 1 do 127 wyczerpuje wszystkie dostępne adresy urządzeń w trybie 7-bitowym, które mogą być podłączone do magistrali I²C. Jeżeli urządzenie jest fizycznie podłączone, zostanie wykryte, a na na konsolę trafi stosowny komunikat, po czym pętla przejdzie do poszukiwania urządzenia o kolejnym numerze. Po przetestowaniu wszystkich adresów na konsolę wysłane zostaje powiadomienie o tym fakcie, a program opuści funkcję i2c_scanner().

Listing 5 zawiera funkcję main(), odpowiedzialną za inicjalizację magistrali I²C i jednokrotne jej przeszukanie.

Efekt działania programu pokazany został na **rysunku 2**. Program wykrył, że do magistrali przyłączone zostały dwa układy o adresach 7-bitowych: 0x3C i 0x60. W celu polepszenia pewności działania programu wskazane jest podciągnięcie linii SDA i SCL do poziomu napięcia zasilającego przez dwa oporniki, np. 10 kΩ.

Ryszard Szymaniak, EP

[1] https://saludpcb.com/i2c-scanner-using-esp32-idf/

REKLAMA

Wydawnictwo AVT nawiąże współpracę redakcyjną z osobami dobrze operującymi terminologią elektroniki i słowem pisanym. Propozycja szczególnie interesująca dla nauczycieli elektroniki, autorów artykułów, skryptów i książek.

Aplikacje prosimy kierować na adres: redakcja@elportal.pl

Kurs Nordic nRF z BT (6)

Bluetooth LE – urządzenie centralne

Tym razem nasza płytka wystąpi w roli urządzenia centralnego (central), które będzie zarządzać połączeniami z innymi urządzeniami BLE. Użyjemy wbudowanych w Zephyr komend shellowych, aby dowiedzieć się więcej o stosie BLE.

Do tej pory nasza płytka deweloperska nRF5340DK działała jako urządzenie typu peripheral, czyli serwer w architekturze Bluetooth Low Energy. Po włączeniu moduł rozpoczynał rozgłaszanie (advertising) i oczekiwał na połączenie z telefonem lub innym klientem (central). Po nawiązaniu połączenia możliwe było sterowanie diodą LED za pomocą aplikacji nRF Connect, z użyciem charakterystyk zdefiniowanych w oprogramowaniu płytki.

Fotografia 1. Pilot BLE

O ile wygodniej byłoby jednak, gdybyśmy mogli włączać i wyłączać diodę za pomocą dedykowanego pilota BLE, bez potrzeby korzystania ze smartfona. Taki pilot pozwoliłby na szybkie i wygodne sterowanie urządzeniem, szczególnie w sytuacjach, gdy sięganie po telefon jest niepraktyczne. Przykład takiego urządzenia pokazuje **fotografia 1**.

Piloty zdalnego sterowania oparte na BLE można znaleźć na portalach aukcyjnych i w sklepach z elektroniką. Często są oferowane pod nazwą „Bluetooth Media Button" lub „przycisk Bluetooth" i domyślnie są przeznaczone do sterowania funkcjami multimedialnymi, takimi jak regulacja głośności czy odtwarzanie utworów na smartfonach. Aby taki pilot współpracował z naszą płytką, niezbędne jest, aby działał w standardzie Bluetooth Low Energy (BLE), ponieważ zestaw nRF5340DK obsługuje jedynie tę wersję protokołu Bluetooth.

Poprzednie odcinki znajdują się pod adresem:
https://ulubionykiosk.pl/media

Warto pamiętać, że wielu producentów nie podaje jednoznacznie, czy ich urządzenie wspiera standard BLE, a klasyczny Bluetooth nie jest kompatybilny z BLE. Dlatego – dla pewności – najlepiej wybrać pilot przynajmniej w wersji Bluetooth 4.2, który niemal zawsze zawiera BLE. Kupno odpowiedniego modelu pozwoli na integrację z płytką nRF5340DK i umożliwi wykorzystanie pilota jako urządzenia HID (Human Interface Device), co otwiera możliwość użycia funkcji BLE do komunikacji i sterowania. Możemy też skorzystać z klawiatury pracującej w standardzie BLE.

Co to jest HID?

HID to standard komunikacji określający zasady wymiany danych między urządzeniami typu **Device** (np. pilotem lub klawiaturą) a urządzeniami typu **Host** (takimi jak smartfon, komputer

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie **https://ulubionykiosk.pl/media**

eprasa.pl f9fe7f8d6b

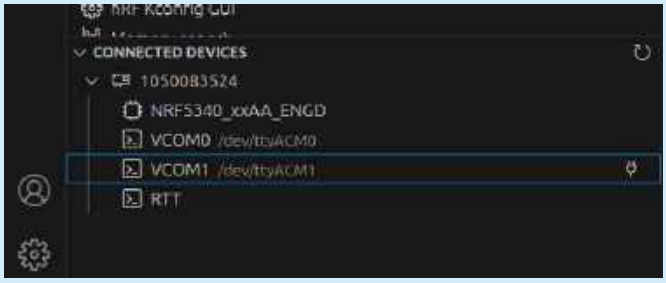
czy, w omawianym przypadku, nasza płytka deweloperska). Standard ten pierwotnie powstał na potrzeby urządzeń USB, aby mogły one pracować na jednolitych zasadach, bez konieczności instalowania dodatkowych sterowników.

W technologii Bluetooth rozróżniamy dwa jego warianty:

1. Classic Bluetooth HID – standard działający w ramach tradycyjnego protokołu Bluetooth, stosowany tam, gdzie wymagana jest większa przepustowość i szybkość transmisji danych.
2. Bluetooth Low Energy HID – zoptymalizowany pod kątem urządzeń o niskim poborze mocy, takich jak piloty, klawiatury czy myszki. Często nazywany jest też HID over GATT (HoG).

My przyjrzymy się drugiemu wariantowi.

W kontekście BLE, HID to profil Bluetooth – czyli specyfikacja opisująca konkretny przypadek użycia komunikacji. Profil można uznać za zbiór scenariuszy użycia określających, jak serwisy i charakterystyki współpracują ze sobą w celu realizacji konkretnej funkcjonalności. Aby lepiej zobrazować zagadnienie, posłużymy się przykładem: profil baterii opisuje nam, jak i kiedy informacja o stanie baterii zostanie przesłana przez cały stos Bluetooth.



Rysunek 1. Port COM skojarzony z shellem

```
CONFIG_BT_CENTRAL=y
CONFIG_BT_GATT_CLIENT=y
CONFIG_BT_SHELL=y
```

Listing 1. Plik prj.conf – dodatkowe opcje

```
uart:~$ help
Please press the <Tab> button to see all available commands.
You can also use the <Tab> button to prompt or auto-complete all commands or its subcommands.
You can try to call commands with <-h> or <--help> parameter for more information.

Shell supports following meta-keys:
 Ctrl + (a key from: abcdefklnpuw)
 Alt  + (a key from: bf)
Please refer to shell documentation for more details.

Available commands:
 bt       : Bluetooth shell commands
 clear    : Clear screen.
 device   : Device commands
 devmem   : Read/write physical memory
            Usage:
            Read memory at address with optional width:
            devmem address [width]
            Write memory at address with mandatory width and value:
            devmem address <width> <value>
 gatt     : Bluetooth GATT shell commands
 gpio     : GPIO commands
 help     : Prints the help message.
 history  : Command history.
 kernel   : Kernel commands
 led      : LED
 rem      : Ignore lines beginning with 'rem '
 resize   : Console gets terminal screen size or assumes default in case the
            readout fails. It must be executed after each terminal width change
            to ensure correct text display.
 retval   : Print return value of most recent command
 shell    : Useful, not Unix-like shell commands.
uart:~$
```

Listing 2. Wynik polecenia help

Konfiguracja płytki

Zaczniemy od rekonfiguracji projektu w pliku prj.conf (**listing 1**).

Ponieważ pilot działa jako urządzenie peryferyjne (peripheral), zadaniem naszej płytki będzie połączenie się z nim jako urządzenie centralne (central). Pierwsza z nowych opcji konfiguracyjnych włącza tę rolę na poziomie warstwy GAP. Kolejna opcja pozwala płytce działać jako klient na poziomie warstwy GATT.

Zephyr umożliwia kontrolę nad Bluetooth za pomocą poleceń dostępnych w shellu, co pozwala na skonfigurowanie połączenia bez potrzeby pisania dodatkowego kodu. Trzecia opcja dodaje komendy związane z BLE do konsoli.

Aby uniknąć konfliktów, wyłączmy dotychczasowe użycie Bluetooth, które mogłoby przeszkadzać w eksperymentach. Wystarczy zakomentować wywołanie funkcji bt_control_init() w pliku main.c z poprzedniej części kursu. To właśnie zaleta modułowego kodu – sterowanie rozbudowaną funkcjonalnością można realizować za pomocą pojedynczych linii.

Teraz wystarczy skompilować projekt, wgrać go na płytkę i można zaczynać zabawę.

Zabawa shellem

W trzecim odcinku naszego kursu dość powierzchownie zapoznaliśmy się z shellem Zephyra. W tej części będziemy go intensywnie używać. Aby lepiej go poznać i sprawdzić, czy komendy Bluetooth zostały poprawnie dodane, wpiszmy polecenie **help** w terminalu z logami i shellem. Port tego terminalu jest wyświetlony we wtyczce nRF Connect w sekcji CONNECTED DEVICES (**rysunek 1**). Poprawny wynik działania polecenia prezentuje **listing 2**.

Warto zauważyć, że shell w Zephyrze wspiera autouzupełnianie poleceń za pomocą klawisza **<Tab>**. Możemy także wygodnie przeglądać i wywoływać wcześniej wprowadzone komendy, korzystając z klawiszy strzałek w górę i w dół. Na liście wyświetlonych komend możemy zauważyć dodaną już przez nas komendę **led** – jednak to, co nas teraz interesuje, to komendy **bt** i **gatt**.

Ponieważ wyłączyliśmy automatyczny proces inicjalizacji Bluetooth, teraz musimy uruchomić go ręcznie za pomocą komendy **bt init**. Więcej informacji o komendach shell dla Bluetooth można znaleźć pod linkiem [2]. Następnie, zgodnie z działaniem prawdziwego projektu, rozpoczniemy skanowanie – jak przystało na każde porządne urządzenie typu central.

Włączenie trybu szczegółowego (verbose) skanowania powoduje wyświetlanie dodatkowych informacji o wykrytych urządzeniach Bluetooth. Dzięki temu uzyskamy szczegółowe dane, takie jak moc sygnału (RSSI), typy urządzeń czy treść wysyłanych danych rozgłoszeniowych.

Kolejno wpisujemy polecenia w konsoli:

- bt init
- bt scan-verbose-output on
- bt scan on

W zależności od liczby urządzeń BLE w pobliżu, konsola może zostać zalana ogromną ilością informacji. Aby zatrzymać tę lawinę, wpisujemy w konsoli **bt scan off**. Co ważne, także podczas ciągłego wyświetlania tekstu w terminalu możemy wprowadzać komendy – nawet jeśli ich wpisywanie nie jest widoczne na ekranie. Przykładowy rezultat skanowania (a właściwie jego początek) prezentuje **listing 3**.

Przeglądając wyniki skanowania, możemy zauważyć różne typy adresów MAC rozgłaszających się urządzeń. W Bluetooth wyróżniamy dwa główne typy adresów:

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie **https://ulubionykiosk.pl/media**

eprasa.pl f9fe7f8d6b

```
uart:~$ bt init
Bluetooth initialized
[00:00:04.274,139] <inf> bt_hci_core: HW Platform: Nordic Semiconductor (0x0002)
[00:00:04.274,200] <inf> bt_hci_core: HW Variant: nRF53x (0x0003)
[00:00:04.274,230] <inf> bt_hci_core: Firmware: Standard Bluetooth controller (0x00) Version 54.58864 Build 1214809870
[00:00:04.276,184] <inf> bt_hci_core: Identity: F5:20:E7:1F:38:EF (random)
[00:00:04.276,214] <inf> bt_hci_core: HCI: version 5.4 (0x0d) revision 0x218f, manufacturer 0x0059
[00:00:04.276,245] <inf> bt_hci_core: LMP: version 5.4 (0x0d) subver 0x218f
uart:~$ bt scan-verbose-output on
uart:~$ bt scan on
Bluetooth active scan enabled
[DEVICE]: 43:DB:16:D5:5F:B8 (random), AD evt type 2, RSSI -85  C:0 S:1 D:0 SR:0 E:0 Prim: LE 1M, Secn: No packets, Interval: 0x0000 (0
us), SID: 0xff
         [SCAN DATA START - ADV_SCAN_IND]
         Type 0xff: 0x2d, 0x01, 0x02, 0x00, 0x01, 0x10, 0xba, 0x5f, 0x07, 0xea, 0xcf, 0xc6, 0x44, 0x0f, 0xbc,0x30, 0xb5, 0xa5, 0x28,
0x82, 0xd1, 0x90, 0x4f, 0x78, 0x72, 0xc5, 0x92, 0x7f
         [SCAN DATA END]
[DEVICE]: 43:DB:16:D5:5F:B8 (random), AD evt type 4, RSSI -85  C:0 S:1 D:0 SR:1 E:0 Prim: LE 1M, Secn: No packets, Interval: 0x0000 (0
us), SID: 0xff
         [SCAN DATA START - SCAN_RSP]
         [SCAN DATA END]
[DEVICE]: AC:12:2F:8A:40:82 (public), AD evt type 0, RSSI -58  C:1 S:1 D:0 SR:0 E:0 Prim: LE 1M, Secn: No packets, Interval: 0x0000 (0
us), SID: 0xff
          [SCAN DATA START - ADV_IND]
          Type 0x01: 0x06
          Type 0xff: 0xac, 0x12, 0x2f, 0x8a, 0x40, 0x82, 0x00, 0x00
          Type 0x05: 0xdaf51c01
          [SCAN DATA END]
```

Listing 3. Rozpoczęcie skanowania w konsoli

- Public Address (adres publiczny) – stały adres nadawany fabrycznie, który nie zmienia się w trakcie pracy urządzenia. Adres ten musi być zarejestrowany w IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), podobnie jak adresy MAC w urządzeniach Wi-Fi czy Ethernet.
- Random Address (adres losowy) – nie wymaga rejestracji w IEEE i dzieli się na dwa dodatkowe podtypy:
  - Static Address (adres statyczny) – działa jako zamiennik adresu publicznego; pozostaje niezmienny przez czas działania urządzenia lub do jego ponownego uruchomienia.
  - Private Address (adres prywatny) – zapewnia dodatkowy poziom prywatności. Może być generowany całkowicie losowo bądź za pomocą klucza IRK (Identity Resolving Key) i regularnie zmieniany, aby zapobiegać śledzeniu przez obce urządzenia.

Aby zmniejszyć liczbę wyświetlanych urządzeń, włączymy filtrowanie na podstawie poziomu sygnału. Ustawiając wysoki próg filtrowania (np. –20 dBm), wykluczymy z wyników skanowania najprawdopodobniej wszystkie wpisy. Potem, z włączonym skanowaniem, będziemy stopniowo obniżać próg (do –25 dBm, potem –30 dBm itd.). Przykładowo komenda **bt scan-filter-set rssi -20** ustawi filtr na podstawie wartości RSSI (Received Signal Strength Indicator), a na konsoli będą wyświetlane tylko te urządzenia, które mają siłę sygnału równą lub większą niż –20 dBm.

Wprowadzamy wartość filtra i rozpoczynamy skanowanie. Teraz czas wybudzić pilot. Urządzenia zasilane bateryjnie zazwyczaj przechodzą w tryb uśpienia, gdy tylko jest to możliwe. Naciśnięcie dowolnego przycisku niesparowanego pilota powinno rozpocząć proces rozgłaszania, który często jest sygnalizowany np. miganiem podświetlenia. Proces ten można prześledzić na **listingu 4**.

Warto upewnić się, że pilot znajduje się blisko płytki, aby jego sygnał był odpowiednio silny i został wykryty podczas skanowania. Skanowanie kończymy, ponownie wpisując w konsoli **bt scan off** zaraz po tym, jak wykryjemy nasze urządzenie.

Jak widać na listingu 4, siła sygnału pilota wynosi –44 dBm, dlatego musieliśmy obniżyć nasz próg do –45 dBm, aby urządzenie zostało wykryte. Najważniejsze informacje, które możemy odczytać z konsoli, to:

- Adres MAC urządzenia: **B3:F2:CF:65:C6:47 (public)**
- Usługa udostępniana przez urządzenie: **UUID 0x1812**, czyli Human Interface Device Service. Możemy to zweryfikować w specyfikacji Bluetooth dostępnej pod adresem [1].
- Nazwa urządzenia: **Smart Remote**

Znając adres pilota, możemy się z nim połączyć (**bt connect B3:F2:CF:65:C6:47 (public)**). Należy podać adres MAC wraz z jego typem. Po nawiązaniu połączenia warto podnieść poziom bezpieczeństwa, szczególnie w przypadku urządzeń HID. Nie chcemy przecież, aby ktoś mógł np. podsłuchiwać transmisję z klawiatury podczas wpisywania przez nas hasła. Do tego celu służy nam komenda **bt security 2**. O poziomach zabezpieczenia mówiliśmy w poprzedniej części kursu. Przykładowy przebieg tych operacji pokazaliśmy na **listingu 5**.

Pierwsze dwa kroki procesu za nami. Zanim klient zacznie komunikować się z serwerem, nie ma wiedzy o danych

```
uart:~$ bt scan-filter-set rssi -40
RSSI cutoff set at -40 dB
uart:~$ bt scan on
Bluetooth active scan enabled
uart:~$ bt scan-filter-set rssi -41
RSSI cutoff set at -41 dB
uart:~$ bt scan-filter-set rssi -42
RSSI cutoff set at -42 dB
uart:~$ bt scan-filter-set rssi -45
RSSI cutoff set at -45 dB
[DEVICE]: B3:F2:CF:65:C6:47 (public), AD evt type 0, RSSI -44 Smart Remote C:1 S:1 D:0 SR:0 E:0 Prim: LE 1M, Secn: No packets, Interval:
0x0000 (0 us), SID: 0xff
         [SCAN DATA START - ADV_IND]
         Type 0x01: 0x06
         Type 0x03: 0x1812
         Type 0x19: 0xc1, 0x03
         Type 0x09: Smart Remote
         [SCAN DATA END]
[DEVICE]: B3:F2:CF:65:C6:47 (public), AD evt type 4, RSSI -44  C:0 S:1 D:0 SR:1 E:0 Prim: LE 1M, Secn: No packets, Interval: 0x0000 (0
us), SID: 0xff
         [SCAN DATA START - SCAN_RSP]
         Type 0xff: 0xd6, 0x05, 0x08, 0x00, 0x4a, 0x4c, 0x41, 0x49, 0x53, 0x44, 0x4b
         [SCAN DATA END]
```

Listing 4. Wykrycie pilota podczas skanowania

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b

```
uart:~$ bt scan off
Scan successfully stopped
uart:~$ bt connect B3:F2:CF:65:C6:47 (public)
Connection pending
Connected: B3:F2:CF:65:C6:47 (public)
uart:~$ bt security 2
Security changed: B3:F2:CF:65:C6:47 (public) level 2
Bonded with B3:F2:CF:65:C6:47 (public)
uart:~$
```

Listing 5. Łączenie z pilotem

```
uart:~$ gatt discover-primary
Discover pending
Service 1800 found: start handle 1, end_handle 7
Service 1801 found: start handle 8, end_handle b
Service 180a found: start handle c, end_handle 1e
Service 180f found: start handle 1f, end_handle 22
Service 1812 found: start handle 23, end_handle 49
Service ae40 found: start handle 4a, end_handle 4f
Service ae00 found: start handle 80, end_handle 85
Discover complete
uart:~$
```

Listing 6. Serwisy pilota

i funkcjonalnościach przechowywanych na tym serwerze. Dlatego najpierw przeprowadza tzw. odkrywanie usług (Service Discovery), podczas którego pyta serwer o dostępne atrybuty. Zapytamy pilot (serwer) o wszystkie jego podstawowe serwisy komendą **gatt discover-primary**. Wynikiem będą wszystkie serwisy wystawione przez serwer GATT (**listing 6**).

Możemy zauważyć, że nawet stosunkowo proste urządzenie ma rozbudowaną tablicę atrybutów ATT – ostatni element ma uchwyt o wartości 0x85, co oznacza, że łączna liczba atrybutów to aż 133. Ostatnie dwie usługi to niestandardowe dane klienta, jednak pozostałe mają UUID określone przez organizację Bluetooth SIG i można je zidentyfikować na podstawie specyfikacji [1].

Dla ułatwienia analizy możemy skorzystać z aplikacji nRF Connect, która oferuje przyjazny graficznie interfejs i wykonuje ten sam proces znacznie szybciej.

Zanim przejdziemy do głównej funkcji pilota – obsługi przycisków – skorzystamy z prostej usługi monitorowania stanu baterii, aby lepiej zrozumieć, jak wygląda przepływ danych w BLE.

Battery Service

Wyobraźmy sobie, że jesteśmy teraz sparowanym klientem serwera (pilota) i interesuje nas stan jego baterii. Usługa monitorowania baterii ma **UUID** o wartości **0x180F**. Z danych z listingu 6 wiemy, że definicja tej usługi znajduje się w tablicy atrybutów i obejmuje wpisy o uchwytach od 0x1F do 0x22.

Zobrazujemy sobie teraz zawartość tablicy atrybutów dotyczącej serwisu baterii. Najpierw pobierzemy listę wpisów w tablicy atrybutów wraz z ich typami i uchwytami komendą **gatt discover**. Wynik, okrojony do interesującego nas zakresu, prezentuje **listing 7**. Następnie odczytamy wartości poszczególnych atrybutów za pomocą polecenia **gatt read <numer atrybutu>**. Rezultat znajduje się na **listingu 8**.

Wyniki możemy zebrać w zgrabnej tabelce pokazanej na **rysunku 2**.

```
uart:~$ gatt discover
Discover pending
Descriptor 2800 found: handle 1
...
Descriptor 2800 found: handle 1f
Descriptor 2803 found: handle 20
Descriptor 2a19 found: handle 21
Descriptor 2902 found: handle 22
...
Descriptor 2902 found: handle 85
Discover complete
uart:~$
```

Listing 7. Lista atrybutów GATT pilota

Definicja każdego serwisu na poziomie warstwy GATT zaczyna się od wpisu o typie **0x2800 (Primary Service)**. Dzięki temu łatwo można przeanalizować strukturę usług udostępnianych przez serwer – wystarczy wybrać wpisy o tym typie. Tak właśnie przeprowadziliśmy Service Discovery po połączeniu z pilotem.

Nasz serwis ma standardowy, 16-bitowy identyfikator Serwisu Baterii (0x180F). Może dziwić, że UUID znajduje się w części Value atrybutu, ale tak właśnie działa standard Bluetooth – wpisy typu 0x2800 zawierają UUID usługi jako swoją wartość. W ten sposób można łatwo odróżnić poszczególne usługi w tabeli ATT.

Następny wpis (handle 0x0020) deklaruje charakterystykę wraz z jej parametrami.

- Pierwszy bajt definiuje właściwości charakterystyki: ustawione dwa bity oznaczają możliwość odczytu charakterystyki (Read) oraz subskrypcji powiadomień (Notify).
- Dalej mamy handle, który wskazuje, gdzie znajduje się wartość tej charakterystyki (w tym przypadku 0x0021).
- Na końcu deklaracji znajduje się UUID charakterystyki – w naszym przypadku 0x2A19, które identyfikuje ją jako Battery Level zgodnie ze standardem.

Wpis o handle 0x0021 przechowuje faktyczną wartość charakterystyki. Zgodnie ze specyfikacją [3] jest to zmienna reprezentująca poziom baterii w procentach (wartości od 0 do 100).

Ostatni wpis (o handle 0x0022) to tzw. Client Characteristic Configuration (CCC). Jest to specjalny deskryptor (dodatkowy atrybut charakterystyki), który służy do zarządzania powiadomieniami i wskazaniami dla danej charakterystyki. Wartość deskryptora CCC decyduje o tym, czy powiadomienia są włączone (0x0001), czy też

```
uart:~$ gatt read 1f
Read pending
Read complete: err 0x00 length 2
00000000: 0f 18                                          |..                |
Read complete: err 0x00 length 0
uart:~$ gatt read 20
Read pending
Read complete: err 0x00 length 5
00000000: 12 21 00 19 2a                                 |.!..*             |
Read complete: err 0x00 length 0
uart:~$ gatt read 21
Read pending
Read complete: err 0x00 length 1
00000000: 00                                             |.                 |
Read complete: err 0x00 length 0
uart:~$ gatt read 22
Read pending
Read complete: err 0x00 length 2
00000000: 00 00                                          |..                |
Read complete: err 0x00 length 0
uart:~$
```

Listing 8. Wartości atrybutów usługi baterii

Handle	Type (UUID)	Value	Permissions
0x001F	0x2800 (Primary Service)	0x180F (Battery Service)	Read
0x0020	0x2803 (Characteristic)	Properties: Read, Notify: 0x12; Value Handle: 0x0021; UUID: 0x2A19	Read
0x0021	0x2A19 (Battery Level)	0 (Battery Level: 0%)	Read, Notify
0x0022	0x2902 (Client Characteristic Configuration)	0x0000 (Notifications Disabled)	Read, Write

Rysunek 2. Tablica atrybutów Battery Service

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b

wyłączone (0x0000). Aby włączyć powiadomienia dotyczące poziomu baterii, klient (np. nasze urządzenie centralne) musi zapisać odpowiednią wartość do deskryptora. Każda charakterystyka umożliwiająca notyfikację lub indykację ma taki deskryptor, czyli atrybut o typie 0x2902, w swojej definicji.

Podsumowując: po analizie tych atrybutów wiemy, że aby odczytać stan baterii, należy sprawdzić wartość spod uchwytu 0x21. Z kolei chęć odbierania powiadomień o zmianach stanu naładowania należy zgłosić, wpisując odpowiednią wartość do uchwytu 0x22.

Tak oto wysokopoziomowa logika monitorowania stanu baterii sprowadza się do interakcji z niewielką liczbą atrybutów w tabeli ATT. To pokazuje, jak efektywnie warstwa GATT pozwala na dostęp do danych urządzenia w sposób prosty i standardowy.

Shell Zephyra ma dostępne polecenie subskrypcji w formacie **gatt subscribe <handle CCC> <handle wartości>**.

Na **listingu 9** mamy przeprowadzoną operację subskrypcji i rezygnacji z niej, wraz ze sprawdzeniem wartości CCC. Warto zauważyć, że zaraz po włączeniu subskrypcji serwer proponuje zmianę parametrów połączenia, takich jak interwał komunikacji (interval) oraz opóźnienie (latency). Taka zmiana może wynikać z optymalizacji połączenia pod kątem oszczędności energii lub poprawy wydajności.

W przypadku tego pilota wartość poziomu baterii cały czas wynosi 0. Producent akcesorium uznał najwyraźniej, że nie jest to istotna funkcjonalność do implementacji.

```
uart:~$ gatt subscribe 22 21
Subscribed
LE conn  param req: int (0x0006, 0x0009) lat 100 to 300
LE conn param updated: int 0x0009 lat 100 to 300
uart:~$ gatt read 22
Read pending
Read complete: err 0x00 length 2
00000000: 01 00                                          |..              |
Read complete: err 0x00 length 0
uart:~$ gatt unsubscribe
Unsubscribe success
Unsubscribed
uart:~$ gatt read 22
Read pending
Read complete: err 0x00 length 2
00000000: 00 00                                          |..              |
Read complete: err 0x00 length 0
uart:~$
```

Listing 9. Subskrybowanie stanu baterii

```
uart:~$ gatt discover 2a4d
Discover pending
Descriptor 2a4d found: handle 27
Descriptor 2a4d found: handle 2b
Descriptor 2a4d found: handle 2f
Descriptor 2a4d found: handle 32
Descriptor 2a4d found: handle 36
Descriptor 2a4d found: handle 3a
Descriptor 2a4d found: handle 3e
Discover complete
uart:~$ gatt discover 2902 23 49
Discover pending
Descriptor 2902 found: handle 28
Descriptor 2902 found: handle 2c
Descriptor 2902 found: handle 33
Descriptor 2902 found: handle 37
Descriptor 2902 found: handle 3b
Descriptor 2902 found: handle 3f
Descriptor 2902 found: handle 45
Discover complete
uart:~$
```

Listing 10. Analiza serwisu HID

BLE HID

Serwis HID ma standardowy UUID o wartości 0x1812. Jak wskazuje listing 6, ów serwis składa się z 38 atrybutów.

Odczytanie klawiszy nie będzie jednak tak skomplikowane, jak mogłoby się wydawać – informacje o naciśnięciach przycisków znajdują się w raportach stanu klawiszy (tzw. HID Input Reports). Raporty te są niczym innym, jak tylko standardowymi charakterystykami Serwisu HID o UUID 0x2A4D.

Na poziomie GATT proces obsługi HID Input Reports sprowadza się do:

1. Odnalezienia odpowiednich charakterystyk w ramach usługi HID (w przypadku tego urządzenia to atrybuty od 0x23 do 0x49).
2. Zlokalizowania atrybutów zawierających wartości raportów klawiszy (atrybuty typu 0x2A4D).
3. Ustawienia subskrypcji tych atrybutów, aby automatycznie odbierać powiadomienia o ich zmianach (atrybuty o typie 0x2902).

Możemy przeanalizować całą listę atrybutów, którą uzyskaliśmy na listingu 7, ale sprytniej będzie skorzystać z komendy **gatt discover** z odpowiednimi parametrami filtrującymi.

- Komenda **gatt discover 2a4d** wyświetli listę wszystkich atrybutów typu HID Input Report w urządzeniu.
- Polecenie **gatt discover 2902 23 49** wyświetli listę wszystkich deskryptorów CCC (Client Characteristic Configuration) w zakresie uchwytów od 0x23 do 0x49, czyli w obrębie serwisu HID – nie zobaczymy więc w wyniku np. deskryptora Serwisu Baterii.

Dzięki takiemu rozwiązaniu możemy szybko zidentyfikować interesujące nas atrybuty bez konieczności

```
uart:~$ gatt subscribe 3f 3e
Subscribed
uart:~$ gatt unsubscribe
Unsubscribe success
Unsubscribed
uart:~$ gatt subscribe 28 27
Subscribed
Notification: value_handle 39, length 2
00000000: 01 00                                          |..              |
Notification: value_handle 39, length 2
00000000: 00 00                                          |..              |
Notification: value_handle 39, length 2
00000000: 02 00                                          |..              |
Notification: value_handle 39, length 2
00000000: 00 00                                          |..              |
Notification: value_handle 39, length 2
00000000: 04 00                                          |..              |
Notification: value_handle 39, length 2
00000000: 00 00                                          |..              |
Notification: value_handle 39, length 2
00000000: 08 00                                          |..              |
Notification: value_handle 39, length 2
00000000: 00 00                                          |..              |
Notification: value_handle 39, length 2
00000000: 10 00                                          |..              |
Notification: value_handle 39, length 2
00000000: 00 00                                          |..              |
uart:~$
```

Listing 11. Subskrybowanie raportów HID

```
uart:~$ gatt discover 2a4b
Discover pending
Descriptor 2a4b found: handle 42
Discover complete

uart:~$ gatt read 42
Read pending
Read complete: err 0x00 length 22
00000000: 05 0c 09 01 a1 01 85 01  09 e9 09 ea 09 b5 09 b6 |.....|
00000010: 09 cd 09 40 09 30                               |...@.|
Read complete: err 0x00 length 22
00000000: 0a 23 02 15 00 25 01 75  01 95 08 81 02 75 01 95 |.#...|
00000010: 01 05 0b 09 21 81                               |....!|
Read complete: err 0x00 length 8
00000000: 02 75 01 95 07 81 03 c0                         |.u...|
Read complete: err 0x00 length 0
uart:~$
```

Listing 12. Odczyt Memory Map

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie **https://ulubionykiosk.pl/media**

eprasa.pl f9fe7f8d6b

przeglądania całej tabeli. Wynik stosownej operacji prezentuje **listing 10**.

Urządzenie HID może mieć wiele raportów HID Input Report (0x2A4D), ponieważ każdy z nich reprezentuje inny zestaw danych wejściowych. Na przykład jeden raport może obsługiwać standardowe klawisze a inny – odpowiadać za przyciski multimedialne. Każdy raport ma dedykowany atrybut oraz odpowiadający mu deskryptor CCC, co pozwala na niezależne zarządzanie subskrypcjami.

Shell Zephyra umożliwia subskrybowanie jednocześnie tylko jednego atrybutu. W związku z tym musimy „po omacku" wybrać odpowiedni uchwyt, który odpowiada za raport stanu klawiszy. Nasze zadanie sprowadza się do:

- Użycia komendy **gatt subscribe** z odpowiednią parą uchwytów (deskryptora CCC i raportu).
- Sprawdzenia reakcji na naciśnięcie przycisku.
- Anulowania subskrypcji i przetestowania kolejnego uchwytu, jeśli nie zaobserwujemy żadnej reakcji (**gatt unsubscribe**).

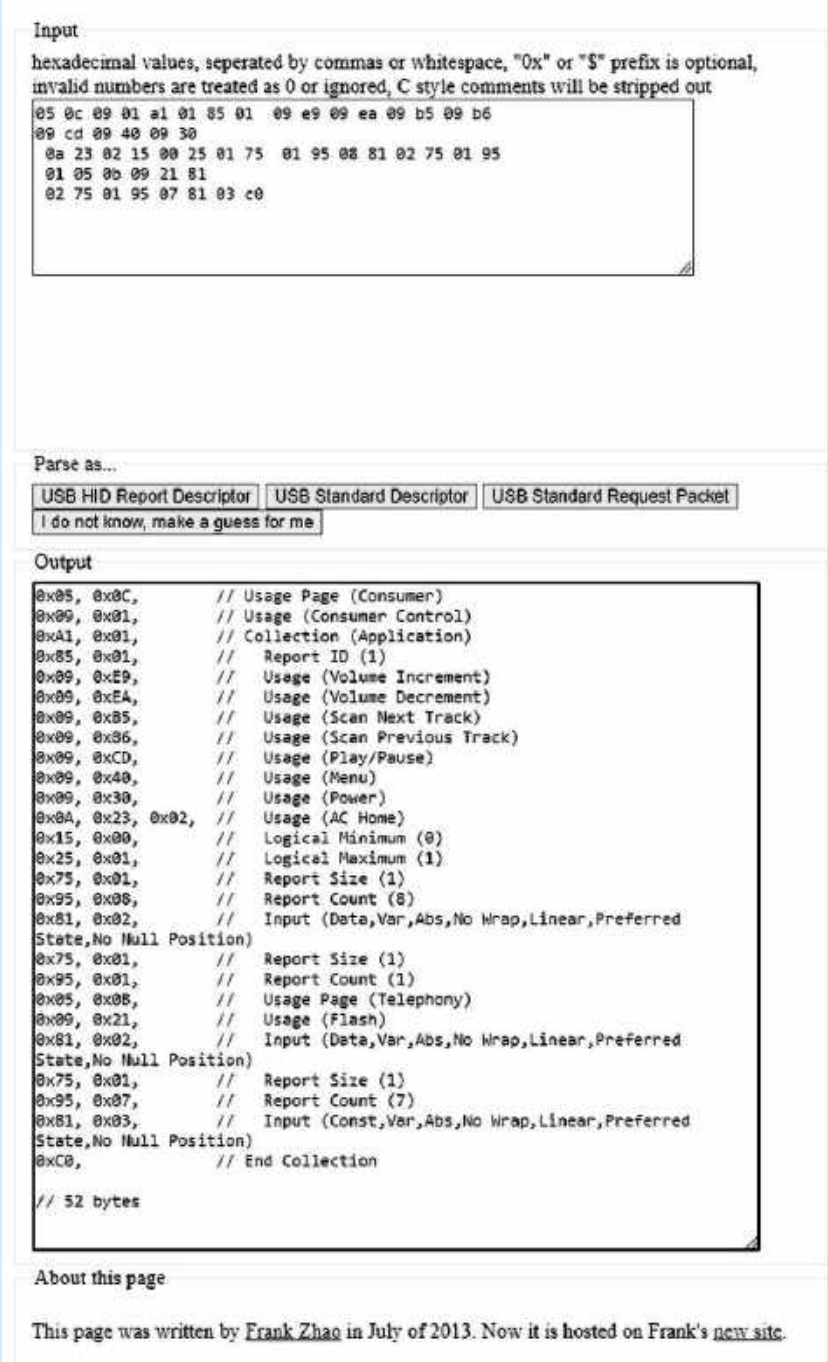
Proces ten pozwala – metodą prób i błędów – zidentyfikować właściwy raport odpowiedzialny za obsługę klawiszy. Na **listingu 11** można zauważyć, że atrybut o uchwycie 0x27 jest aktywnym raportem w tym pilocie i po jego wybraniu zaczynamy otrzymywać powiadomienia o wciśnięciach.

Pilot, którego używamy, przypisuje jeden bit dla każdego z pięciu przycisków. Jednak format raportu urządzenia HID zależy od jego implementacji i jest opisany w mapie klawiszy HID (HID Report Map).

Taką mapę możemy z pilota odczytać – jest kolejną charakterystyką serwisu HID. Zgodnie ze standardem [1] UUID Report Map to 0x2A4B. Na **listingu 12** pokazujemy, jak odnaleźć handle z tą wartością i odczytać mapę.

Taki zestaw danych niewiele mówi zwykłemu śmiertelnikowi, ale można go zdekodować jednym z dostępnych narzędzi. My użyjemy parsera online [5], gdyż jest to aplikacja prosta w obsłudze. Bardziej „ludzki" już opis raportu HID prezentuje **rysunek 3**. Można na nim zauważyć, że za stan klawiszy odpowiadają wartości w zakresie od 0 do 1 (Logical Minimum: 0 i Logical Maximum: 1), a także który bit raportu jest przypisany do jakiej funkcji klawisza. Warto jednak zauważyć, że mapa raportu zawiera osiem bitów, podczas gdy na pilocie dostępnych jest jedynie pięć klawiszy.

Okazuje się, że pilot wspiera także kombinacje klawiszy; na przykład wciśnięcie na dłużej obu klawiszy zmiany utworu spowoduje wysłanie raportu z wartością 0x80.



Rysunek 3. Opis raportu HID

Podsumowanie

W tym odcinku symulowaliśmy działanie algorytmu typowego urządzenia centralnego, które komunikuje się z urządzeniem peryferyjnym. Wykonaliśmy kolejno wszystkie niezbędne operacje: skanowanie, łączenie, odkrywanie usług, odczytywanie oraz subskrybowanie charakterystyk...

Zahaczyliśmy nawet o profil HID. I choć nasz „algorytm" nie w pełni realizował założenia profilu HID, to udało nam się skutecznie uzyskać informacje o wciśniętych przyciskach.

Dzięki poleceniom w shellu Zephyra poznaliśmy strukturę tablicy atrybutów, odnaleźliśmy charakterystyki odpowiedzialne za raporty stanu klawiszy oraz zrealizowaliśmy subskrypcję powiadomień.

W niemal identyczny sposób można eksperymentować z klawiaturą BLE – sprawdziliśmy to!

W następnym odcinku dołączymy obsługę urządzenia HID do naszego projektu.

Krzysztof Kierys
Paweł Jachimowski

Odnośniki w tekście

[1] https://www.bluetooth.com/specifications/assigned-numbers/
[2] https://tiny.pl/hmxxcfc1
[3] https://www.bluetooth.com/specifications/specs/bas-1-1/
[4] https://tiny.pl/md8mnw-6
[5] https://eleccelerator.com/usbdescreqparser/

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie
https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Czytniki kodów kreskowych w praktyce (1)

EM3296V4: uniwersalny silnik skanowania OEM do urządzeń kompaktowych

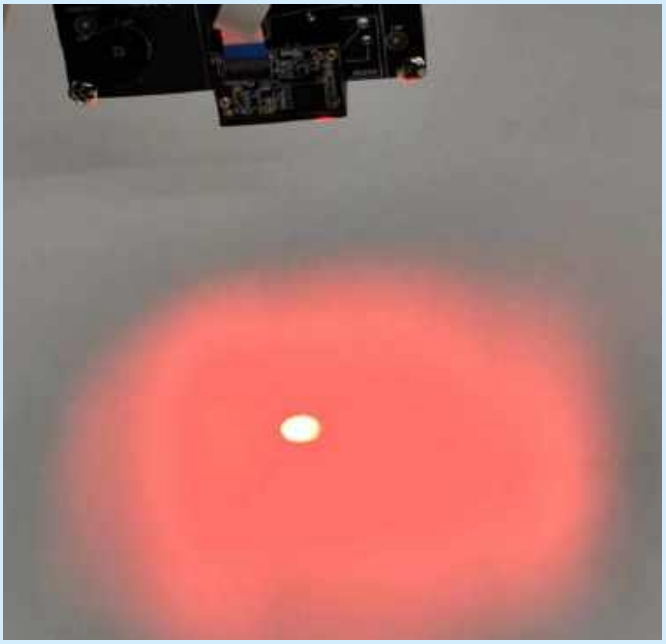
Identyfikacja optyczna znalazła niezliczone zastosowania w aplikacjach przemysłowych, handlu, spedycji, zarządzaniu jednostkami ochrony zdrowia, systemach kontroli dostępu i wielu innych. Nie jest tajemnicą, że realizowana „od zera" implementacja wydajnego, niezawodnego skanera we własnym urządzeniu, dawno przestała się już opłacać. W istocie jedynym sensownym rozwiązaniem jest dziś zastosowanie jednego z licznych silników skanujących OEM – gotowych modułów, które wystarczy zamontować w docelowym urządzeniu, podłączyć do układu nadrzędnego oraz odpowiednio skonfigurować. Jednak nawet w tak pozornie prostej implementacji natkniemy się nierzadko na szereg zagadnień, których nieuwzględnienie na etapie projektu systemu może ograniczyć funkcjonalność skanera lub znacznie utrudnić jego użytkowanie. Niniejszy artykuł rozpoczyna krótki kurs poświęcony właśnie praktycznym aspektom użycia skanerów OEM, przeznaczonych do odczytu kodów kreskowych 1D i 2D.

W pierwszej części naszego cyklu posłużymy się przykładem jednego z najmniejszych skanerów OEM dostępnych obecnie na rynku – przyjrzymy się modelowi EM3296V4 marki Newland. Widok modułu – zaprezentowanego na dłoni, dla porównania skali – można zobaczyć na **fotografii tytułowej**.

Budowa modułu

Bohater tego artykułu to klasyczna konstrukcja statycznego silnika skanującego. Zamiast skomplikowanego układu optyczno-mechanicznego z przemiataniem wiązki laserowej, znanego m.in. ze skanerów kodów kreskowych używanych w kasach sklepowych, mamy tu bowiem do czynienia z miniaturowym systemem wizyjnym, opartym na kamerze CMOS – dzięki takiemu rozwiązaniu moduł może odczytywać zarówno kody 1D (kreskowe, np. Code39), jak i 2D (matrycowe, np. QR). Ponadto brak elementów ruchomych znacznie wydłuża czas bezawaryjnej eksploatacji i redukuje zużycie energii. Co bardzo ważne z punktu widzenia docelowych aplikacji, EM3296V4 obsługuje z równym powodzeniem zarówno kody wyświetlane na ekranach (np. smartfona czy komputera), jak i drukowane bądź nanoszone innymi technikami znakowania powierzchni (np. laserowo). Pracę w ciemności lub niedostatecznym oświetleniu zewnętrznym wspomaga wbudowany oświetlacz LED, zaś nakierowanie skanera na kod, który ma zostać odczytany, ułatwia specjalny celownik – także zbudowany w oparciu o diodę LED, choć w tym przypadku wyposażoną w doskonale skolimowaną optykę, dającą w efekcie jasną, ostro odgraniczoną od tła plamkę światła (**fotografia 1**). Ułożenie poszczególnych elementów optycznych na panelu czołowym obudowy modułu można zobaczyć na **fotografii 2**. Silnik skanujący EM3296V4 to rozwiązanie w pełni zintegrowane – wbudowany układ elektroniczny z wydajnym procesorem zapewnia realizację całej procedury odczytu kodów kreskowych i matrycowych, zaś wynikiem działania modułu jest… zdekodowany ciąg znaków, udostępniany za pośrednictwem jednego z dwóch interfejsów szeregowych.

Więcej informacji:
Dystrybutorem skanerów OEM marki Newland na terenie Polski jest firma:
Kreski Spółka Jawna
ul. Mory 12, 01-303 Warszawa
https://www.kreski.pl/



Fotografia 1. Światło emitowane przez wbudowany oświetlacz oraz celownik modułu EM3296V4

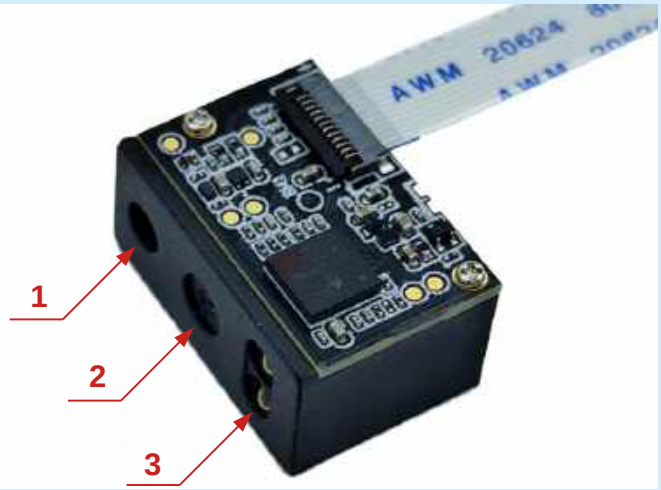
Najważniejsze parametry i funkcjonalności

Zanim przejdziemy do opisu sposobu podłączenia, mocowania i konfiguracji modułu, przyjrzyjmy się jego najważniejszym parametrom technicznym oraz funkcjom realizowanym przez oprogramowanie wbudowane procesora zarządzającego działaniem skanera.

- Rodzaje odczytywanych kodów 1D: Code 39, Code 128, UCC/EAN-128, AIM128, EAN-8, EAN-13, ISBN/ISSN,

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie **https://ulubionykiosk.pl/media**

eprasa.pl f9fe7f8d6b



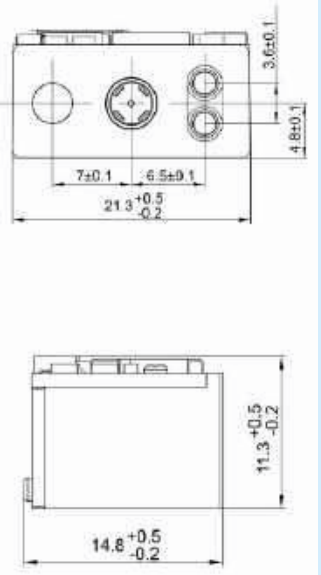
Fotografia 2. Opis elementów optycznych skanera: 1 – celownik LED, 2 – obiektyw kamery CMOS, 3 – podwójny oświetlacz LED

UPC-E, UPC-A, Interleaved 2 of 5, ITF-6, ITF-4, Matrix 2 of 5, Industrial 25, Standard 25, Codabar, Code 11, Plessey, MSI-Plessey, GS1-DataBarTM(RSS), RSS-14, RSS-Limited, RSS-Expand.

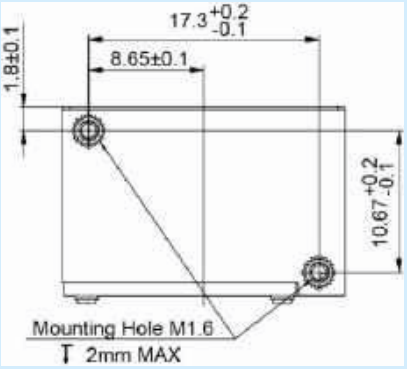
- Rodzaje odczytywanych kodów 2D: PDF417, QR Code (QR1/2, Micro), Data Matrix (ECC200, ECC000, 050, 080, 100, 140), Aztec, Chinese Sensible Code.
- Sensor obrazu: CMOS 640×480 px (monochromatyczny).
- Celownik/oświetlacz: LED 625 nm.
- Szybkość skanowania: 100 fps.
- Czas uruchamiania (po włączeniu zasilania/zwolnieniu linii Reset): 400 ms.
- Zalecane napięcie zasilania: 3,3 V (DC) ±5%, poziom szumu: <= 30 mV (pk-pk).
- Dopuszczalne napięcie zasilania: 3,0...3,6 V, szum <= 50 mV (pk-pk).
- Pobór prądu: 100 mA (typ.)/168 mA (maks.) – w trybie skanowania, 10 mA (w trybie bezczynności), 10 µA (w trybie uśpienia).
- Interfejsy: USB, UART.
- Oświetlenie zewnętrzne: 0…100 000 lux.
- Zakres temperatur pracy: –20°C to +60°C (@ 5…95% RH).

Montaż mechaniczny i integracja z oknem optycznym

Wymiary modułu EM3296V4 to zaledwie 21,8 mm × 15,3 mm × 11,8 mm (szerokość × głębokość × wysokość) – patrz **rysunek 1**. Skaner jest mocowany do konstrukcji docelowego urządzenia za pomocą dwóch śrubek z gwintem M1,6, rozmieszczonych po przekątnej spodu obudowy (**rysunek 2**). Projektując obudowę, w której ma być zamontowany silnik skanujący, należy przewidzieć umieszczenie w niej przezroczystego okna, chroniącego optykę oraz układ elektroniczny przed wpływem zanieczyszczeń i wilgoci, a także przed uszkodzeniami mechanicznymi – należy jednak pamiętać, by przestrzegać następujących wymogów zalecanych przez producenta:



Rysunek 1. Wymiary modułu EM3296V4 (https://t.ly/Lojz1)



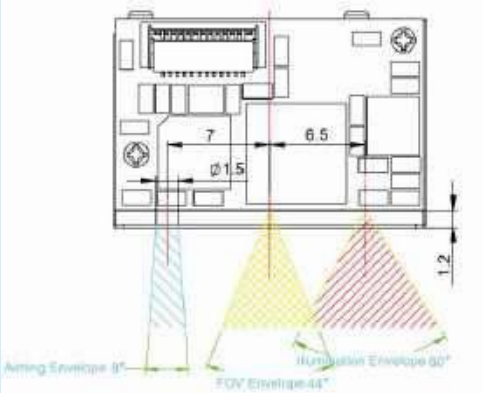
Rysunek 2. Rozmieszczenie gwintowanych otworów montażowych w podstawie modułu (https://t.ly/Lojz1)

- odległość od czoła skanera do wewnętrznej powierzchni okna optycznego nie powinna przekraczać 0,5 mm,
- grubość materiału okna optycznego nie powinna być większa niż 2 mm,
- okno optyczne powinno być wykonane z materiału odpornego na zarysowania, np. PMMA lub szkła o transmitancji nie mniejszej niż 90% i współczynniku zamglenia (ang. *haze*) poniżej 1%.

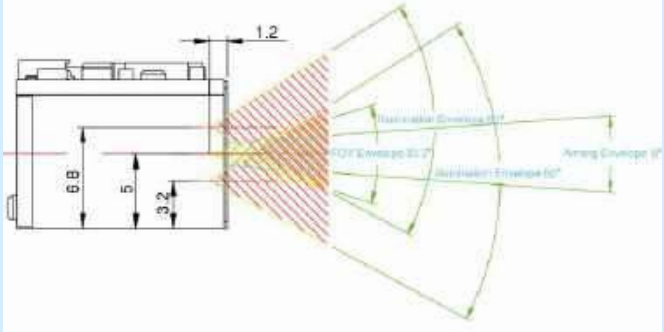
W przypadku umieszczenia modułu w głębokiej wnęce obudowy należy zwrócić szczególną uwagę, by jej brzegi nie kolidowały z wiązkami oświetlacza oraz polem widzenia kamery – stosowne szkice, wykreślone w dwóch ortogonalnych płaszczyznach, można zobaczyć na **rysunkach 3** i **4**.

Interfejs elektryczny i protokoły transmisji

Wszystkie połączenia modułu z układem nadrzędnym (np. mikrokontrolerem lub komputerem SBC) są realizowane za pośrednictwem 12-żyłowego przewodu FPC o rastrze 0,5 mm (**rysunek 5**) – producent zastosował gniazdo 10051922-1210EHLF marki FCI, ale nic nie stoi na przeszkodzie, by po stronie hosta umieścić kompatybilne złącze innego producenta. Układ wyprowadzeń gniazda opisano w **tabeli 1**.



Rysunek 3. Pole widzenia kamery (FOV) oraz wiązki oświetlacza (Illumination) i celownika (Aiming), widoczne w płaszczyźnie poziomej



Rysunek 4. Pole widzenia kamery oraz wiązki oświetlacza i celownika, widoczne w płaszczyźnie pionowej

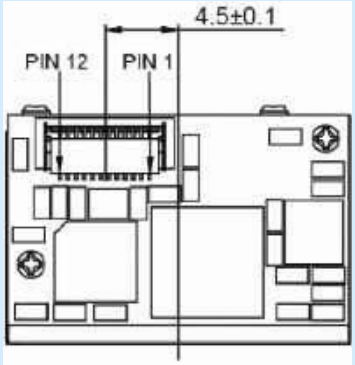
Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie
https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Tabela 1. Układ wyprowadzeń złącza systemowego

Numer pinu złącza ZIF	Nazwa	Kierunek	Opis
1	–	–	niepodłączone
2	VDD	–	zasilanie
3	GND	–	masa
4	RX	I	UART 3,3 V
5	TX	O	
6	USB D–	I/O	USB
7	USB D+	I/O	
8	–	–	niepodłączone
9	BUZZ	O	buzzer (zewnętrzny)
10	LED	O	wskaźnik LED (zewnętrzny)
11	RESET	I	wejście zerujące
12	nTRIG	I	wejście wyzwalania

Fotografia 3. Widok płytki EVK3030 wraz z modułem EM3296V4



Rysunek 5. Ułożenie systemowego złącza ZIF (https://t.ly/Lojz1)

Fotografia 4. Złożony zestaw ewaluacyjny z podłączonym modułem skanującym

Domyślnym interfejsem komunikacyjnym modułu jest 8-bitowy UART o prędkości transmisji 9600 bps, z jednym bitem stopu i bez obsługi parzystości. W ramach rekonfiguracji modułu można zmienić zarówno parzystość, jak i liczbę bitów danych (7 lub 8) i stopu (1 lub 2) oraz prędkość (1200...115200 bps).

Linia RESET jest aktywowana impulsem stanu niskiego o czasie trwania 100...500 µs, przy czym czas upływający pomiędzy kolejnymi impulsami (jeżeli zaistniałaby taka potrzeba) musi przekroczyć 2 sekundy.

Wyzwolenie skanowania odbywa się standardowo poprzez ustawienie linii nTRIG w stan niski na co najmniej 10 ms – powrót do stanu wysokiego powoduje przerwanie operacji i wygaszenie celownika oraz oświetlacza (o ile nie zmieniono domyślnych ustawień działania tychże elementów). Co ważne, po odczycie kodu host powinien zwolnić linię nTRIG na minimum 50 ms, zanim przystąpi do kolejnego wyzwolenia skanu.

Moduł EM3296V4 może automatycznie obsługiwać zewnętrzny buzzer oraz diodę LED, pozwalające na potwierdzanie dokonania odczytu. Należy zwrócić uwagę na bardzo ważny fakt – linia BUZZ jest sterowana sygnałem PWM, dzięki czemu układ może sygnalizować różne stany silnika skanującego (np. włączenie zasilania, dokonanie konfiguracji za pomocą kodu specjalnego przeznaczenia, czy też prawidłowy bądź błędny odczyt) za pomocą zróżnicowanych sygnałów dźwiękowych. Z tego też względu buzzer (podłączony do linii BUZZ za pośrednictwem tranzystora kluczującego) musi być przetwornikiem pasywnym (tj. bez wbudowanego generatora). Zarówno brzęczyk, jak i dioda LED (także podłączona za pomocą zewnętrznego tranzystora), są aktywowane stanem wysokim.

Silnik skanujący EM3296V4 oferuje kilka trybów komunikacji z hostem. Domyślny tryb to UART – podłączenie linii TX modułu do wejścia RX mikrokontrolera lub konwertera UART-USB (pracującego z poziomami logicznymi 3,3 V), wystarczy więc w zupełności do uruchomienia minimalistycznej implementacji, umożliwiającej odbiór zdekodowanych znaków z modułu. W odróżnieniu od prostszych skanerów OEM, omawiany moduł umożliwia jednak także komunikację za pośrednictwem wbudowanego portu USB – i to w dwóch trybach:

- **USB HID** – moduł emuluje klawiaturę, dzięki czemu może być obsługiwany na zasadzie „plug & play" przez dowolny komputer lub minikomputer SBC,
- **USB CDC** – silnik skanujący pełni rolę wirtualnego portu COM, który – za pomocą odpowiedniego sterownika systemowego – „udaje" sprzętowy port szeregowy, przez co dane mogą być odczytywane tak, jak z każdego innego portu lub konwertera pracującego w trybie CDC.

Zestaw ewaluacyjny EVK3030 – uruchomienie i pierwsze testy silnika skanującego

Natychmiastowe rozpoczęcie pracy z modułem EM3296V4 jest znacznie ułatwione dzięki płytce ewaluacyjnej o symbolu EVK3030, opracowanej przez firmę Newland z myślą o osobach planujących wdrożenie modułu OEM we własnym projekcie. Widok płytki przed zainstalowaniem modułu pokazano na **fotografii 3**, zaś gotowy do pracy zestaw (ze skanerem przykręconym do odpowiednich otworów w PCB) można zobaczyć na **fotografii 4**. Należy przy tym zwrócić uwagę, że zastosowana taśma FPC jest typu 1 co oznacza, że pola kontaktowe są umieszczone po tej samej stronie przewodu i skierowane do dołu (czyli usztywnieniem do góry).

Na płytce znalazły się trzy złącza, umożliwiające podłączenie EVK3030 do komputera lub innego systemu nadrzędnego:

- J3 – gniazdo typu RJ45, udostępniające port RS-232C (po konwersji przez układ SP3232),
- J4 – gniazdo USB typu B, połączone bezpośrednio z interfejsem USB skanera,

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Rysunek 6. Kod specjalnego przeznaczenia umożliwiający przywrócenie wszystkich ustawień domyślnych skanera

- J5 – gniazdo USB typu B, połączone przez sprzętowy konwerter CP2102 z interfejsem UART modułu skanującego.

Ponadto zestaw zawiera oczywiście dwa przyciski (resetujący oraz wyzwalający), a także diodę LED i buzzer elektromagnetyczny.

Jak widać na fotografii 4, moduł wpięto do złącza FPC oznaczonego jako J2 – drugie, bliźniacze złącze J1 jest przeznaczone do użycia z innymi modelami skanerów OEM marki Newland.

Konfiguracja z użyciem kodów predefiniowanych

Moduł EM3296V4 może być skonfigurowany na dwa sposoby. Pierwszy – klasyczny i stosowany w niemal wszystkich współczesnych czytnikach kodów kreskowych – polega na skanowaniu specjalnych kodów serwisowych, których komplet został opublikowany w dokumentacji producenta, dostępnej pod adresem [1]. W większości przypadków cykl konfiguracji polega na zeskanowaniu kodu znajdującego się na górze strony (*Enter Setup*), a następnie na wskazaniu wybranego kodu odpowiedzialnego za konkretne ustawienie modułu. Po zakończeniu konfiguracji trzeba

Rysunek 7. Okno startowe programu EasySet

zeskanować „kod wyjścia", czyli – znajdujący się na dole strony i oznaczony jako *Exit Setup*. Za pomocą odpowiednich kodów można ustawić rodzaj i parametry pracy interfejsów szeregowych, tryby skanowania i detekcji, właściwości stabilizacji obrazu, obszary ROI, ustawienia oświetlacza, celownika, buzzera i wskaźnika LED, czy wreszcie rozmaite prefiksy, sufiksy i wiele innych. W razie problemów (lub podczas wstępnych testów) można łatwo powrócić do ustawień fabrycznych skanując kod *Restore All Factory Defaults* (**rysunek 6**).

Konfiguracja z użyciem oprogramowania EasySet

Konstruktorzy implementujący skaner EM3296V4 (lub jeden z wielu innych silników tego samego producenta) we własnym

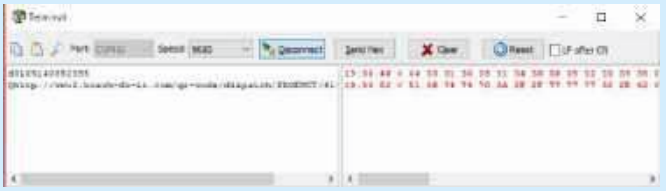
REKLAMA

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Rysunek 8. Okno wykrywania podłączonego skanera

Rysunek 10. Okno podglądu obrazu z kamery modułu

Rysunek 9. Okno konfiguracji prefiksów identyfikujących rodzaj zeskanowanego kodu



Rysunek 11. Okno terminala po odczytaniu dwóch różnych kodów (1D i 2D)

projekcie mają możliwość konfiguracji modułu za pomocą oprogramowania EasySet, dostępnego na komputery z systemem Windows. Po zainstalowaniu i uruchomieniu programu pojawia się okno startowe (**rysunek 7**), w którym można wybrać jedną z czterech opcji – nas interesuje w tym momencie programowanie ustawień skanera przez kabel USB, wybierzmy więc opcję Online Device. Następnie trzeba podłączyć płytkę do komputera za pomocą środkowego gniazda USB (J5) i – naciskając przycisk TRIG (K1) – zeskanować wyświetlony na ekranie kod opatrzony nazwą *USB CDC COM Port*. Teraz można kliknąć przycisk Refresh – po kilku chwilach oprogramowanie powinno wykryć płytkę, co zostanie zasygnalizowane wyświetleniem podobizny naszego skanera w lewym górnym rogu okna (**rysunek 8**). Podwójne kliknięcie fotografii spowoduje przejście do okna konfiguracji, w którym możemy wybrać jedną z licznych zakładek, grupujących poszczególne ustawienia według podziału funkcjonalnego.

Załóżmy, że chcemy dodać do wyjściowego ciągu znaków (reprezentującego zawartość skanowanego kodu) obsługę prefiksów, które pozwalają na określenie rodzaju kodu (np. 'j' dla kodów Code 128, 'd' w przypadku EAN-13 i EAN-8 czy 'Q' w przypadku kodów QR). W tym celu należy przejść do zakładki 3. DATA FORMATTING, a następnie wybrać podzakładkę CODE ID i zmienić stan przełącznika, znajdującego się na górze strony (**rysunek 9**). Teraz możemy kliknąć przycisk Save to Device, znajdujący się na dole okna, po jego prawej stronie – spowoduje to zapisanie nowej konfiguracji w pamięci modułu, co zostanie potwierdzone stosownym komunikatem. W ten sposób możemy modyfikować niezliczone opcje i funkcje dodatkowe silników skanujących, zależnie od potrzeb docelowej aplikacji.

Niezwykle ciekawą i przydatną funkcjonalność oprogramowania EasySet stanowi możliwość podglądu obrazu z kamery. W tym celu należy przejść do zakładki 4. IMAGING, a następnie kliknąć przycisk Load Image (**rysunek 10**). Po chwili w oknie programu pojawi się rzeczywisty obraz zarejestrowany przez kamerę modułu. Mając podgląd tego, co naprawdę „widzi" silnik skanujący, możemy z niebywałą wprost łatwością optymalizować warunki mocowania modułu w obudowie, sprawdzać wpływ rodzaju i położenia okna optycznego na jakość obrazu, czy też analizować przyczyny ewentualnych problemów, wynikających np. z wyjątkowo niekorzystnych warunków oświetleniowych lub artefaktów innego pochodzenia.

Jeżeli pracujemy w trybie USB CDC lub używamy interfejsu UART, to dane wyjściowe generowane przez moduł możemy podejrzeć w dowolnym oprogramowaniu terminalowym (np. PuTTY w przypadku systemu Windows, czy też moserial w systemach linuksowych). Jak widać na **rysunku 11**, dane są domyślnie oddzielane znakami nowej linii, zaś ewentualny prefiks oznaczający rodzaj zeskanowanego kodu jest „doklejany" bezpośrednio przed właściwym ciągiem znaków.

Przykładowe aplikacje

Moduł EM3296V4 – ze względu na bardzo kompaktowe rozmiary, możliwość skanowania kodów drukowanych lub wyświetlanych na ekranach, a także prostą implementację i ogromny zakres funkcjonalności – doskonale nadaje się do użycia w rozmaitych urządzeniach przenośnych, stacjonarnych systemach wbudowanych czy też aplikacjach przemysłowych, związanych np. z identyfikacją obiektów na linii produkcyjnej. Do potencjalnych zastosowań modułu można zaliczyć m.in. noszone skanery do inwentaryzacji magazynów, kompaktowe skanery bezprzewodowe, terminale kurierskie, automaty paczkowe, czy też skanery stosowane przez kontrolerów biletów w komunikacji miejskiej.

inż. Przemysław Musz, EP

[1] EM3296 OEM scan engine user guide (https://t.ly/IuWWt)

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie
https://ulubionykiosk.pl/media

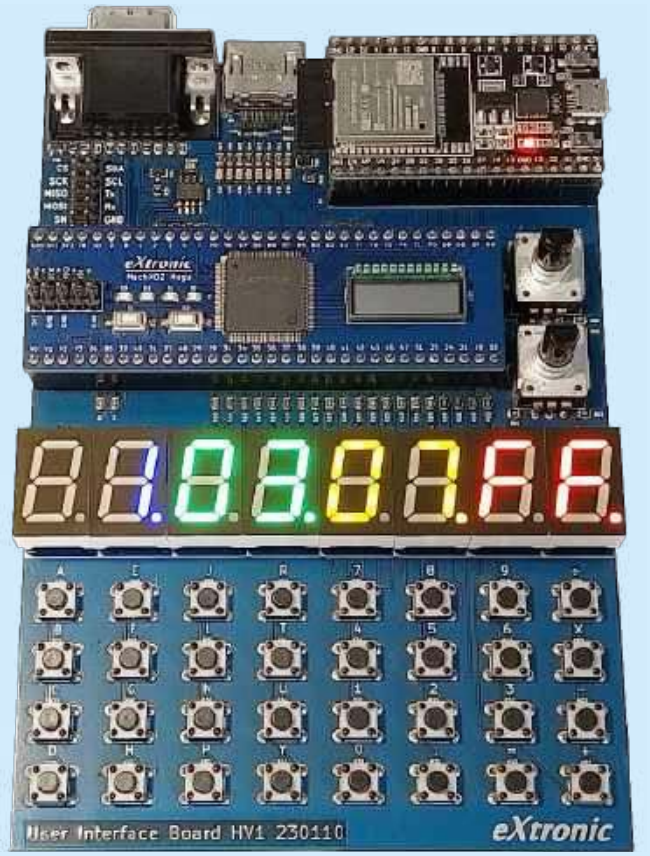
eprasa.pl f9fe7f8d6b

Kurs FPGA Lattice (26)

Slave SPI

Poprzednie odcinki znajdują się pod adresem: **https://ulubionykiosk.pl/media**

Interfejs SPI, obok UART oraz I²C, należy do najczęściej stosowanych łączy komunikacyjnych między mikrokontrolerami i innymi układami scalonymi, takimi jak wyświetlacze, pamięci, czujniki itp. W tym odcinku zobaczymy, jak wykonać moduł pełniący funkcję Slave SPI. Celem naszego ćwiczenia będzie zademonstrowanie komunikacji CPU-FPGA, przy czym CPU będzie odgrywać rolę mastera, wydającego polecenia układowi FPGA za pośrednictwem interfejsu SPI.



Trochę teorii

SPI wprowadza podział na urządzenia typu master oraz slave. Master rozpoczyna i kończy transmisję oraz generuje sygnał zegarowy. Slave musi odpowiadać na polecenia mastera, ale sam nie może zainicjować transmisji. Przy użyciu SPI można połączyć jednego mastera z – teoretycznie – nieskończoną liczbą układów slave. Zaletą SPI jest duża szybkość transmisji – bez najmniejszego problemu uzyskamy przepustowość rzędu 10 Mbit/s, nawet w przypadku prostych i tanich mikrokontrolerów. Współczesne wyświetlacze LCD potrafią odbierać dane przez SPI z prędkością nawet 80 MHz.

SPI korzysta z czterech linii sygnałowych:

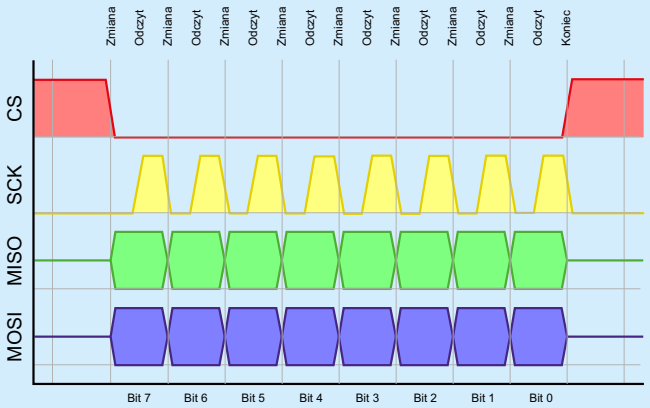
- **SCK (Serial Clock)** – sygnał zegarowy generowany przez mastera i odbierany przez wszystkie układy slave.
- **MOSI (Master Output, Slave Input)** – wyjście danych z układu master, połączone z wejściami wszystkich układów slave. Wszystkie slave'y mają zatem możliwość odbierania danych wysyłanych przez mastera, niezależnie od tego, który slave został przez niego wybrany za pomocą aktywnego sygnału CS.
- **MISO (Master Input, Slave Output)** – wyjście danych z układu slave, połączone z wejściem mastera. Jeżeli jest więcej niż jeden slave, to ich wyjścia połączone są ze sobą. Aby uniknąć wzajemnego zakłócania się wyjść (konfliktu na szynie danych), wyposaża się je w bufor trójstanowy, który odcina wyjście, kiedy slave nic nie nadaje. Przy takim rozwiązaniu możliwe jest, aby tylko jeden slave miał aktywne wyjście MISO, podczas gdy wszystkie pozostałe slave'y muszą ustawić te wyjścia w stan wysokiej impedancji.
- **CS (Chip Select)** – wyjście z układu master doprowadzone do wejścia wybierającego układu slave. Jeżeli na magistrali SPI mamy więcej układów slave, potrzebujemy po jednej osobnej linii CS na każdego slave'a. Kiedy linia CS pozostaje w stanie wysokim, slave jest nieaktywny. Aby uaktywnić slave'a, master ustawia na tej linii stan niski i utrzymuje go przez cały czas transmisji. Ustawienie CS w stan wysoki oznacza zakończenie komunikacji i dezaktywowanie układu slave. Czasami na wspomnianą linię dodaje się rezystory pull-up, aby mieć pewność, że slave nie uaktywni się przez przypadek, kiedy master nie działa (np. kiedy program procesora nie zdążył się jeszcze uruchomić).

Istnieją cztery tryby pracy interfejsu SPI, ponumerowane od 0 do 3 – zaprezentowano je w **tabeli 1**. Można wybrać polaryzację oraz fazę sygnału zegarowego. Omówimy skrótowo tryb pracy 0.

Zobaczmy **rysunek 1**, pokazujący cztery linie sygnałowe szyny SPI. Kiedy interfejs pozostaje nieaktywny, wówczas linia CS jest w stanie wysokim, linia zegarowa w stanie niskim, a MISO i MOSI znajdują się w stanie wysokiej impedancji (w niektórych

Tabela 1. Cztery tryby pracy interfejsu SPI

Tryb pracy SPI	Clock polarity CPOL	Stan linii SCK w spoczynku	Clock phase CPHA	Próbkowanie na zboczu
0	0	niski	0	rosnącym
1	0	niski	1	opadającym
2	1	wysoki	0	opadającym
3	1	wysoki	1	rosnącym



Rysunek 1. Przebiegi sygnałów na magistrali SPI pracującej w trybie 0

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie **https://ulubionykiosk.pl/media**

eprasa.pl f9fe7f8d6b

implementacjach MOSI może mieć taki stan, jaki miał ostatni transmitowany wcześniej bit).

Bity przesyłane są w kolejności od najstarszego do najmłodszego, zatem na liniach MISO i MOSI pojawiają się najstarsze bity z bajtów przesyłanych pomiędzy masterem a slave'em.

Kiedy sygnał zegarowy SCK przechodzi ze stanu niskiego na wysoki, wówczas master i slave odczytują stany swoich wejść danych i zapisują je w swoich rejestrach przesuwnych, w których przechowywane są kolejne bity odbieranych bajtów. W momencie wystąpienia zbocza opadającego sygnału SCK master i slave aktualizują stany linii MISO oraz MOSI.

Można powiedzieć, że transmisja bajtu danych przez SPI składa się z ośmiu cykli zegarowych, przy czym zmiana stanu linii MISO i MOSI następuje na początku każdego cyklu, a odczytanie stanu tych linii – w połowie cyklu.

Po przesłaniu ośmiu bitów możliwe jest przesłanie kolejnych danych, a jeżeli nie ma więcej bajtów do transmisji – linia CS przechodzi w stan wysoki, co sygnalizuje zakończenie transmisji.

Moduł SlaveSPI

Kod zaprezentowany na **listingu 1** umożliwi realizację urządzenia slave SPI, pracującego tylko w trybie 0. Pozwoliłem sobie na takie uproszczenie z dwóch powodów. Po pierwsze, tryb 0 jest najczęściej używany w różnego rodzaju pamięciach, wyświetlaczach oraz czujnikach. Po drugie, nasz układ FPGA będzie połączony z jakimś procesorem, odgrywającym rolę mastera (na płytce User Interface Board jest to popularny ESP32). Zmiana trybu pracy w mikrokontrolerze pozostaje tylko kwestią ustawiania jednego czy dwóch rejestrów. Zatem jest to dużo prostsze niż przygotowanie kodu w Verilogu, który byłby konfigurowalny za pomocą parametrów.

Omówmy listę portów modułu SlaveSPI:

- **Clock** – wejście zegara taktującego FPGA.
- **Reset** – wejście resetujące, aktywne w stanie niskim.
- **CS_i**, **SCK_i**, **MOSI_i** – wejścia interfejsu SPI, sterowane przez układ master. Trzeba pamiętać, że sygnały na tych wejściach nie są zsynchronizowane z domeną zegarową w FPGA.
- **MISO_o** – wyjście danych ze slave'a do mastera.
- **DataToSend_i[7:0]** – bajt danych, który ma zostać wysłany do mastera poprzez linię MISO.
- **DataReceived_o[7:0]** – bajt danych, który został odebrany od mastera poprzez linię MOSI.
- **TransactionDone_o** – wyjście informujące, że bajt danych został odebrany i można go odczytać z wyjścia DataReceived_o.
- **TransmissionStart_o** – wyjście informujące o rozpoczęciu transmisji (wykrycie zbocza opadającego na CS).
- **TransmissionEnd_o** – wyjście informujące o zakończeniu transmisji (wykrycie zbocza rosnącego na CS).

```
// Plik slave_spi.v

`default_nettype none

module SlaveSPI(
    input  wire Clock,
    input  wire Reset,

    input  wire CS_i,                   // Chip select, aktywny stan niski
    input  wire SCK_i,                  // Zegar generowany przez mastera
    input  wire MOSI_i,                 // Master Output, Slave Input
    output wire MISO_o,                 // Master Input, Slave Output

    input  wire [7:0] DataToSend_i,     // Bajt odpowiedzi do wysłania przez MISO
    output reg  [7:0] DataReceived_o,   // Bajt odebrany z MOSI
    output reg  TransactionDone_o,      // Stan wysoki po odebraniu bajtu
    output wire TransmissionStart_o,    // Stan wysoki po przejściu CS w stan niski
    output wire TransmissionEnd_o       // Stan wysoki po przejściu CS w stan wysoki
);

    // Synchronizacja wejść CS, SCK i MOSI z domeną zegarową
    wire SyncCS;                                                        // 1
    wire SyncSCK;
    wire SyncMOSI;

    Synchronizer #(                                                     // 2
        .WIDTH(3)
    ) Synchronizer_inst(
        .Clock(Clock),
        .Reset(Reset),
        .Async_i({CS_i, SCK_i, MOSI_i}),                                // 3
        .Sync_o({SyncCS, SyncSCK, SyncMOSI})                            // 4
    );

    // Rozpoznawanie zdarzeń
    wire TransmissionInProgress = !SyncCS;                              // 5
    wire InputSampleRequest;                                            // 6
    wire OutputShiftRequest;                                            // 7

    EdgeDetector EdgeDetectorCS(                                        // 8
        .Clock(Clock),
        .Reset(Reset),
        .Signal_i(SyncCS),                                              // 9
        .RisingEdge_o(TransmissionEnd_o),                               // 10
        .FallingEdge_o(TransmissionStart_o)                             // 11
    );

    EdgeDetector EdgeDetectorSCK(                                       // 12
        .Clock(Clock),
        .Reset(Reset),
        .Signal_i(SyncSCK),                                             // 13
        .RisingEdge_o(InputSampleRequest),                              // 14
        .FallingEdge_o(OutputShiftRequest)                              // 15
    );

    // Odbiornik
    reg [2:0] BitCounter;                                               // 16

    always @(posedge Clock, negedge Reset) begin                        // 17
        if(!Reset) begin
            BitCounter      <= 0;
            DataReceived_o  <= 0;
        end

        else if(TransmissionStart_o) begin                              // 18
            BitCounter      <= 0;
        end

        else if(TransmissionInProgress && InputSampleRequest) begin     // 19
            BitCounter      <= BitCounter + 1'b1;
            DataReceived_o  <= {DataReceived_o[6:0], SyncMOSI};         // 20
        end
    end

    // Nadajnik
    reg [7:0] DataToSend;                                               // 21

    always @(posedge Clock, negedge Reset) begin                        // 22
        if(!Reset) begin
            DataToSend <= 0;
        end

        else if(TransmissionStart_o ||
            (OutputShiftRequest && BitCounter == 3'd0)) begin
            DataToSend <= DataToSend_i;                                 // 23
        end

        else if(OutputShiftRequest) begin                               // 24
            DataToSend <= DataToSend << 1;
        end
    end

    // Wyjście nadajnika
    assign MISO_o = TransmissionInProgress ? DataToSend[7] : 1'bZ;      // 25

    // Wykrywanie końca transmisji bajtu
    always @(posedge Clock, negedge Reset) begin                        // 26
        if(!Reset)
            TransactionDone_o <= 0;
        else if(InputSampleRequest && BitCounter == 3'd7)               // 27
            TransactionDone_o <= 1;
        else
            TransactionDone_o <= 0;                                     // 28
    end

endmodule

`default_nettype wire
```

Listing. 1. Kod pliku slave_spi.v

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Na trzech ostatnich wyjściach pojawiać się będą sygnały strobe, czyli szpilki stanu wysokiego o długości jednego taktu zegarowego.

Zanim zaczniemy omawiać logikę nadajnika SPI, musimy zastanowić się nad problemem synchronizacji. Master i slave na ogół mają swoje własne układy zegarowe, nierzadko pracujące z zupełnie innymi częstotliwościami. Musimy w jakiś sposób zsynchronizować sygnały łączące te dwa układy, aby uniknąć problemu metastabilności. Istnieje kilka rozwiązań, które możemy zastosować w tym celu:

1. Najprostszym rozwiązaniem jest synchronizacja wejść CS, SCK i MOSI z domeną zegarową FPGA w taki sposób, jak to omawialiśmy w odcinku kursu poświęconemu metastabilności (odcinek 11, EP 09/2023). Wadę tego rozwiązania stanowi fakt, że częstotliwość sygnału na wejściu SCK musi być mniejsza od połowy częstotliwości zegara FPGA.
2. Inną opcją jest zastosowanie zegara SPI jako zegara taktującego logikę w FPGA. W tym przypadku konieczne jest, aby linia SCK była doprowadzona do wejścia PCLKTxx układu FPGA. Wtedy nie musimy nic synchronizować, bo cały układ FPGA jest „naturalnie" zsynchronizowany z masterem, jednak wadą tego rozwiązania jest to, że układ FPGA zupełnie nie działa, jeżeli master nie prowadzi komunikacji.
3. Rozwiązaniem pośrednim między dwoma powyższymi jest zastosowanie dwóch oddzielnych domen zegarowych. Pierwsza obejmowałaby całą logikę w FPGA z wyjątkiem modułu SPI, a druga zawierałaby tylko moduł SPI i byłaby taktowana zegarem SCK z mastera. Należałoby wtedy zsynchronizować jedynie sygnały komunikujące się między tymi dwiema domenami. Takie rozwiązanie pozwoliłoby na osiągnięcie dużej prędkości transmisji, lecz problem synchronizacji byłby bardziej skomplikowany i zasobochłonny niż w pierwszym przypadku.

W tym odcinku kursu zastosujemy rozwiązanie pierwsze. W przypadku zegara FPGA o częstotliwości 25 MHz umożliwia to komunikację z częstotliwością 10 MHz. W linii 1 oraz kilku kolejnych tworzymy zmienne typu wire dla sygnałów CS, SCK oraz MOSI po przejściu przez synchronizator. Sygnały te będą używane przez dalsze operacje.

W linii 2 tworzymy instancję modułu synchronizatora. Za pomocą parametru **WIDTH** określamy, że wejście i wyjście mają być 3-bitowe. Do wejścia sygnałów asynchronicznych doprowadzamy sygnały **CS_i**, **SCK_i**, **MOSI_i** sklejone ze sobą za pomocą operatora konkatenacji (linia 3). Wyjście sygnałów synchronicznych zrealizowane jest w bardzo podobny sposób (linia 4).

Następnie musimy zająć się wykrywaniem specyficznych zdarzeń. Sygnały, które omówimy w trzech następnych akapitach, będą służyły do sterowania logiką nadajnika oraz odbiornika SPI.

W linii 5 tworzymy zmienną wire **TransmissionInProgress**, której stan wysoki informować będzie, że właśnie trwa transmisja na magistrali. Zmienna ta jest w gruncie rzeczy zanegowanym sygnałem CS po synchronizacji z domeną zegarową FPGA.

Przejdźmy teraz do linii 8. Tworzymy tam pierwszą z dwóch instancji detektorów zboczy. Instancja ta analizuje sygnał CS (oczywiście zsynchronizowany), który doprowadzony jest do wejścia **Signal_i** (linia 9). Zbocze opadające oznacza rozpoczęcie transmisji, co powoduje wystąpienie stanu wysokiego o długości jednego cyklu zegarowego na wyjściu **TransmissionStart_o** (linia 11). Natomiast zbocze rosnące oznacza zakończenie transmisji, co będzie sygnalizowane za pośrednictwem wyjścia **TransmissionEnd_o** (linia 10).

W linii 12 tworzymy drugą instancję wykrywacza zboczy – będzie ona analizować sygnał zegarowy SCK (linia 13). Zgodnie z teorią zaprezentowaną na początku artykułu, zbocze rosnące sygnału SCK ma powodować odczytanie linii MISO/MOSI. Zatem wykrycie takiego zbocza ustawi stan wysoki przez jeden takt zegarowy na zmiennej **InputSampleRequest** typu wire (linia 14), która została zadeklarowana wcześniej w linii 6. Analogicznie, zbocze opadające zegara SCK ma spowodować zmianę stanu MISO/MOSI. Zatem wykrycie tego zbocza ustawi stan wysoki na pojedynczy takt zegara na zmiennej **OutputShiftRequest** typu wire (linia 15), która została zadeklarowana w linii 7.

Następnie możemy sporządzić trzy bloki always: odbiornik, nadajnik oraz blok odpowiedzialny za wykrywanie końca transmisji całego bajtu. Ponadto musimy utworzyć 3-bitowy licznik **BitCounter**, aby móc odliczać osiem transmitowanych bitów, co czynimy w linii 16.

W linii 17 rozpoczynamy pierwszy blok always, odpowiedzialny za logikę odbiornika, obsługującą wejście MOSI. W chwili wykrycia rozpoczęcia transmisji (linia 18) następuje wyzerowanie licznika **BitCounter**. Jeżeli podczas trwającej transmisji pojawi się sygnał, że należy próbkować wejście MOSI (linia 19), to inkrementujemy licznik **BitCounter** i jednocześnie rejestr **DataReceived_o** przesuwamy w lewo, a w miejsce najmłodszego bitu wstawiamy wartość odczytaną z wejścia MOSI. Robimy to za pomocą operatora konkatenacji, którym sklejamy dotychczasową wartość bitów [6:0] rejestru **DataReceived_o** z wartością zmiennej **SyncMOSI** (linia 20).

Można zapytać, dlaczego w linii 19 sprawdzamy dwa warunki **TransmissionInProgress** && **InputSampleRequest**, a nie tylko **InputSampleRequest**? Otóż **InputSampleRequest** zależy wyłącznie od wejścia zegarowego SCK, które jest wspólne dla wszystkich urządzeń slave. Kiedy master nawiązuje komunikację z jakimś innym slave'em, wówczas na zmiennej **InputSampleRequest** również występują szpilki stanu wysokiego. W takiej sytuacji nie chcemy wykonywać żadnych czynności. Dlatego musimy także sprawdzić zmienną TransmissionInProgress, odzwierciedlającą stan wejścia CS, które jest oddzielne dla każdego urządzenia slave.

Możemy teraz przejść do omówienia logiki nadajnika. W linii 21 tworzymy 8-bitowy rejestr **DataToSend**, którego celem jest przechowywanie bajtu aktualnie transmitowanego poprzez wyjście MISO. Do tego rejestru kopiowany jest stan wejścia **DataToSend_i** (linia 23), kiedy spełniony zostaje jeden z dwóch warunków:

- Pojawił się sygnał **TransmissionStart_o**, informujący o rozpoczęciu transmisji,
- Jednocześnie pojawiło się żądanie przesłania kolejnego bitu i licznik **BitCounter** wskazuje zero – to znaczy, że slave przesłał już jeden bajt, a master chce otrzymać kolejny.

Natomiast – kiedy te warunki nie są spełnione – sprawdzamy, czy pojawił się stan wysoki w zmiennej **OutputShiftRequest**: jeżeli tak, to przesuwamy rejestr **DataToSend** o jeden bit w lewo (linia 24).

Pin wyjściowy **MOSI_o** powinien być wyposażony w bufor trójstanowy, aby uniemożliwić sytuację, w której linia MOSI jest wysterowana przez dwa slave'y jednocześnie. W tym celu posłużymy się instrukcją assign oraz operatorem warunkowym **:?** – występującym również w C i C++. Jeżeli transmisja trwa, wyjście **MISO_o** łączymy z siódmym bitem rejestru **DataToSend**. Natomiast jeżeli w danej chwili nie ma aktywnej transmisji, wyjście **MISO_o** ustawiane jest w stan wysokiej impedancji, reprezentowany symbolem **1'bZ** (linia 25). Należy zwrócić uwagę, że zasoby logiczne wewnątrz FPGA nie mogą w żaden sposób ustawić stanu wysokiej impedancji. Może to zrobić tylko driver I/O, który bezpośrednio steruje pinem układu scalonego. Dlatego zaleca się, aby sterowanie trójstanowe umieszczać jedynie w module **top** lub w modułach podrzędnych – pod warunkiem że wyjście trójstanowe modułu podrzędnego poprowadzone jest prosto do wyjścia modułu top.

Pozostaje trzeci blok always (linia 25), którego celem jest ustawienie wyjścia **TransactionDone_o** w stan wysoki na jeden takt zegarowy, jeżeli przetransmitowanych zostanie osiem bitów. Zadanie to okazuje się bardzo proste do realizacji. Wystarczy sprawdzić

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie
https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b

tylko, czy w stanie wysokim jest sygnał żądający **odczytania** wejścia MOSI (**InputSampleRequest**) oraz czy w tej samej chwili licznik **BitCounter** równy jest 7 (linia 27). Jeżeli tak, to ustawiamy **TransactionDone_o** w stan wysoki, a w każdym innym przypadku ustawiamy tę zmienną w stan niski (linia 28).

Testbench modułu SlaveSPI

Przed opracowaniem modułu top i wgraniem bitstreamu do FPGA musimy najpierw przetestować go w symulatorze. Testujemy moduł slave, zatem testbench musi symulować układ master i generować sygnały CS, SCK oraz MOSI. Przejdźmy do omówienia kodu pokazanego na **listingu 2**.

Częstotliwość zegara w testowanym module ustawiamy na 1 MHz (linia 1). Poniżej, w linii 2, mamy parametr określający czas pomiędzy zboczami sygnału zegarowego SCK, mierzony w jednostkach symulacji, tzn. konkretnie w nanosekundach (bo tak zostało to ustawione instrukcją **`timescale**). Wartość 7894 wydaje się trochę dziwna. Użyłem jej celowo, aby zasymulować działanie mastera w innej domenie zegarowej niż domena testowanego modułu.

Następnie deklarujemy zmienne typu reg, którymi sterować będzie kod testbencha. Ich znaczenie jest oczywiste, z wyjątkiem 8-bitowej zmiennej **ResponseData** (linia 3). Jest to odpowiedź modułu slave, jaką ma on przesłać do mastera poprzez linię MISO.

W linii 4 tworzymy instancję testowanego modułu. Myślę, że nie wymaga ona komentarza.

Jeśli chcemy wyświetlać na konsoli odebrane bajty, musimy w tym celu napisać prosty blok always. W linii 5 tworzymy taki blok, który reagować będzie na zbocze rosnące sygnału **TransactionDone_o** z instancji testowanego modułu. Sygnał ten przyjmuje stan wysoki, kiedy moduł odbierze bajt danych z SPI i jest on gotowy do odczytania na wyjściu **DataReceived_o**. Wewnątrz bloku always mamy tylko prostą instrukcję **$display**, której celem jest wyświetlanie aktualnego czasu symulacji oraz wartości odebranego bajtu w formacie szesnastkowym i binarnym.

W linii 6 tworzymy task **TransmitSPI** – jego rolą będzie symulowanie mastera poprzez odpowiednie sterowanie liniami SCK oraz MOSI, które de facto są zmiennymi zdefiniowanymi wcześniej. Ma on jedno 8-bitowe wejście **Data** i poprzez nie przekazywać będziemy bajt danych do wysłania linią MOSI. Task ma pętlę for, zatem iterator pętli musimy zadeklarować wcześniej (uwaga dla programistów przyzwyczajonych do C++). Iterator pętli **i** (typu integer) tworzymy w linii 7, przed blokiem begin-end zawierającym ciało tasku.

Wewnątrz tasku mamy instrukcję **$display** (linia 8), wyświetlającą na konsoli czas oraz wartość wysyłanego bajtu – podobny zapis pojawił się dwa akapity wcześniej. Dalej mamy pętlę for (linia 9), na początku której ustawiamy iterator **i** na wartość 7, a następnie zmniejszamy go aż do zera. Pamiętaj, że bity przesyłamy w kolejności od najstarszego do najmłodszego. Wewnątrz pętli znajdują się instrukcje sterujące liniami SCK i MOSI, a także opóźnienie **SCK_DELAY**, którego wartość została ustawiona w linii 2.

Przechodzimy do sekwencji testowej. W linii 10 rozpoczynamy wysłanie bajtu 8'h80 z mastera do slave'a, a slave ma odpowiedzieć bajtem 8'h01. W linii 11 przesyłamy bajt 8'h40 do jakiegoś innego slave'a, którego nie ma w symulacji. Zwróć uwagę, że w tym przypadku nie ustawiamy linii CS w stan niski. Badany moduł ma zignorować tę transmisję.

```
// Plik slave_spi_tb.v

`timescale 1ns/1ns
`default_nettype none

module SlaveSPI_tb();

    // Configuration
    parameter CLOCK_HZ  = 1_000_000;                          // 1
    parameter SCK_DELAY = 7894;                               // 2

    // Generator sygnału zegarowego
    reg Clock = 1'b1;
    always begin
        #(1_000_000_000.0 / (2 * CLOCK_HZ));
        Clock = !Clock;
    end

    // Zmienne
    reg Reset = 0;
    reg CS    = 1;
    reg SCK   = 0;
    reg MOSI  = 0;
    reg [7:0] ResponseData = 0;                               // 3

    // Eksport wyników symulacji
    initial begin
        $dumpfile("slave_spi.vcd");
        $dumpvars(0, SlaveSPI_tb);
    end

    // Instancja testowanego modułu
    SlaveSPI DUT(                                             // 4
        .Clock(Clock),
        .Reset(Reset),
        .CS_i(CS),                      // Chip select, aktywny stan niski
        .SCK_i(SCK),                    // Serial clock
        .MOSI_i(MOSI),                  // Master Out, Slave In
        .MISO_o(),                      // Master In, Slave Out
        .DataToSend_i(ResponseData),    // Bajt do wysłania przez MISO
        .DataReceived_o(),              // Bajt odebrany z MOSI
        .TransactionDone_o(),
        .TransmissionStart_o(),
        .TransmissionEnd_o()
    );

    // Komunikat po odebraniu bajtu danych
    always @(posedge DUT.TransactionDone_o) begin             // 5
        $display("%t Received:     %H %b",
            $realtime,
            DUT.DataReceived_o,
            DUT.DataReceived_o
        );
    end

    // Task wysyłający bajt danych z mastera do slave'a
    task TransmitSPI(input [7:0] Data);                       // 6
        integer i;                                            // 7
        begin
            $display("%t Transmitting: %H %b",                // 8
                $realtime,
                Data,
                Data
            );
            for(i=7; i>=0; i=i-1) begin                       // 9
                SCK = 0;
                MOSI = Data[i];
                #SCK_DELAY;
                SCK = 1;
                #SCK_DELAY;
            end
        end
    endtask

    // Sekwencja testowa
    initial begin
        $timeformat(-6, 3, "us", 10);
        $display("===== START =====");
        $display("SCK freq is %f Hz", 1_000_000_000.0 / (2 * SCK_DELAY));

        @(posedge Clock);
        Reset <= 1'b1;

        repeat(5) #SCK_DELAY;

        // Wyślij 1 bajt do testowanego slave'a
        CS = 0;                                               // 10
        ResponseData = 8'h01;
        TransmitSPI(8'h80);
        CS = 1;
        #SCK_DELAY;

        // Wyślij 1 bajt do innego slave'a
        ResponseData = 8'h02;                                 // 11
        TransmitSPI(8'h40);
        #SCK_DELAY;

        // Wyślij 2 bajty do testowanego slave'a
        CS = 0;                                               // 12
        ResponseData = 8'h04;
        TransmitSPI(8'h20);
        #SCK_DELAY;
        TransmitSPI(8'h10);
        CS = 1;

        repeat(5) #SCK_DELAY;

        $display("====== END ======");
        $finish;
    end

endmodule
```

Listing 2. Kod pliku slave_spi_tb.v

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b

```
@echo off
iverilog -o slave_spi.o ^
    slave_spi.v         ^
    slave_spi_tb.v      ^
    edge_detector.v     ^
    synchronizer.v
vvp slave_spi.o
del slave_spi.o
```

Listing 3. Kod pliku slave_spi.bat

```
VCD info: dumpfile slave_spi.vcd opened for output.
===== START =====
SCK freq is 63339.244996 Hz
  40.470us Transmitting: 80 10000000
 161.000us Received:     80 10000000
 174.668us Transmitting: 40 01000000
 308.866us Transmitting: 20 00100000
 430.000us Received:     20 00100000
 443.064us Transmitting: 10 00010000
 564.000us Received:     10 00010000
====== END ======
slave_spi_tb.v:101: $finish called at 608838 (1ns)
```

Listing 4. Wynik widoczny na konsoli symulatora

W linii 12 wysyłamy dwa bajty do testowanego slave'a. Celem tego testu jest sprawdzenie, czy moduł może odebrać więcej niż jeden bajt w pojedynczej transmisji.

Aby uruchomić symulację, potrzebujemy skryptu, którego kod pokazany został na **listingu 3**.

Wynik symulacji widać na **listingu 4** oraz na **rysunku 2**.

Moduł top

Moduł top ma pełnić funkcję prostego demonstratora interfejsu SPI. Jego celem będzie pokazanie na wyświetlaczu 7-segmentowym czterech ostatnich bajtów, odebranych od mastera. Ponadto moduł ma odsyłać do mastera poprzednio odebrany bajt. Przeanalizujmy kod widoczny na **listingu 5**.

Na początku deklarujemy kilka zmiennych. W linii 1 i kolejnych mamy cztery 8-bitowe rejestry, w których przechowywane będą cztery ostatnio odebrane bajty. W linii 2 deklarujemy 8-bitową zmienną **DataReceived** typu wire – jej zadaniem jest przekazywanie danych z wyjścia modułu SlaveSPI do logiki zapisującej odebrane bajty. Analogicznie, w linii 3 zmienna **ReceivedEvent** typu wire przekazuje sygnał, że bajt odebrany przez moduł SlaveSPI jest gotowy do odczytu.

Instancję modułu obsługującego SPI tworzymy w linii 4. Moduł ma wysyłać ostatnio odebrany bajt, zatem jego wejście **DataToSend_i** połączone jest z rejestrem **Byte0** (linia 5). Wyjście danych oraz wyjście informujące o odebraniu bajtu podłączone są do dwóch zmiennych typu wire, omówionych w poprzednim akapicie (linie 6 i 7). Wyjście informujące o rozpoczęciu i zakończeniu transmisji pozostawiany niepołączone do niczego.

Następnie mamy prosty blok always, którego celem jest obsługa pamięci ostatnich bajtów. W linii 8 sprawdzamy, czy sygnał **ReceivedEvent** jest w stanie wysokim. Jeżeli tak, to do **Byte0** wpisujemy wartość z **DataReceived**, które połączone jest z wyjściem **DataReceived_o** modułu **SlaveSPI**. Natomiast do kolejnych Byte 3/2/1 wpisujemy dotychczasowe wartości z Byte 2/1/0.

Pozostaje już tylko utworzyć dobrze znaną instancję wyświetlacza multipleksowanego LED, z którego korzystaliśmy w kursie już wiele razy (linia 9). Do wejścia danych wyświetlacza doprowadzamy 32-bitową wartość powstałą w wyniku sklejenia ze sobą wszystkich czterech poprzednio odebranych bajtów (linia 10).

Przeprowadź syntezę, otwórz Spreadsheet i skonfiguruj piny tak, jak to pokazano na **rysunku 3**, a następnie wygeneruj bitstream i wgraj go do FPGA.

Aplikacja testowa na ESP32

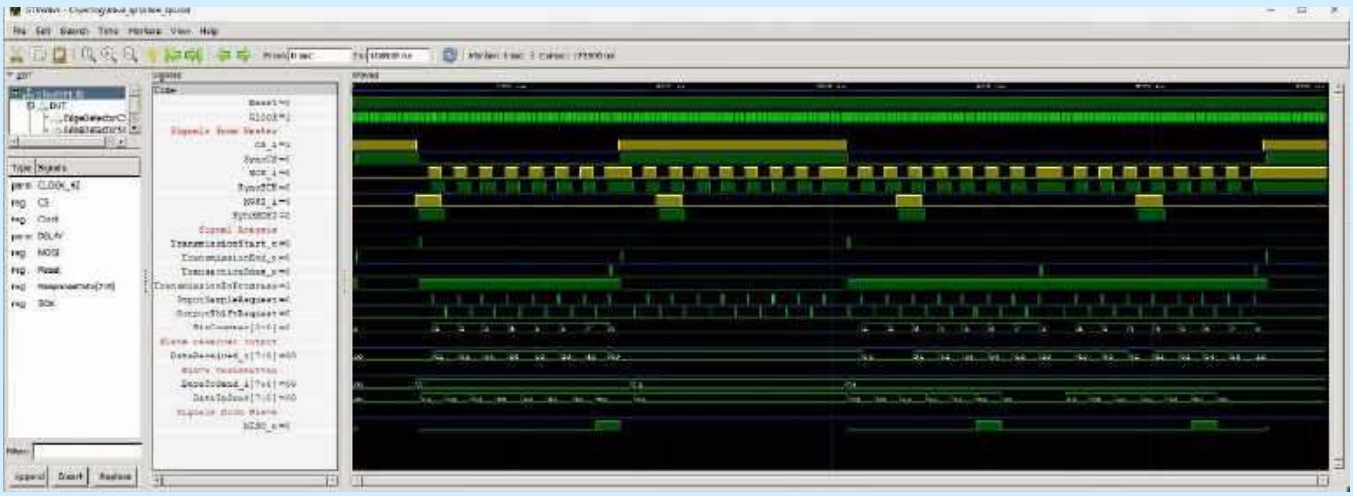
W celu demonstracji działania modułu SlaveSPI użyjemy płytek MachXO2 Mega, User Interface Board oraz ESP32-DevKitC – ta ostatnia będzie pracować w roli mastera. Wybrałem ESP32 ze względu na popularność i łatwość programowania w MicroPythonie. Jeżeli Czytelnik nie dysponuje tą płytką, może zastosować dowolny mikrokontroler i podłączyć go kabelkami do złącza J5 zgodnie z opisem na płytce.

Omówimy teraz w telegraficznym skrócie, jak zainstalować MicroPythona na ESP32. Do pisania programów będziemy używać środowiska Thonny, które jest bardzo proste w obsłudze i dobrze automatyzuje komunikację z ESP32. Program Thonny potrafi sam zainstalować w pamięci ESP32 właściwy firmware, obsługujący MicroPythona. Pobierz instalator spod adresu [3], a następnie zainstaluj program. Instalacja jest banalna i nie wymaga komentarza.

Podłącz płytkę ESP32-DevKitC do komputera poprzez USB i uruchom program Thonny. Musimy skonfigurować program i wybrać, z jakim procesorem chcemy pracować (środowisko obsługuje między innymi także ESP8266, Raspberry Pi Pico, BBC micro:bit oraz „zwykłego" Pythona na komputery osobiste).

Z górnego paska menu wybierz **Narzędzia**, a następnie **Opcje**, po czym kliknij zakładkę Interpreter. W polu wyboru interpretera wybierz **MicroPython (ESP32)** i poniżej ustaw właściwy port COM, przez który komunikuje się płytka ESP32 (uwaga – płytka programatora USB-JTAG do FPGA również może działać jako wirtualny port COM). Kliknij pole **Zainstaluj lub zaktualizuj MicroPython** na dole okna. Otworzy się nowe okienko z różnymi parametrami. Skonfiguruj wszystkie opcje tak, jak zaprezentowano to na **rysunku 4**, po czym kliknij przycisk **Zainstaluj**. Wgrywanie firmware zajmuje kilkadziesiąt sekund.

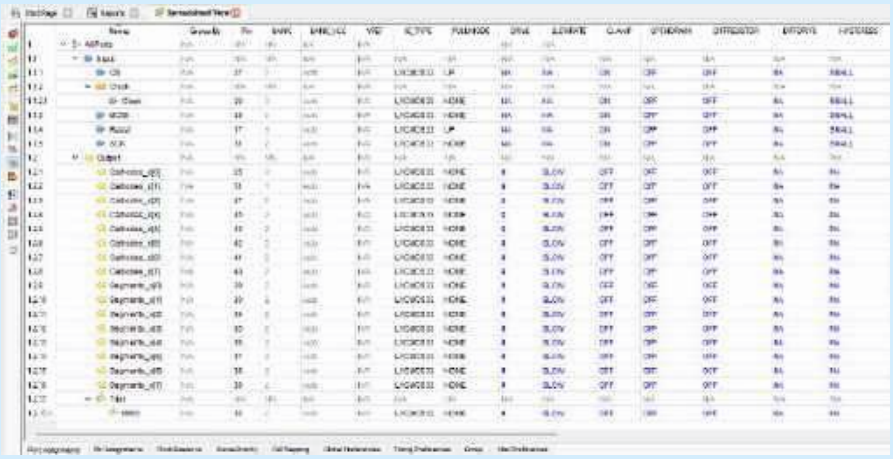
Tym, co wgraliśmy do ESP32, jest interpreter języka Python. Działa bardzo podobnie do tego, który możemy zainstalować



Rysunek 2. Przebiegi uzyskane w wyniku symulacji

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Rysunek 3. Konfiguracja pinów w Spreadsheet

Rysunek 4. Parametry instalacji MicroPythona w ESP32

na zwykłym komputerze. Możemy wydawać mu polecenia ręcznie w konsoli, a także uruchamiać różne skrypty, zapisane w plikach na komputerze lub w systemie plików na ESP32. MicroPython ma domyślnie zainstalowane różne przydatne biblioteki do obsługi peryferiów ESP32, łączenia z Wi-Fi czy Bluetooth oraz wiele innych przydatnych możliwości, a jeżeli czegoś brakuje – możemy rozszerzać jego funkcjonalność, wgrywając dodatkowe biblioteki. Zachęcam do samodzielnego przejrzenia strony projektu [4], gdzie opisano, jak stosować ten język do obsługi ESP32.

Jednak w kursie języka Verilog nie będę rozwodził się nad możliwościami Pythona, bo jest to temat na osobny artykuł. Postaram się natomiast zaprezentować absolutne minimum, aby tylko przetestować w praktyce kody, które wgrywamy do FPGA. Nie będę używał żadnych zaawansowanych „bajerów" programistycznych, lecz ograniczę się do podstawowych, łatwych do opanowania instrukcji, aby kurs był zrozumiały dla osób, które jeszcze nie miały styczności z Pythonem.

Wróćmy do programu Thonny. Po zainstalowaniu interpretera w ESP32 powinniśmy ujrzeć widok podobny do tego, jaki pokazano na **rysunku 5**. W centralnej części ekranu znajduje się edytor kodu. Poniżej jest konsola, w której możemy wpisywać polecenia. W tym miejscu będziemy także widzieć komunikaty wyświetlane przez programy. Po lewej stronie na górze znajdują się pliki zapisane na komputerze, a w lewym dolnym rogu – pliki przechowywane w pamięci ESP32. Okienka po prawej stronie, w których pokazane są zmienne, ich wartości, lista funkcji, itp., domyślnie są wyłączone. Można je włączyć w menu **Podgląd**.

Omówmy teraz prosty kod demonstracyjny, widoczny na **listingu 6**. Jego zadaniem jest przesłanie czterech bajtów z ESP32 do FPGA, a następnie wyświetlenie na konsoli czterech bajtów, które FPGA przesłało do ESP32. Ponieważ jest to kurs języka Verilog, a nie Python, omówimy kod linia po linii, lecz bardzo skrótowo:

1. Importujemy potrzebne moduły, tzn. obsługę pinów GPIO oraz SPI.
2. Inicjalizujemy pin CS, ponieważ SPI w MicroPythonie kontroluje jedynie piny MISO, MOSI i SCK, a linię CS musimy wysterować sami.
3. Inicjalizujemy interfejs SPI, podając do niego różne informacje konfiguracyjne. Między innymi są to: częstotliwość zegara oraz informacja, które piny ESP32 mają pełnić funkcję MISO, MOSI i SCK.
4. Wyświetlamy parametry utworzonego wcześniej interfejsu.
   Przy ustawianiu wysokich częstotliwości zegara SCK

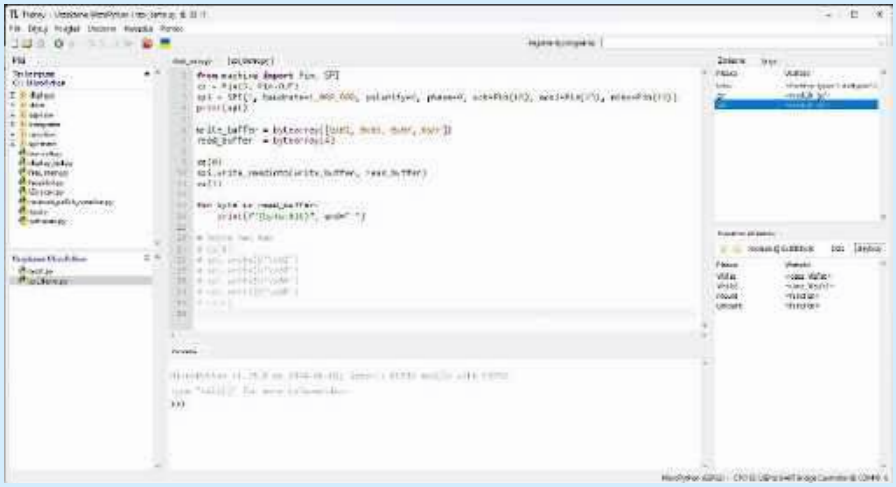
```
// Plik top.v

`default_nettype none

module top #(
    parameter CLOCK_HZ = 25_000_000
)(
    input wire Clock,                // Pin 20
    input wire Reset,                // Pin 17
    input wire CS,                   // Pin 27
    input wire SCK,                  // Pin 31
    input wire MOSI,                 // Pin 49
    output wire MISO,                // Pin 32
    output wire [7:0] Cathodes_o,    // Pin 40 41 42 43 45 47 51 25
    output wire [7:0] Segments_o     // Pin 39 38 37 36 35 34 30 29
);

    // Cztery ostatnio odebrane bajty
    reg [7:0] Byte0 = 0;                                    // 1
    reg [7:0] Byte1 = 0;
    reg [7:0] Byte2 = 0;
    reg [7:0] Byte3 = 0;

    wire [7:0] DataReceived;                                // 2
    wire ReceivedEvent;                                     // 3

    SlaveSPI SlaveSPI_inst(                                 // 4
        .Clock(Clock),
        .Reset(Reset),
        .CS_i(CS),
        .SCK_i(SCK),
        .MOSI_i(MOSI),
        .MISO_o(MISO),
        .DataToSend_i(Byte0),                               // 5
        .DataReceived_o(DataReceived),                      // 6
        .TransactionDone_o(ReceivedEvent),                  // 7
        .TransmissionStart_o(),
        .TransmissionEnd_o()
    );

    // Kiedy zostanie odebrany nowy bajt, umieść go na pozycji zerowej
    // a dotychczasowe bajty przesuń na kolejną pozycję
    always @(posedge Clock, negedge Reset) begin
        if(!Reset) begin
            Byte0 <= 0;
            Byte1 <= 0;
            Byte2 <= 0;
            Byte3 <= 0;
        end

        else if(ReceivedEvent) begin                        // 8
            Byte0 <= DataReceived;
            Byte1 <= Byte0;
            Byte2 <= Byte1;
            Byte3 <= Byte2;
        end
    end

    // Instancja wyświetlacza
    DisplayMultiplex #(                                     // 9
        .CLOCK_HZ(CLOCK_HZ),
        .SWITCH_PERIOD_US(1000),
        .DIGITS(8)
    ) DisplayMultiplex_inst(
        .Clock(Clock),
        .Reset(Reset),
        .Data_i({Byte3, Byte2, Byte1, Byte0}),              // 10
        .DecimalPoints_i(8'b01010101),
        .Cathodes_o(Cathodes_o),
        .Segments_o(Segments_o),
        .SwitchCathode_o()
    );

endmodule

`default_nettype wire
```

Listing 5. Kod pliku top.v

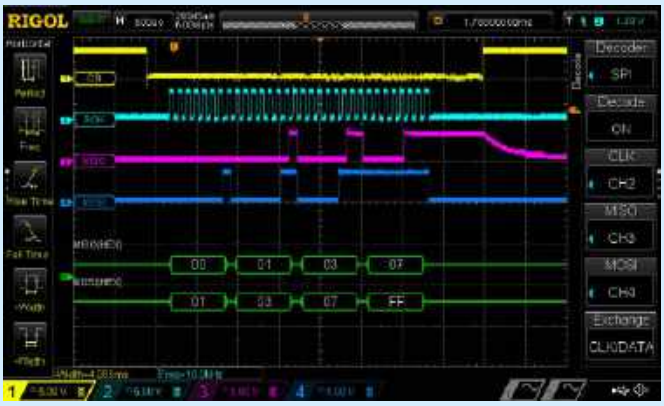
Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie **https://ulubionykiosk.pl/media**

eprasa.pl f9fe7f8d6b

program może obniżyć częstotliwość do wartości możliwej do osiągnięcia.
5. Tworzymy bufor, który zostanie wysłany do FPGA. Zapisujemy w nim cztery bajty.
6. Tworzymy bufor o długości 4 bajtów, w którym zapisana będzie odpowiedź otrzymana od FPGA.
7. Ustawiamy pin CS w stan niski, co aktywuje transmitter slave w FPGA.
8. Przeprowadzamy transmisję, wysyłamy **write_buffer**, a otrzymane dane zapisujemy do **read_buffer**.
9. Ustawiamy pin CS w stan wysoki, aby zakończyć transmisję.
10. Rozpoczynamy pętlę, która dla każdego bajtu z bufora odczytowego…



Rysunek 5. Edytor Thonny



Rysunek 6. Zapis z oscyloskopu

11. …ma wyświetlić ten bajt w formacie szesnastkowym.

Aby uruchomić kod, wystarczy nacisnąć F5 na klawiaturze. Na konsoli zobaczymy komunikaty, jak na **listingu 7**, a na płytce User Interface Board powinniśmy zobaczyć przesłane bajty – tak jak to pokazano na **fotografii tytułowej**. Na **rysunku 6** widzimy także przebiegi sygnałów, zapisane za pomocą oscyloskopu. Zwróć uwagę na powolne opadanie linii MISO po zakończonej transmisji. Jest to efekt przełączenia się pinu MISO układu slave w stan wysokiej impedancji. Wtedy ta linia nie jest przez nic wysterowana i powoli rozładowuje się jej pojemność pasożytnicza.

Interfejs SPI opracowany w tym odcinku będziemy jeszcze wielokrotnie stosować. W następnym odcinku poznamy podstawy działania VGA, a w kolejnym wykonamy replikę popularnego i niedrogiego sterownika wyświetlacza OLED typu SSD1309, która – jak zapewne się domyślasz – sterowana będzie z ESP32 przez SPI, a obraz będzie wyświetlany na monitorze z interfejsem VGA, zamiast matrycy OLED.

```
from machine import Pin, SPI                                  # 1
cs = Pin(5, Pin.OUT)                                          # 2
spi = SPI(2, baudrate=1_000_000, polarity=0, phase=0,         # 3
      sck=Pin(18), mosi=Pin(23), miso=Pin(19))
print(spi)                                                    # 4

write_buffer = bytearray([0x01, 0x03, 0x07, 0xFF])            # 5
read_buffer  = bytearray(4)                                   # 6

cs(0)                                                         # 7
spi.write_readinto(write_buffer, read_buffer)                 # 8
cs(1)                                                         # 9

for byte in read_buffer:                                      # 10
    print(f"{byte:02X}", end=" ")                             # 11

# Można też tak
# cs(0)
# spi.write(b'\x01')
# spi.write(b'\x03')
# spi.write(b'\x07')
# spi.write(b'\xFF')
# cs(1)
```

Listing 6. Kod pliku spi_demo.py

Zobacz więcej:

- Repozytorium modułów użytych w kursie: https://github.com/leonow32/verilog-fpga
- Projekt w programie Diamond: https://tiny.pl/yvpz6jg4
- Program Thonny: https://thonny.org/
- MicroPython reference for ESP32: https://docs.micropython.org/en/latest/esp32/quickref.html

Dominik Bieczyński
leonow32@gmail.com

```
MPY: soft reboot
SPI(id=2, baudrate=1000000, polarity=0, phase=0, bits=8, firstbit=0, sck=18, mosi=23, miso=19)
00 01 03 07
```

Listing. 7 Efekt działania programu testowego

REKLAMA

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Pomiary charakterystyk częstotliwościowych (1)

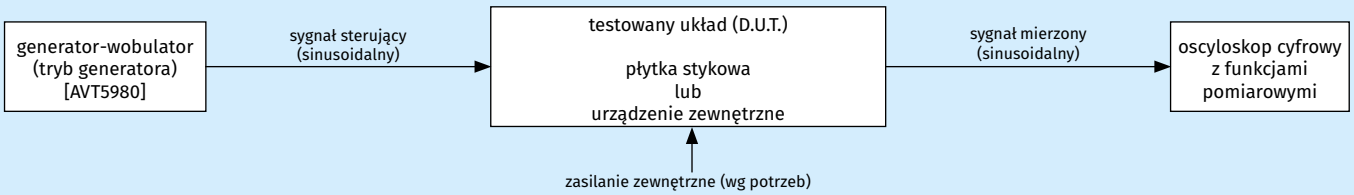
Filtry bierne m.cz.

Niniejszy artykuł rozpoczyna cykl publikacji poświęconych praktycznym pomiarom charakterystyk częstotliwościowych liniowych układów przetwarzania sygnałów analogowych. W tej serii omawiane będą zarówno układy czysto analogowe, jak i te, w których wykorzystywane są techniki tzw. cyfrowego przetwarzania sygnałów (DSP). W wybranych pomiarach zastosujemy (oprócz zasilacza laboratoryjnego, multimetru cyfrowego oraz podstawowego oscyloskopu cyfrowego) także: generator-wobulator AVT5980 (EP 4...6/2023) oraz szerokopasmową sondę logarytmiczną AVT5991 (EP 8...9/2024), tworzące zgrany tandem pomiarowy. W tej części publikacji uwaga Czytelników zostanie skupiona na właściwościach prostych, pasywnych filtrów RC małej częstotliwości.

Metodyka pomiarów i zastosowane układy

Jak wspomniano we wstępie do artykułu, w przeprowadzonych testach jako źródło sygnału pomiarowego zastosowano generator-wobulator z modułem DDS (AVT5980, EP 4...6/2023), który – w zależności od partykularnych potrzeb i wymaganej dokładności pomiarów – pracował albo jako generator przestrajany ręcznie, albo w trybie wobulatora z przemiataniem automatycznym, tj. liniowym w wybranym zakresie częstotliwości. W pierwszym przypadku układ pomiarowy wyglądał tak, jak na schemacie ideowym z **rysunku 1** i był stosowany wtedy, gdy wymagane tempo przestrajania wobulatora było zbyt małe w stosunku do możliwości tego przyrządu. Wówczas rezultaty pomiarów były odczytywane ręcznie i wprowadzane do tabel, na podstawie których powstawały stosowne wykresy. Natomiast w przypadku drugim zastosowano układ z **rysunku 2**, w którym charakterystyka częstotliwościowa była pobierana wprost z ekranu oscyloskopu pracującego w trybie „X/Y".

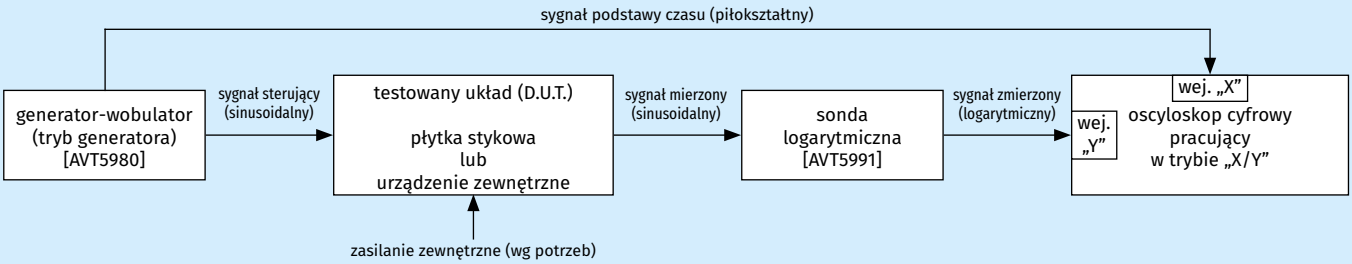
Do każdego z rozpatrywanych układów wykonano symulacje komputerowe za pomocą popularnego i sprawdzonego oprogramowania LTSpice dystrybuowanego przez firmę Linear Technologies (LT). Symulacje te miały przede wszystkim dwa cele. Pierwszym było umożliwienie oceny tego, czy zaprojektowany filtr – przynajmniej teoretycznie – spełnia oczekiwania postawione przez jego konstruktora. Drugim celem była ocena tego, czy i w jakim stopniu badany prototyp jest zgodny ze swoim teoretycznym pierwowzorem. Takie weryfikacje



Rysunek 1. Układ pomiarowy z zastosowaniem generatora i oscyloskopu cyfrowego

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie https://ulubionykiosk.pl/media

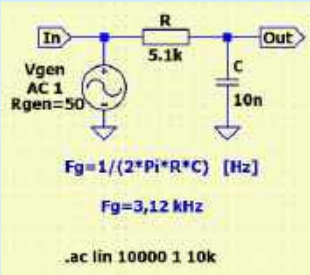
eprasa.pl f9fe7f8d6b



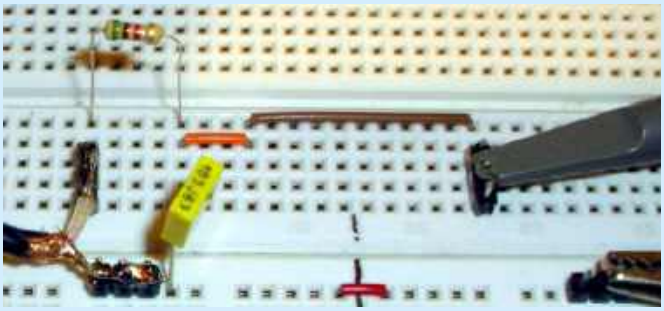
Rysunek 2. Układ pomiarowy z wobulatorem, sondą logarytmiczną oraz oscyloskopem cyfrowym

pozwalają również wyrobić sobie wstępny pogląd na problematykę wrażliwości różnych topologii filtrów na rozrzuty wartości zastosowanych w nich elementów i – tym samym – na zagrożenia jakościowe związane z występowaniem tego zjawiska.

Zastosowany w pomiarach generator-wobulator AVT5980 miał impedancję wyjściową zbliżoną do Rgen=50 Ω. Impedancja wejściowa używanego oscyloskopu wynosiła Rosc=1 MΩ, zaś w przypadku zastosowanej sondy logarytmicznej AVT5991 wynosiła odpowiednio: Rson=1 kΩ @ Att=0 dB, Rson=10 kΩ @ Att=–20 dB oraz Rson=100 kΩ @ Att=–40 dB – w zależności od nastawionego tłumienia wstępnego na wejściu sondy. Podane powyżej wartości impedancji wejściowych zostały oczywiście uwzględnione przy doborze parametrów mierzonych układów – tak aby wpływ na poprawność ich pracy oraz uzyskane rezultaty pomiarów był pomijalnie mały.



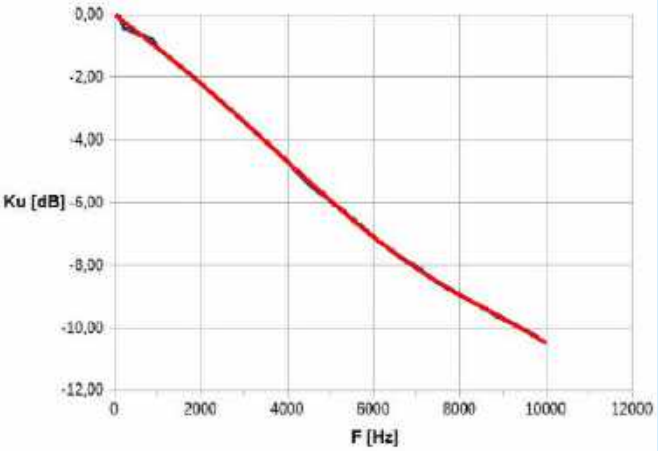
Rysunek 3. Schemat prostego, dolnoprzepustowego filtru RC



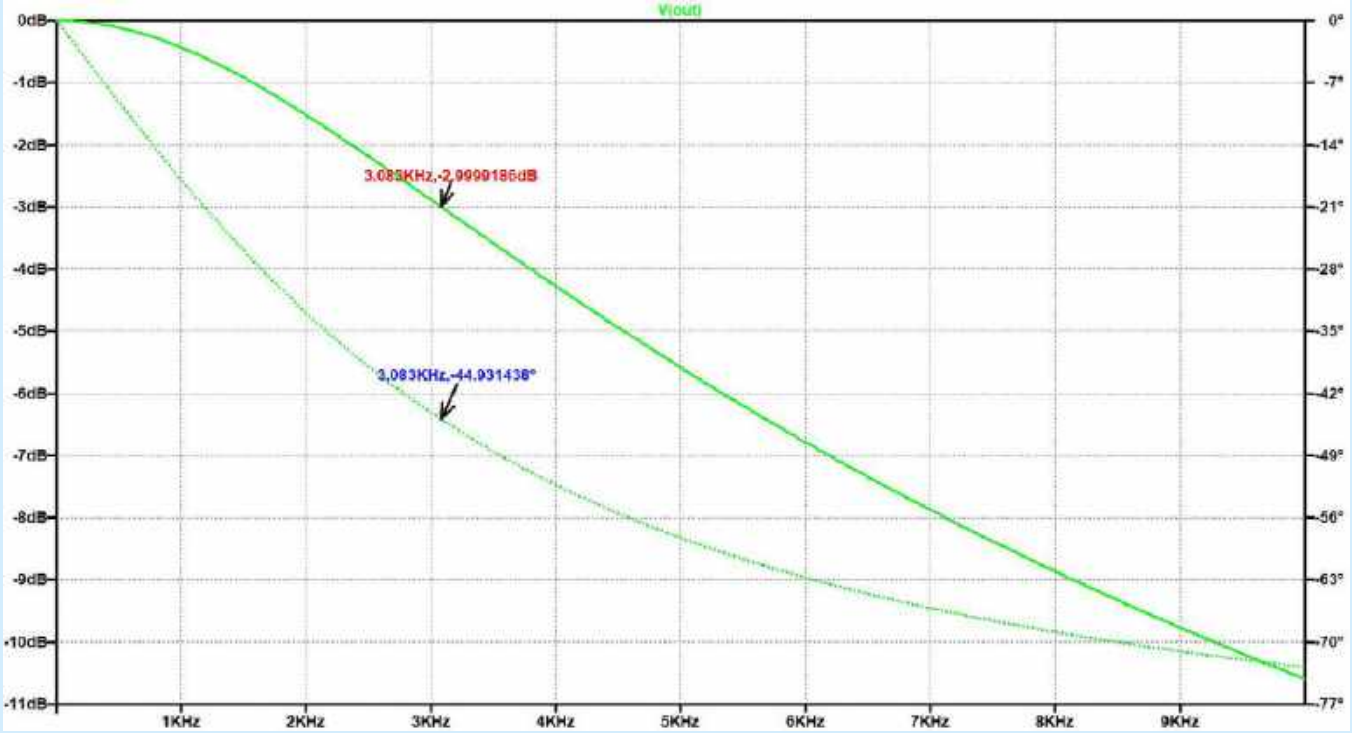
Fotografia 1. Roboczy model prostego, dolnoprzepustowego filtru RC

Filtry dolnoprzepustowe (LPF) m.cz.

Najprostszym przykładem dolnoprzepustowego filtru m.cz. jest, pokazany na schemacie z **rysunku 3**, jednoczłonowy filtr RC



Rysunek 5. Charakterystyka częstotliwościowa prostego, dolnoprzepustowego filtru RC (pomiar)



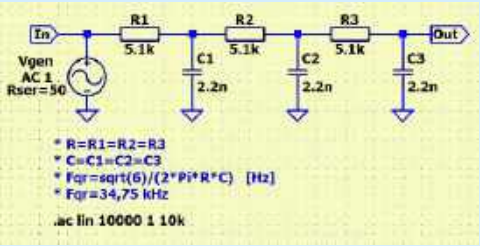
Rysunek 4. Charakterystyka częstotliwościowa prostego, dolnoprzepustowego filtru RC (symulacja)

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie
https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Tabela 1. Dane pomiarowe prostego dolnoprzepustowego filtru RC

F [Hz]	Ku [dB]	F [Hz]	Ku [dB]	F [Hz]	Ku [dB]
10	0,00	1100	–1,21	5000	–5,94
100	0,00	1200	–1,29	5500	–6,49
200	–0,40	1300	–1,37	6000	–7,08
300	–0,47	1400	–1,53	6500	–7,63
400	–0,54	1500	–1,61	7000	–8,04
500	–0,61	2000	–2,19	7500	–8,57
600	–0,68	2500	–2,83	8000	–8,94
700	–0,68	3000	–3,40	8500	–9,33
800	–0,76	3500	–4,03	9000	–9,73
900	–0,83	4000	–4,69	9500	–10,05
1000	–1,06	4500	–5,42	10 000	–10,49



Rysunek 6. Schemat drabinkowego, dolnoprzepustowego filtru RC

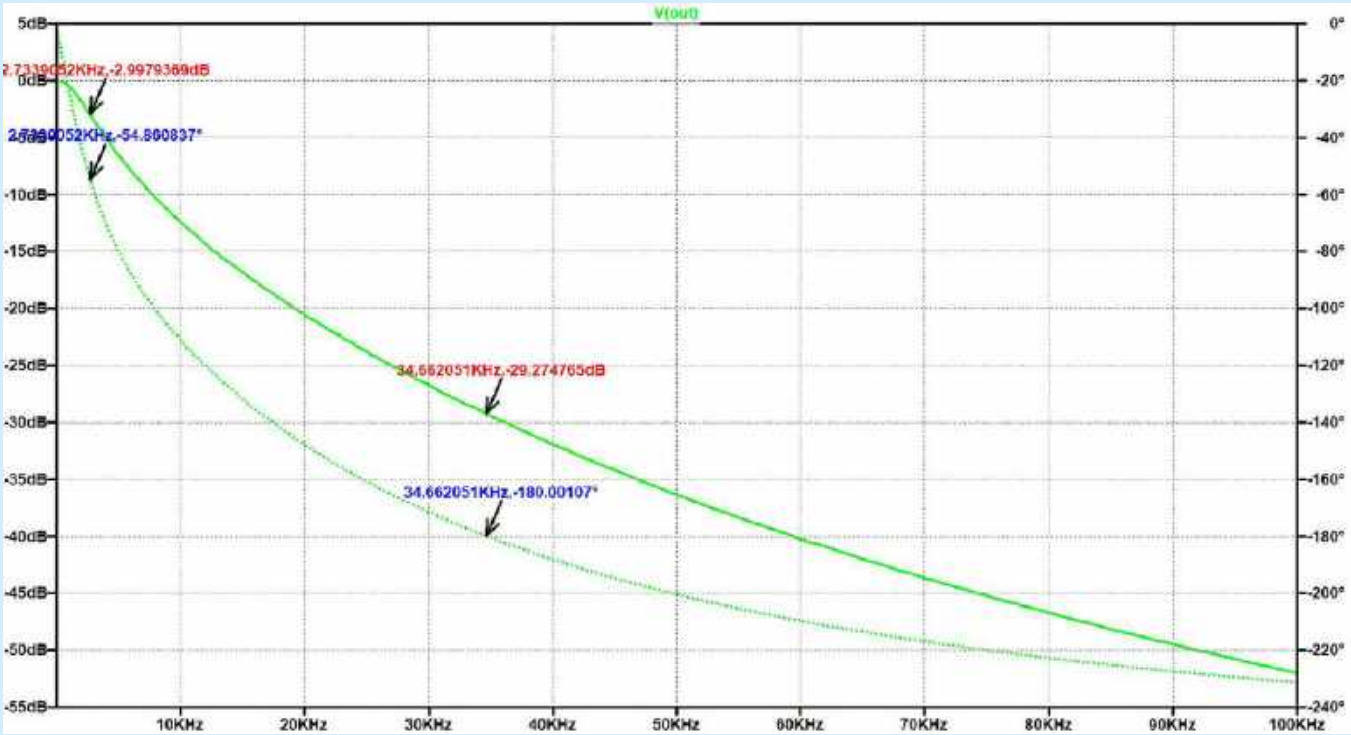
(**fotografia 1** to roboczy model tego układu, wykonany na płytce stykowej). Schemat ten powstał w edytorze graficznym schematów programu LTSpice i stanowił wsad źródłowy do wykonania analizy (symulacji) badanego układu liniowego w dziedzinie częstotliwości. Obliczenia wykonano w zakresie Fgen=1 Hz…10 kHz, a ich rezultaty zaprezentowano na **rysunku 4**. Przy przyjętych wartościach elementów R=5,1 kΩ oraz C=10 nF uzyskano teoretyczną górną częstotliwość graniczną filtru Fg=3,12 kHz przy tłumieniu równym –3 dB. Wartość Fg różni się nieznacznie od wartości uzyskanej w wyniku przeprowadzonej symulacji na skutek wpływu rezystancji wewnętrznej generatora-wobulatora Rgen równej około 50 Ω.

Tabela 2. Dane pomiarowe drabinkowego dolnoprzepustowego filtru RC

F [Hz]	Ku [dB]	F [Hz]	Ku [dB]	F [Hz]	Ku [dB]
10	0,00	1800	–2,15	40 000	–33,41
100	–0,28	2000	–2,46	45 000	–35,65
200	–0,34	2500	–3,26	50 000	–37,78
300	–0,40	3000	–4,08	55 000	–39,75
400	–0,47	3500	–4,93	60 000	–41,67
500	–0,54	4000	–5,74	65 000	–43,35
600	–0,61	4500	–6,56	70 000	–45,05
700	–0,61	5000	–7,31	75 000	–46,45
800	–0,68	10 000	–13,33	80 000	–48,00
900	–0,83	15 000	–17,98	85 000	–49,38
1000	–0,98	20 000	–21,98	90 000	–50,60
1200	–1,29	25 000	–25,29	95 000	–51,31
1400	–1,65	30 000	–28,22	100 000	–53,41
1600	–1,90	35 000	–30,71		

Praktyczne pomiary weryfikacyjne przeprowadzono w układzie wg schematu blokowego z rysunku 1, natomiast ich rezultaty liczbowe ujęto w **tabeli 1** i zobrazowano na **rysunku 5**. Dla ułatwienia analizy danych wejściowych, na które nałożyły się też pewne niewielkie błędy pomiarowe, do wykresu dodano wygładzoną linię trendu (w kolorze czerwonym). Z analizy porównawczej obu charakterystyk wynika, że obie (zasymulowana oraz pomierzona oscyloskopem) są dobrze zgodne ze sobą, a niewielkie rozbieżności mogą wynikać (poza błędami pomiarów) z tolerancji wartości wykorzystanych elementów RC, która we wszystkich przypadkach była znacznie lepsza (mniejsza) od 5%, co zweryfikowano pomiarowo multimetrem o odpowiednio wysokiej dokładności.

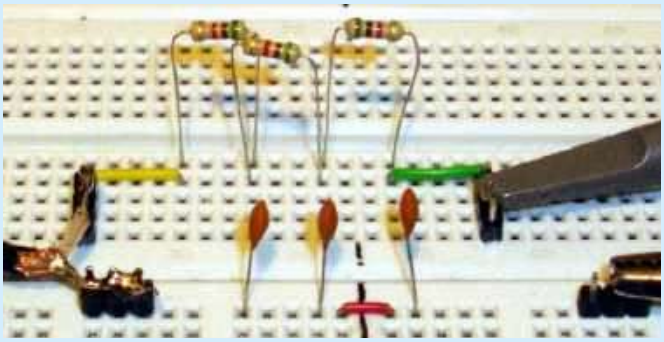
Ciekawszym przykładem nieco tylko skuteczniejszego od powyżej omówionego dolnoprzepustowego filtru m.cz. (z uwagi na drabinkową strukturę – jednak bez wtórników-separatorów pomiędzy poszczególnymi członami RC) jest pokazany na schemacie z **rysunku 6** trójczłonowy łańcuchowy filtr RC. **Fotografia 2** ukazuje roboczy model tego układu, również wykonany na płytce stykowej.



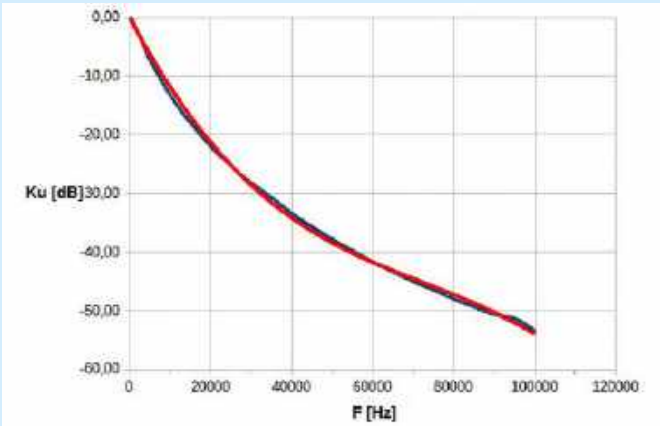
Rysunek 7. Charakterystyka częstotliwościowa drabinkowego, dolnoprzepustowego filtru RC (symulacja)

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie **https://ulubionykiosk.pl/media**

eprasa.pl f9fe7f8d6b

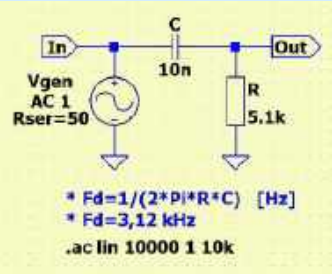


Fotografia 2. Roboczy model drabinkowego, dolnoprzepustowego filtru RC

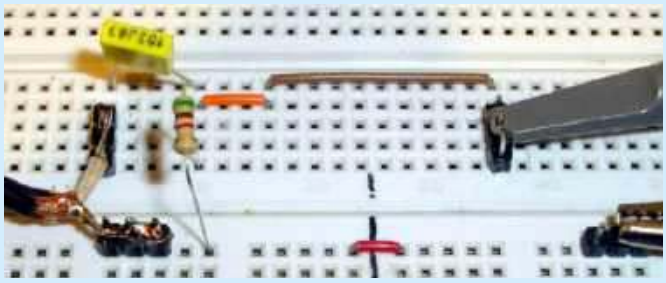


Rysunek 8. Charakterystyka częstotliwościowa drabinkowego, dolnoprzepustowego filtru RC (pomiar)

Schemat tego filtru tym razem także powstał w edytorze graficznym programu LTSpice i posłużył za wsad do wykonania symulacji w dziedzinie częstotliwości badanego układu liniowego. Obliczenia wykonano w zakresie Fgen=1 Hz..100 kHz, a ich rezultaty zaprezentowano na wykresie na **rysunku 7**.



Rysunek 9. Schemat prostego, górnoprzepustowego filtru RC



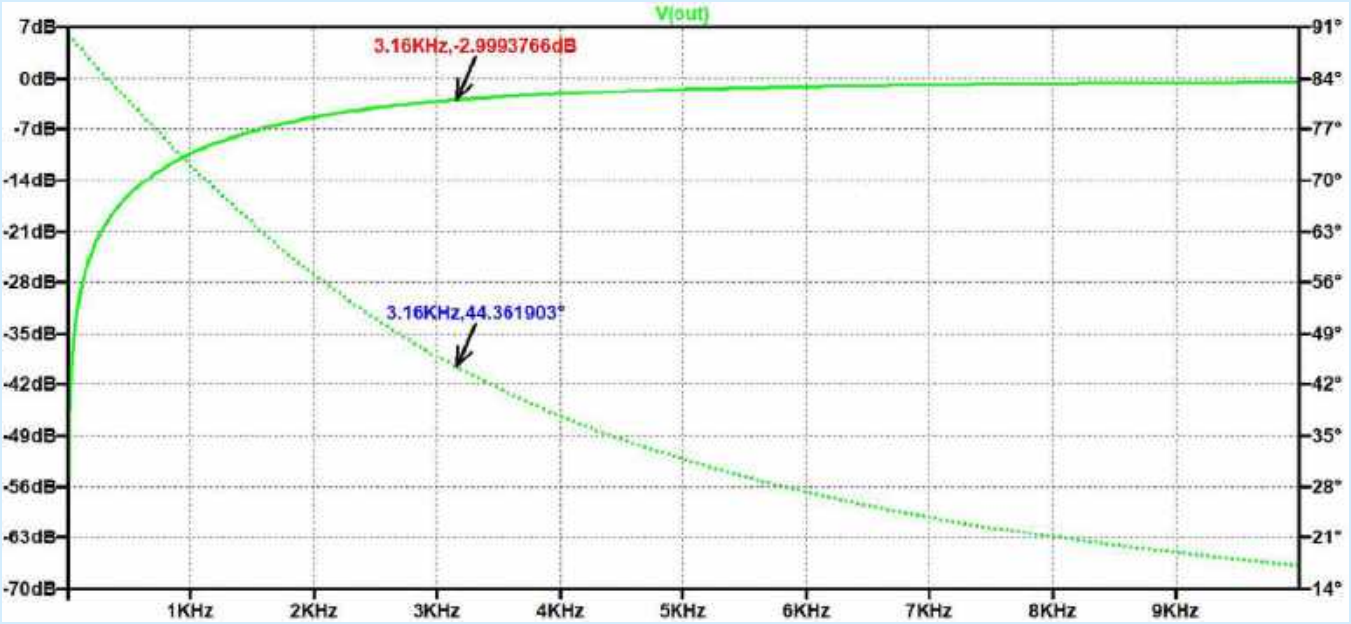
Fotografia 3. Roboczy model prostego, górnoprzepustowego filtru RC

Dla przyjętych wartości elementów R=R1=R2=R3=5,1 kΩ oraz C=C1=C2=C3=2,2 nF uzyskano teoretyczną częstotliwość quasi-rezonansową filtru Fqr=34,75 kHz. Natomiast jego górna częstotliwość graniczna (odczytana z wykresu przy tłumieniu bliskim –3 dB) wyniosła około Fg=2,74 kHz. Warto podkreślić, że o ile własności tłumiennościowe tego filtru nie są istotnie atrakcyjniejsze w porównaniu do osiągów prostego, jednoczłonowego filtru RC, o tyle ciekawy jest fakt, że przy częstotliwości quasi-rezonansowej wprowadza on do przetwarzanego sygnału przesunięcie fazowe równe 180°, co predestynuje go do roli selektywnego przesuwnika fazowego w bardzo prostych generatorach sygnałowych z ujemnym sprzężeniem zwrotnym.

Praktyczne pomiary weryfikacyjne przeprowadzono w układzie wg schematu blokowego z rysunku 1, natomiast ich rezultaty liczbowe zaprezentowano w **tabeli 2** i na **rysunku 8**. W tym przypadku również, celem ułatwienia analizy danych wejściowych obarczonych niewielkimi błędami pomiarowymi, do wykresu dodano wygładzoną linię trendu w kolorze czerwonym. Analiza porównawcza obu charakterystyk (zasymulowanej oraz zmierzonej oscyloskopem) wskazuje na ich zadowalającą zgodność, a nieznaczne różnice mogą wynikać z błędów pomiarów oraz z tolerancji wartości zastosowanych elementów RC, która we wszystkich przypadkach była znacznie lepsza (niższa) od 5%, co także poddano weryfikacji pomiarowej multimetrem o odpowiednio dużej dokładności.

Filtry górnoprzepustowe (HPF) m.cz.

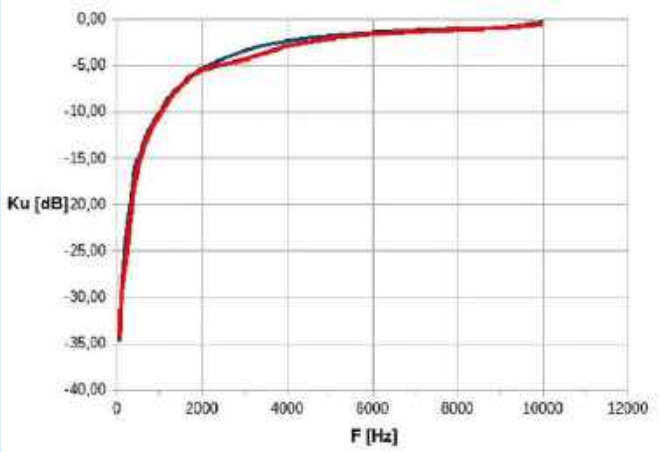
Najprostszym przykładem górnoprzepustowego filtru m.cz. jest pokazany na schemacie z **rysunku 9**, jednoczłonowy filtr RC (**fotografia 3** obrazuje model roboczy tego układu, wykonany na płytce stykowej). Schemat ten również przygotowano



Rysunek 10. Charakterystyka częstotliwościowa prostego, górnoprzepustowego filtru RC (symulacja)

Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie
https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Rysunek 11. Charakterystyka częstotliwościowa prostego, górnoprzepustowego filtru RC (pomiar)

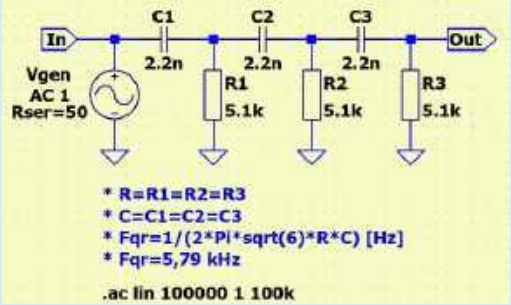
w edytorze graficznym schematów programu LTSpice i wykorzystano jako źródło do przeprowadzenia komputerowej symulacji badanego układu liniowego w dziedzinie częstotliwości. Obliczenia zostały przeprowadzone w zakresie Fgen=1 Hz..10 kHz, a ich wyniki pokazano na wykresie na **rysunku 10**. W przypadku przyjętych wartości elementów R=5,1 kΩ oraz C=10 nF uzyskano teoretyczną dolną częstotliwość graniczną filtru Fd=3,12 kHz przy tłumieniu równym –3 dB. Także w tym przypadku różni się ona nieznacznie od wartości uzyskanej w wyniku przeprowadzonej symulacji z uwagi na wpływ rezystancji wewnętrznej generatora-wobulatora Rgen równej około 50 Ω.

Pomiary weryfikacyjne ponownie przeprowadzono w układzie wg schematu blokowego z rysunku 1, natomiast ich rezultaty liczbowe ujęto w **tabeli 3** i zobrazowano na **rysunku 11**. Celem ułatwienia analizy danych wejściowych, na które nałożyły się również pewne niewielkie błędy pomiarowe, do wykresu dodano wygładzoną linię trendu w kolorze czerwonym. W tym przypadku z analizy porównawczej obu charakterystyk także wynika fakt, że obie krzywe (zasymulowana oraz zmierzona z użyciem oscyloskopu) dobrze ze sobą korelują, a niewielkie rozbieżności mogą wynikać (poza błędami pomiarów) z tolerancji wartości elementów RC, która we wszystkich przypadkach była znacznie lepsza (mniejsza) od 5%, co w tym przypadku również zweryfikowano dokładnym multimetrem.

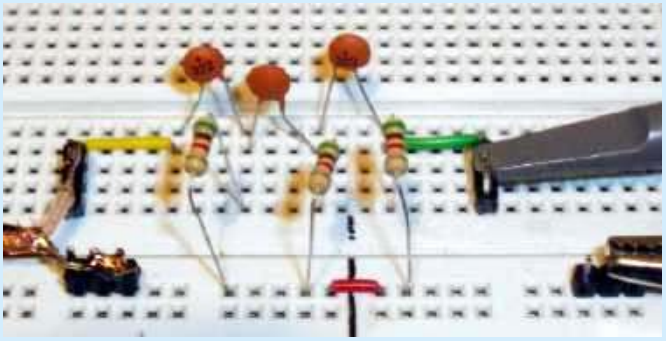
Bardziej interesujący przykład (nieco tylko skuteczniejszego od powyżej omówionego) górnoprzepustowego filtru m.cz. jest zaprezentowany na schemacie z **rysunku 12**. To znów trójczłonowy, łańcuchowy filtr o strukturze drabinkowej, pozbawionej buforów-wtórników pomiędzy poszczególnymi ogniwami RC. **Fotografia 4** pokazuje roboczy model tego układu, który dla wygody i szybkości implementacji także wykonano na płytce stykowej. Schemat omawianego filtru ponownie powstał w edytorze graficznym programu LTSpice i posłużył za materiał wejściowy do przeprowadzenia komputerowej analizy badanego układu liniowego w dziedzinie częstotliwości. Obliczenia zostały przeprowadzone w zakresie Fgen=1 Hz..100 kHz, a ich rezultaty pokazano na **rysunku 13**. W przypadku przyjętych wartości elementów R=R1=R2=R3=5,1 kΩ oraz C=C1=C2=C3=2,2 nF uzyskano teoretyczną częstotliwość quasi-rezonansową filtru Fqr=5,79 kHz, natomiast odczytana z wykresu jego dolna częstotliwość graniczna (przy tłumieniu bliskim –3 dB) wyniosła około Fd=2,74 kHz. W przypadku tego filtru drabinkowego również warto podkreślić fakt, że o ile jego walory tłumiennościowe nie są bardzo istotnie atrakcyjniejsze od własności prostego jednoczłonowego filtru RC, o tyle przy częstotliwości quasi-rezonansowej wprowadza on do przetwarzanego sygnału przesunięcie fazowe równe 180°, co pozwala na zastosowanie w prostych generatorach analogowych. Dodatkowo, z uwagi na bardziej stromą charakterystykę fazową w pobliżu częstotliwości quasi-rezonansowej (względem omawianego wcześniej odpowiednika dolnoprzepustowego), wykonany z zastosowaniem takiego filtru generator ma szansę oferować większą stabilność wytwarzanego sygnału.

Tabela 3. Dane pomiarowe prostego górnoprzepustowego filtru RC

F [Hz]	Ku [dB]	F [Hz]	Ku [dB]	F [Hz]	Ku [dB]
50	–34,77	700	–12,44	1800	–5,87
60	–33,73	800	–11,44	1900	–5,61
70	–32,09	900	–10,71	2000	–5,29
80	–31,19	1000	–10,05	3000	–3,40
90	–30,15	1100	–9,23	4000	–2,37
100	–29,23	1200	–8,57	5000	–1,77
200	–23,71	1300	–7,96	6000	–1,45
300	–20,33	1400	–7,55	7000	–1,21
400	–16,28	1500	–7,08	8000	–1,06
500	–15,06	1600	–6,63	9000	–0,91
600	–13,49	1700	–6,12	10 000	–0,29



Rysunek 12. Schemat drabinkowego, górnoprzepustowego filtru RC



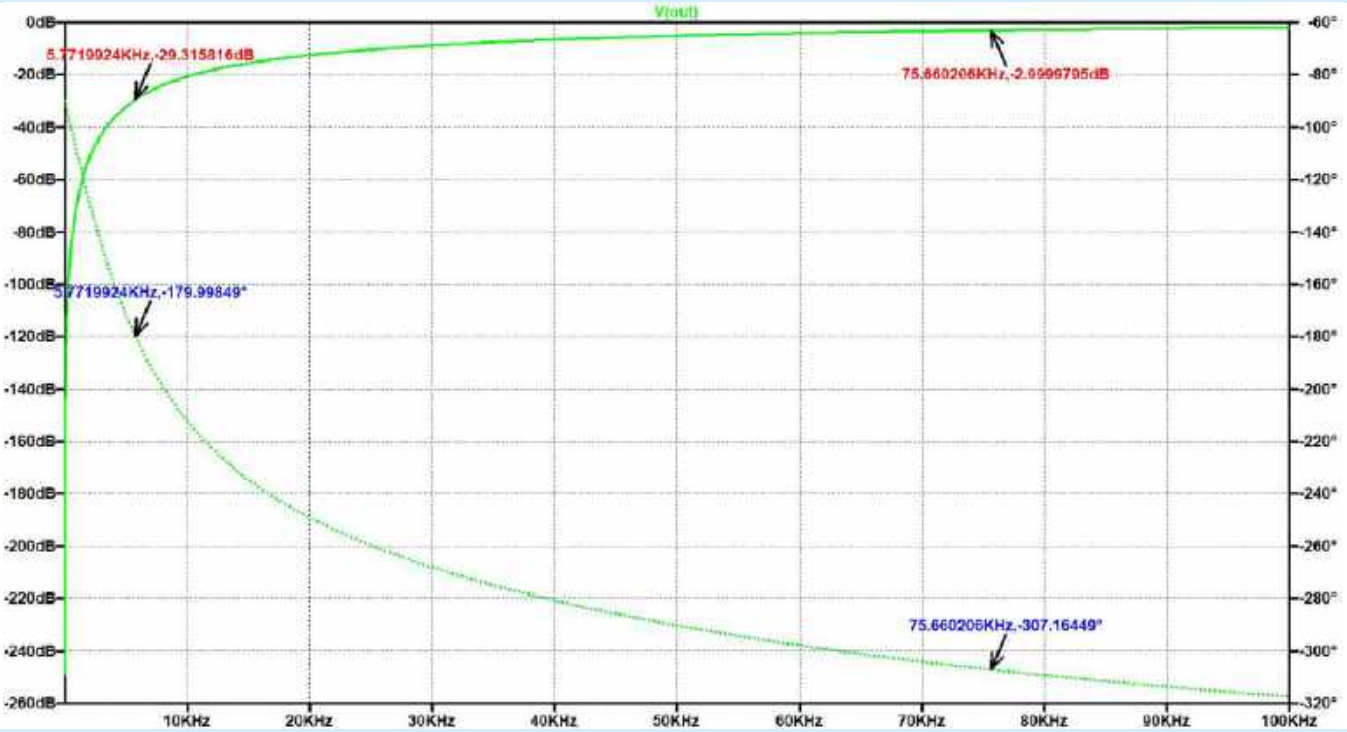
Fotografia 4. Roboczy model drabinkowego, górnoprzepustowego filtru RC

Tabela 4. Dane pomiarowe drabinkowego górnoprzepustowego filtru RC

F [Hz]	Ku [dB]	F [Hz]	Ku [dB]	F [Hz]	Ku [dB]
1000	–54,24	15 000	–14,77	65 000	–4,47
2000	–48,22	20 000	–12,02	70 000	–4,13
3000	–40,26	25 000	–10,21	75 000	–3,76
4000	–35,15	30 000	–8,66	80 000	–3,71
5000	–31,31	35 000	–7,79	85 000	–3,56
6000	–28,22	40 000	–6,78	90 000	–3,45
7000	–25,61	45 000	–5,97	95 000	–3,21
8000	–22,87	50 000	–5,48	100 000	–3,16
9000	–20,98	55 000	–5,11		
10 000	–19,67	60 000	–4,69		

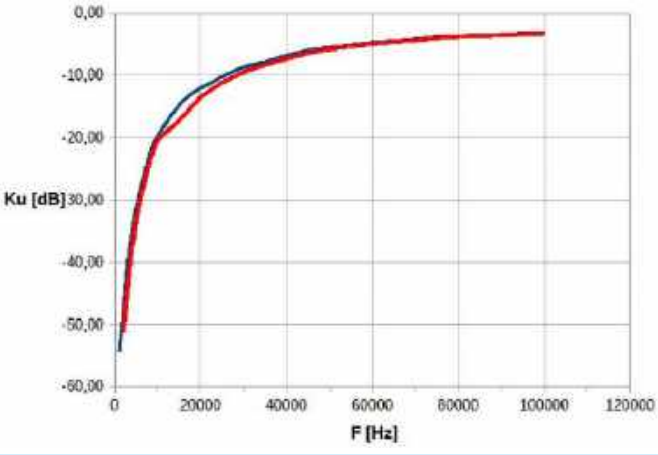
Poprzednie części kursu i dodatkowe materiały dostępne są na stronie
https://ulubionykiosk.pl/media

eprasa.pl f9fe7f8d6b



Rysunek 13. Charakterystyka częstotliwościowa drabinkowego, górnoprzepustowego filtru RC (symulacja)

Praktyczne pomiary weryfikacyjne przeprowadzono ponownie w układzie wg schematu blokowego z rysunku 1, a ich rezultaty liczbowe ujęto w **tabeli 4** i przedstawiono graficznie (wraz z czerwoną linią trendu) na **rysunku 14**. W tym przypadku analiza porównawcza obu charakterystyk (tej zasymulowanej oraz tej zmierzonej oscyloskopem) także wskazuje na ich satysfakcjonującą zgodność przy nieznacznych różnicach, które zapewne wynikają zarówno z błędów pomiarów, jak i z tolerancji wartości elementów RC. Ta jednak również w przypadku wszystkich użytych podzespołów była znacznie poniżej 5%.



Rysunek 14. Charakterystyka częstotliwościowa drabinkowego, górnoprzepustowego filtru RC (pomiar)

Podsumowanie i wnioski

W artykule zaprezentowano analizy symulacyjne i pomiarowe prostych filtrów biernych RC, stosowanych przede wszystkim dla małych częstotliwości (głównie akustycznych). Zakres prezentowanego materiału objął wyłącznie przykładowe filtry dolno- i górnoprzepustowe i należy traktować go jako tzw. miękkie wprowadzenie do dziedziny bardziej zaawansowanych filtrów (także aktywnych, pasmowych, w.cz. oraz cyfrowych). Jest ona bowiem pierwszą częścią cyklu przekrojowych publikacji o znacznie szerszej tematyce. Na koniec artykułu warto zwrócić uwagę na fakt użycia do implementacji badanych obwodów tzw. płytek stykowych. Otóż, o ile jest to rozwiązanie znacznie ułatwiające szybką implementację względnie niezłożonych układów, o tyle należy mieć na uwadze fakt, że cechuje je znaczna niepewność trwałości i stabilności wykonywanych połączeń. Dodatkowo, płytki stykowe mogą wprowadzać – tak istotne w niektórych zastosowaniach (zwłaszcza w.cz., ale też i w precyzyjnych, selektywnych układach w.cz., szybkich układach cyfrowych czy obwodach impulsowych i/lub wysokoprądowych) – parametry pasożytnicze: pojemności, indukcyjności i rezystancje (bezpośrednie oraz wzajemne). W tym kontekście ich „zbyt odważne" używanie, zwłaszcza przez mniej doświadczonych miłośników elektroniki, może być przyczyną licznych rozczarowań i porażek konstruktorskich. Z podanych powodów autor tego artykułu zasadniczo nie poleca stosowania płytek stykowych w prototypach bardziej złożonych i/lub wymagających konstrukcji i – tym samym – zachęca początkujących Czytelników do stosowania w ich miejsce np. płytek uniwersalnych i połączeń lutowanych.

Adam Sobczyk, EP

REKLAMA

koktajl niusów

Pikosekundowy laser PIKO-SEK firmy Laser Hi-Tech do celów zabiegowych

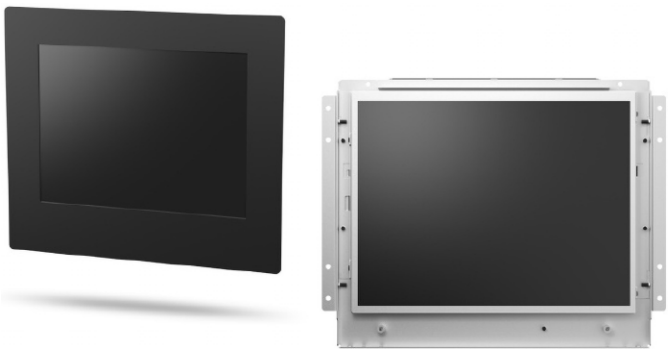
Urządzenie PIKO-SEK wytwarza impulsy intensywnego światła laserowego o czasie mierzonym w pikosekundach. Jego stosowanie nie powoduje bolesnego przegrzania skóry, dając jej szansę na błyskawiczną regenerację – bez przykrych powikłań. Sprzęt znajduje zastosowanie w eliminacji m.in. pigmentacji, tatuażu lub makijażu permanentnego, a także w innych zabiegach, które można bezpiecznie przeprowadzać na powierzchni ciała. Oddziałujący na fibroblasty laser pikosekundowy umożliwia wykonanie m.in. nieablacyjnego resurfacingu skóry za pomocą filtru 755 nm, by móc skutecznie zniwelować efekty starzenia skóry. Głowica zabiegowa jest wyposażona w czerwoną diodę, która pozwala na naprowadzenie wiązki lasera na określone wcześniej punkty, podczas gdy obsługa lasera PIKO-SEK odbywa się z poziomu kolorowego ekranu o przekątnej 10". Do realizacji wspomnianego filtra 755 nm zastosowano unikatową technologię skupionego plastra miodu. Wbudowana głowica emituje światło o energii rzędu od 10 do 2000 mJ/cm^2. Do dyspozycji operatora są 3 dodatkowe filtry: 532, 1064 i 1320 nm (oprócz 755 nm). W zestawie znajdują się specjalne okulary ochronne zarówno dla pacjentów, jak i operatora urządzenia PIKO-SEK.

https://laserhitech.pl/pikosekundowy/

Centrum Efektywnej Prefabrykacji Szaf Sterowniczych firmy Phoenix Contact już działa

Znajdujące się we wrocławskiej siedzibie firmy Phoenix Contact i otwarte we wrześniu 2024 roku Centrum Efektywnej Prefabrykacji Szaf Sterowniczych to z pewnością miejsce, z którym warto się zapoznać – bez względu na poziom wiedzy technicznej. Zwiedzanie tego centrum z ekspertem trwa ok. 4 godzin i jest bezpłatne, choć wymaga dokonania rezerwacji na stronie internetowej. Oferowane przez Phoenix Contact rozwiązania do budowy szaf sterowniczych minimalizują koszty i czas prefabrykacji tego typu urządzeń. W otwartym niedawno Centrum można sprawdzić, w jaki sposób innowacyjne technologie – razem ze zoptymalizowanymi procesami produkcyjnymi – mogą znacząco podwyższyć jakość szaf sterowniczych. Mile widziani są w szczególności kierownicy oraz liderzy, a także dyrektorzy, brygadziści, specjaliści LEAN i inżynierowie produkcji – goście mogą zapoznać się z takimi procesami, jak: projektowanie i integracja danych w programach CAE, docinanie szyn i koryt kablowych, montaż elementów na szynie DIN, wydruk oznaczników, prefabrykacja przewodów czy wreszcie finalny montaż w szafie sterowniczej. Centrum Efektywnej Prefabrykacji Szaf Sterowniczych firmy Phoenix Contact znajduje się we Wrocławiu przy ul. Bierutowskiej 57-59, w budynku 3A.

https://tiny.pl/7mvh7r19



Monitory DuraVision FDX1004T firmy EIZO dostępne w nowych wersjach montażowych

W ofercie firmy EIZO pojawiły się dwa nowe warianty montażowe monitora do zastosowań przemysłowych DuraVision FDX1004T. Zaprezentowany po raz pierwszy w lutym 2024 roku monitor ma wbudowany panel dotykowy i jest dostępny w konfiguracjach ze stopką lub otworami do instalacji na uchwytach z mocowaniem VESA. Przewidziane do użycia np. w szafach rack nowe wersje modelu DuraVision FDX1004T pozwalają znacząco rozszerzyć wachlarz zastosowań na kolejne systemy i urządzenia. Dostępny w omawianym monitorze panel dotykowy ma przekątną 10,4" i umożliwia prezentację obrazu w rozdzielczości 1024×768 px. Przygotowane z myślą o wymagających warunkach rozwiązanie jest trwałe i odporne na wahania temperatury w zakresie od 0 do 50°C. Jego obudowa nie ma żadnych otworów wentylacyjnych, dzięki czemu urządzenie jest odporne na wnikanie kurzu i wilgoci. W konstrukcji zastosowano ponadto powłokę ochronną o stopniu ochrony IP65 (w przypadku wersji przeznaczonej do montażu panelowego). Nowe modele wymagają napięcia zasilania w zakresie od 12 do 24 V, co zapewnia dużą elastyczność integracji z nowymi lub istniejącymi systemami.

https://tiny.pl/c9-chjys

Jakub Tyburski
jakub.tyburski@elportal.pl

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Hity następnego numeru • „Elektronika Praktyczna” 1/2025

NOWY DZIAŁ: Audio bez tajemnic

Któż z nas nie potrzebuje, przynajmniej od czasu do czasu, posłuchać dobrej muzyki? Dla niektórych muzyka stanowi największą radość w życiu i nadaje mu sens. Nie dziwi więc ogromna popularność urządzeń audio – zarówno tych komercyjnych, zdobywanych za cenę dobrego samochodu osobowego, jak i tych budowanych w domowym zaciszu z komponentów dostępnych pod ręką. Wielu konstruktorów zajmuje się techniką audio zawodowo, czerpiąc z projektowania kolejnych wzmacniaczy, procesorów dźwięku czy też zespołów głośnikowych niemałe pieniądze.

Styczniowe wydanie otwiera nowy rozdział w przeszło 30-letniej historii „Elektroniki Praktycznej” – w tym bowiem numerze uruchamiamy całkowicie nową rubrykę stałą poświęconą w stu procentach zagadnieniom związanym z projektowaniem i pomiarami sprzętu audio. Już za miesiąc oddamy w ręce naszych Czytelników naprawdę solidną dawkę wiedzy i inspiracji – czy to w formie cennych materiałów edukacyjnych, czy też w postaci projektów opracowanych przez naszych czołowych konstruktorów. A to dopiero początek!

Elektronika w Praktyce: Wyświetlacze dotykowe i sensory gestów

Współczesna technologia cyfrowa coraz bardziej przypomina rozwiązania, które jeszcze kilkadziesiąt lat temu były domeną twórców filmów i literatury science fiction. Sterowanie dotykiem bądź gestami – i to zarówno prostymi machnięciami ręki, jak rozbudowanymi sekwencjami ruchów obu rąk – stało się faktem i szturmem wdarło się do naszego codziennego życia. W ślad za rosnącym trendem poprawy ergonomii obsługi urządzeń i systemów elektronicznych idzie także rozwój czujników, modułów i oprogramowania wspierającego detekcję i rozpoznawanie gestów. Niemały udział ma w tym przypadku – a jakże! – sztuczna inteligencja, o której chyba każdy z nas słyszy (w samych tylko środkach masowego przekazu) przynajmniej kilka razy dziennie. W artykule przyglądamy się współczesnym rozwiązaniom przeznaczonym do sterowania dotykiem i gestami w różnych gałęziach techniki – począwszy od interaktywnych zabawek, a kończąc na systemach sterowania sprzętem medycznym w nowoczesnych salach operacyjnych.

Retro wzmacniacz mocy z tranzystorami germanowymi

Układy „retro”, wykonane z zastosowaniem elementów z początków ery elektroniki, cieszą się niesłabnącą popularnością. Przykładami mogą być kopie lub własne opracowania wzmacniaczy bazujących na lampach elektronowych. Wiele osób obawia się jednak pracy z wysokimi napięciami (o wartości rzędu setek woltów) lub problemów związanych z samodzielnym wykonaniem bądź wysokim kosztem zakupu niezbędnych lamp i transformatorów głośnikowych czy zasilających. Opisany wzmacniacz, opierający się na – jeszcze względnie łatwo dostępnych na aukcjach internetowych – tranzystorach germanowych AD161/162, może stać się pierwszym krokiem w technice „retro”, bez nadwyrężania budżetu lub obawy o bezpieczeństwo.

Mikser dyskotekowy trzech źródeł sygnału

Lewa strona, jak się bawicie?! Prawa strona, jak się bawicie?! Wszyscy ręce w górę! Aby poprowadzić imprezę, przyda się nie tylko charyzma, lecz również odpowiedni sprzęt. Nie zawsze drogi i oferujący mnóstwo funkcji – czasem amatorskie rozwiązania okazują się całkowicie wystarczające. W artykule opisujemy prosty mikser trzech źródeł sygnału audio, który może mieć wiele zastosowań praktycznych – nie tylko w rozrywce. Amatorskie studio nagraniowe czy odtwarzanie muzyki i komunikatów głosowych przez mikrofon w lokalu handlowym – to tylko przykładowe zastosowania prezentowanego urządzenia. Jego obsługa jest tak prosta, że może służyć nawet dzieciom w rozwijaniu ich zainteresowań muzycznych!

Wykaz firm ogłaszających się w tym numerze „Elektroniki Praktycznej”

AET 32
AKSOTRONIK 15
BL ELEKTRONIK 50, 51
BORNICO 57
COMPUTER CONTROLS 7
CONRAD 5, 54
ELMAX 59
HAMMOND 9
NEWLAND 79
PTAK WARSAW EXPO 12, 96
SEMICON 40, 41
ZETTLER 25

Miesięcznik **„Elektronika Praktyczna”** (12 numerów w roku) jest wydawany przez AVT Korporacja Sp. z o.o. we współpracy z wieloma redakcjami zagranicznymi.

Wydawnictwo:
AVT Korporacja Sp. z o.o.
03-197 Warszawa, ul. Leszczynowa 11
tel. 22 257 84 99, e-mail: avt@avt.pl

Wydawca:
Wiesław Marciniak

Adres redakcji:
03-197 Warszawa, ul. Leszczynowa 11
e-mail: redakcja@ep.com.pl, www.ep.com.pl

Redaktor Naczelny:
Przemysław Musz

Redaktor Programowy, Przewodniczący Rady Programowej:
Piotr Zbysiński

Menedżer Magazynu:
Katarzyna Gugała, tel. 22 257 84 64

Szef Pracowni Konstrukcyjnej:
Jakub Sobański

Zespół marketingu i reklamy:
Katarzyna Gugała, Bożena Krzykawska, Grzegorz Krzykawski, Grzegorz Lalak

Stali współpracownicy:
Lucjan Bryndza, Nikodem Czechowski, Jarosław Doliński, Andrzej Gawryluk, Krzysztof Górski, Tomasz Jabłoński, Paweł Kowalczyk, Henryk Kowalski, Rafał Kozik, Michał Kurzela, Jakub Nowicki, Szymon Panecki, Adam Sobczyk, Damian Sosnowski, Ryszard Szymaniak, Adam Tatuś, Jakub Tyburski, Robert Wołgajew

Uwaga!
Kontakt z wymienionymi osobami jest możliwy via e-mail, według schematu: imię.nazwisko@ep.com.pl

DTP, okładka, redakcja strony internetowej www.ep.com.pl:
MAD Sp. z o.o.

Prenumerata w Wydawnictwie AVT
www.ulubionykiosk.pl lub tel. 22 257 84 22 (godz. 10.00–14.00)
e-mail: prenumerata@avt.pl

Prenumerata w RUCH S.A.
www.prenumerata.ruch.com.pl
lub tel. 801 800 803, 22 717 59 59
e-mail: prenumerata@ruch.com.pl

Copyright AVTKorporacja Sp. z o.o.
03-197 Warszawa, ul. Leszczynowa 11

Projekty publikowane w „Elektronice Praktycznej”. mogą być wykorzystywane wyłącznie do własnych potrzeb. Korzystanie z tych projektów do innych celów, zwłaszcza do działalności zarobkowej, wymaga zgody redakcji „Elektroniki Praktycznej”. Przedruk oraz umieszczanie na stronach internetowych całości lub fragmentów publikacji zamieszczanych w „Elektronice Praktycznej”. jest dozwolone wyłącznie po uzyskaniu zgody redakcji. Redakcja nie odpowiada za treść reklam i ogłoszeń zamieszczanych w „Elektronice Praktycznej”.

eprasa.pl f9fe7f8d6b

Organizator:

PTAK WARSAW EXPO ufi Member

Wire Tech Poland

Premierowa Edycja

JEDYNE W POLSCE TARGI BRANŻY KABLOWEJ

14-16 stycznia 2025

WIRE TECHNOLOGY SUMMIT

www.wiretechpoland.com

ZAREJESTRUJ SIĘ

Aleja Katowicka 62, 05-830 Nadarzyn | info@warsawexpo.eu | www.warsawexpo.eu | / warsawexpo

Organizator:

PTAK WARSAW EXPO ufi Member

TUBE TECHNIC Poland

Premierowa Edycja

BRANŻOWE TARGI RUR I TECHNOLOGII PRZESYŁOWYCH

14-16 stycznia 2025

Tube Technology Congress

www.tubetechnicpoland.com

ZAREJESTRUJ SIĘ

Aleja Katowicka 62, 05-830 Nadarzyn | info@warsawexpo.eu | www.warsawexpo.eu | / warsawexpo

eprasa.pl f9fe7f8d6b