Wydanie elektroniczne dostępne na www.ulubionykiosk.pl

ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA

EP.com.pl

● Międzynarodowy magazyn elektroników konstruktorów ● sierpień ● 8/2025 ●

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

PRZETWORNIKI AKUSTYCZNE OKIEM PRAKTYKA

TEMAT NUMERU

inspirujące, użyteczne projekty

• Sygnalizator świetlny • Minimoduły cyfrowego audio – przetworniki A/D i D/A • Cyfrowy termometr/termostat I²C zgodny z Grove • Translator poziomów I²C Grove

podzespoły, sprzęt, aplikacje

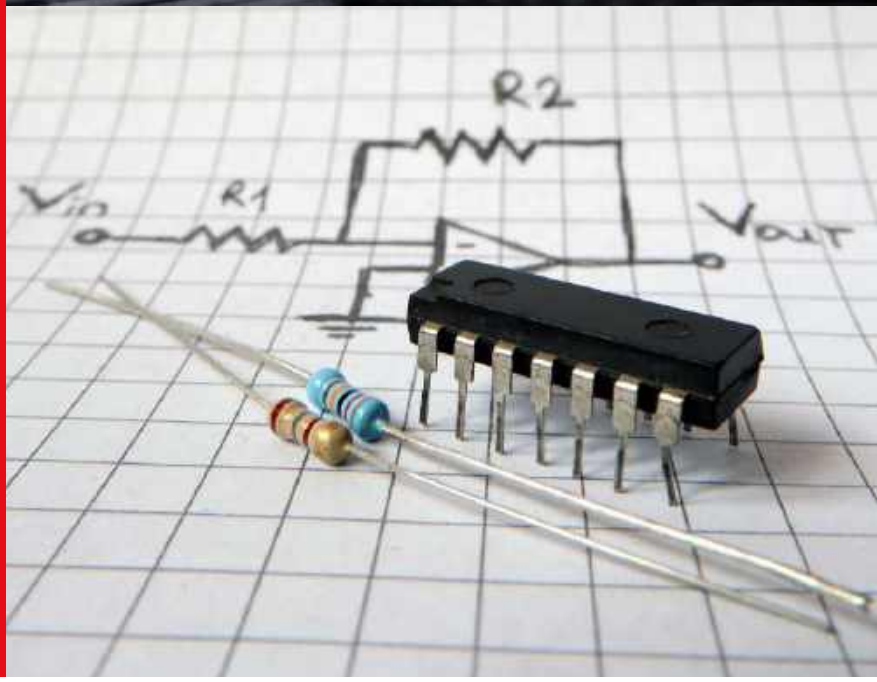
• Mikrofony MEMS w praktyce konstruktora • Liniowe regulatory napięcia w wersji... cyfrowej • Recenzja mostka RLC typu UT622E – jakość wykonania i testy użyteczności • Układy analogowe w erze cyfrowej

tutoriale

• Internet Rzeczy w pomiarach środowiskowych. Obsługa czujnika BME688 w języku C++ z użyciem rdzenia RISC-V procesora RP2350 • Masa nieco inaczej • Oszczędzanie energii w teorii i w praktyce • Stopnie wejściowe wzmacniaczy operacyjnych • Sztuczna masa w układach audio • Konwersja cyfrowo-analogowa w technice audio

kursy

• Programowanie w środowisku MicroPython. Systemy plików



ISSN 1230-3526 Indeks 357677
9 771230 352252 08
18,90 zł (w tym 8% VAT) • PRICE 8 EUR

UKŁADY ANALOGOWE W ERZE CYFROWEJ

eprasa.pl ef7662c802

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

Non scholae, sed vitae discimus

Czy sierpień jest dobrym czasem na rozmowę o edukacji? Gdyby zadać to pytanie młodszej części naszego społeczeństwa, odpowiedź miażdżącej większości respondentów byłaby zapewne przecząca. Dla wielu (jeśli nie znów większości) zapewne żaden moment w całym roku nie byłby dość odpowiedni, gdyż – jak mawiała kobieta pracująca w kultowym „Czterdziestolatku" – „Nieprzymuszony nikt przymusu nie chce, jak powiedział Bertolt Brecht". Zostawmy jednak na chwilę najmłodszych – niech nacieszą się jeszcze ostatnim miesiącem wakacji – i przyjrzyjmy się znacznie poważniejszemu problemowi.

W ramach międzynarodowego badania kompetencji dorosłych PIAAC 2023 [1], które objęło 31 krajów OECD (w tym także Polskę), przeprowadzono szeroko zakrojone testy umiejętności społeczeństw w trzech kluczowych obszarach: rozumienia tekstu, podstawowych zdolności matematycznych i adaptacyjnego rozwiązywania problemów. Testy objęły zarówno kraje europejskie, jak i – między innymi – Japonię, Stany Zjednoczone, Koreę Południową czy Chile – można więc z powodzeniem potraktować uzyskane dane jako reprezentatywne w skali globalnej. Co pokazały wyniki tego międzynarodowego przedsięwzięcia?

Okazało się, że Polska plasuje się w punktacji nie tylko znacznie niżej niż średnia OECD, ale wręcz… w ostatniej trójce (!) spośród wszystkich 31 przebadanych krajów. 39% respondentów miało poważne trudności z rozumieniem tekstu, a 38% – z rozwiązywaniem banalnie prostych zadań matematycznych. To jednak nie wszystko – jeszcze gorzej wypada nasze społeczeństwo pod względem rozwiązywania problemów, gdyż aż 48% badanych osiągnęło najniższy, 1. poziom umiejętności, z czego 8% nie przekroczyło nawet tego progu.

Przytoczone dane są w istocie przerażające. Jeżeli dodamy do nich fakt, że coraz większa liczba badań z obszaru neurologii pokazuje istotne obniżenie aktywności kory mózgowej u osób, które intensywnie korzystają z powszechnie dostępnych narzędzi sztucznej inteligencji, otrzymamy przepis na intelektualny krach w skali ogólnopolskiej. Wspaniałe możliwości, oferowane przez zaawansowane modele LLM – chociażby słynny ChatGPT – zapewne tylko przez nielicznych są wykorzystywane do szczytnych i ambitnych celów. Można śmiało założyć, że zdecydowana większość promptów przesyłanych na serwery OpenAI dotyczy generowania treści rozrywkowych bądź wykonywania prostych zadań życia codziennego, które z powodzeniem można byłoby rozwiązać samodzielnie bądź przy użyciu narzędzi informatycznych starszej generacji (chociażby zwykłej wyszukiwarki internetowej). Taki „outsourcing myślenia" fatalnie wpływa na ludzki mózg, odzierając go z tych zdolności, które nasz gatunek rozwinął w najwyższym stopniu na wszystkich poziomach ewolucji – z umiejętności logicznego myślenia, wnioskowania, rozwiązywania problemów i kreatywności. A bez tego przecież nie sposób poprawnie funkcjonować w naszym zabieganym świecie.

Skąd mój pesymistyczny ton? Wynika on bezpośrednio z tego, co obserwuję od dłuższego czasu w polskim Internecie, a co zintensyfikowało się zwłaszcza w lipcu br. Przykład? Proszę bardzo. Powrót polskiego astronauty z Międzynarodowej Stacji Kosmicznej spotkał się z istnym zalewem komentarzy negujących nie tylko celowość i sens misji IGNIS, ale – co gorsza – jej prawdziwość jako taką (!). Choć wielu z nas może wydawać się to ponurym żartem, spora część Polaków naprawdę nie wierzy w loty człowieka w kosmos, przekonując siebie nawzajem, że całość została wyreżyserowana w Hollywood, rzecz jasna w bliżej nieokreślonym celu. Co bardziej kreatywni komentatorzy wiążą nawet „wiarę" w misje kosmiczne z… ilością przyjętych dawek szczepionki na wirusa, który spowodował niedawną pandemię (sic!). Pomijam już samą absurdalność traktowania lotów na orbitę nie jako faktu (i to już całkiem leciwego, gdyż historia obecności człowieka w kosmosie liczy sobie kilkadziesiąt lat), ale wręcz jako kwestii wiary lub niewiary. To zresztą tylko jeden z dziesiątków, jeżeli nie setek przykładów skrajnej ignorancji i braku choćby elementarnej wiedzy o otaczającym nas świecie. A chyba najgorsze jest to, że wybujała fantazja osób próbujących zakrzyczeć rzeczywistość w myśl bliżej nieokreślonych celów przybiera postać efektu kuli śnieżnej, w której jedni „znawcy tematu" przekonują do swoich wydumanych racji kolejnych, równie odpornych na wiedzę naukową. I jakoś nikomu z nich nie przyjdzie do głowy, by zweryfikować swoje poglądy z jakimkolwiek źródłem informacji bardziej wiarygodnym, niż komentarze owych „niewierzących" pod artykułami prasowymi.

Opisany obraz sytuacji zdaje się wskazywać nie tylko na (fatalny w skutkach) trend masowego spadku zdolności do logicznego myślenia, idącego w parze z rosnącą nieumiejętnością krytycznego podejścia do bzdur, powielanych na portalach społecznościowych. Znacznie bardziej przerażający jest fakt, że takie informacje radośnie rozsiewają osoby w wieku średnim oraz seniorzy – czyli te grupy wiekowe, wśród których powinny znajdować się autorytety, osoby będące punktem odniesienia dla młodych pokoleń, dopiero budujących swój obraz świata.

Czy możemy coś z tym zrobić? Z pewnością nie zatrzymamy tej machiny powszechnego ogłupienia, ale możemy przyczynić się do choć częściowego jej spowolnienia. Sposób jest tylko jeden – edukacja, edukacja i jeszcze raz edukacja. Edukować możemy we własnym zakresie, chociażby przez zainteresowanie najmłodszych – czy to własnych dzieci, czy też pociech naszych znajomych – nowymi technologiami, przyrodą czy nauką w ogóle, niezależnie od branży. Na szczęście w Polsce istnieją jeszcze liczne festiwale nauki, organizowane czy to przez poszczególne uczelnie, czy to przez wyspecjalizowane organizacje, zaś największe imprezy – m.in. we Wrocławiu, Warszawie czy Katowicach – niezmiennie cieszą się sporą popularnością i przyciągają tysiące młodych adeptów nauki, a także wiele osób dorosłych, głodnych nowej wiedzy z rozmaitych obszarów. Niedawno rozstrzygnięty został także konkurs o nazwie „Odkrywcy", zorganizowany przez Ministerstwo Edukacji Narodowej i skierowany do instytucji zainteresowanych tworzeniem interaktywnych pomocy dydaktycznych czy organizowaniem zajęć pozaszkolnych i warsztatów rozwijających umiejętności STEM wśród najmłodszych. To tylko wybrane przykłady – inicjatyw, czy to oddolnych, czy podejmowanych przez rządzących bądź duże instytucje o zasięgu ogólnopolskim, jest na szczęście dość sporo. Niezależnie od skali tych przedsięwzięć warto pamiętać, że *non scholae, sed vitae discimus*.

Tym bardziej więc cieszy mnie także fakt, że stale otrzymuję sygnały z różnych stron naszego kraju o znaczeniu „Elektroniki Praktycznej" w edukowaniu i motywowaniu młodzieży szkolnej do samorozwoju w najbliższej nam, drodzy Czytelnicy, dziedzinie techniki. Co więcej – wiem z różnych źródeł, że część naszych Autorów dzielnie podejmuje trudy edukowania innych także poza łamami EP, czy to poprzez działalność akademicką, czy to na drodze tworzenia rozmaitych materiałów dydaktycznych, książek oraz kursów elektroniki. A taką właśnie działalność doceniam wyjątkowo – o ile bowiem samo projektowanie czy programowanie urządzeń elektronicznych jest zajęciem niezwykle ciekawym i wartościowym, o tyle szerzenie wiedzy uważam za szczególny powód do dumy.

Z wakacyjnym pozdrowieniem,

Przemysław Musz

[1] https://t.ly/FvQMo

eprasa.pl ef7662c802

ELEKTRONIKA PRAKTYCZNA

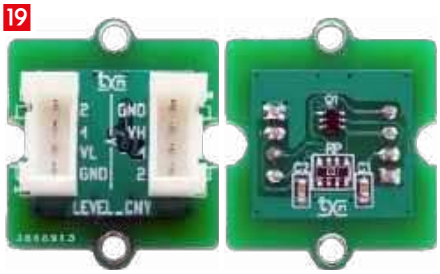
Nr 8 (391) • Sierpień 2025

12

15

17

19



Nie przeocz

Nowe podzespoły 6
Dodaj do obserwowanych 11
Koktajl niusów 80

Projekty

Sygnalizator świetlny 12

Miniprojekty

Minimoduły cyfrowego audio – przetworniki A/D i D/A (2) 15
Cyfrowy termometr/termostat I²C zgodny z Grove 17
Translator poziomów I²C Grove 19

Temat numeru: Przetworniki akustyczne okiem praktyka

Przetworniki akustyczne okiem praktyka 20

Podzespoły

Mikrofony MEMS w praktyce konstruktora 30
Liniowe regulatory napięcia w wersji... cyfrowej 42

Notatnik konstruktora

Masa nieco inaczej 36
Oszczędzanie energii w teorii i w praktyce (9) 38

Moduły w aplikacjach

Internet Rzeczy w pomiarach środowiskowych (20). Obsługa czujnika BME688 w języku C++ z użyciem rdzenia RISC-V procesora RP2350 44

Sprzęt

Recenzja mostka RLC typu UT622E – jakość wykonania i testy użyteczności 49

Audio bez tajemnic

Stopnie wejściowe wzmacniaczy operacyjnych 52
Sztuczna masa w układach audio 54
Konwersja cyfrowo-analogowa w technice audio (2) 56

Elektronika w praktyce

Układy analogowe w erze cyfrowej 68

Kursy

Programowanie w środowisku MicroPython (4). Systemy plików 73

Prenumerata 2
Od wydawcy 3
Hity następnego numeru 83

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

eprasa.pl ef7662c802

TRZECIARĘKA ZD-11P
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk – uchwyt z latarką, ZD11P

TRZECIARĘKA ZD-11P-1
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk – uchwyt z latarką i lupą, ZD11P-1

TRZECIARĘKA SN-394
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk z lupą 50 mm, przykręcany do blatu Proskit SN-394

BESTSELLERY sklepu AVT – sklep.avt.pl

Trzecia ręka

Rabat dla Czytelników EP
przy zakupie podaj kod **EP2505TR**

–3%

Rabat dla Prenumeratorów EP
przy zakupie podaj numer prenumeraty

–6%

TRZECIARĘKA ZD-11M-1
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk – z uchwytem na szpulkę cyny, ZD11M-1

TRZECIARĘKA ZD-11M-2
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk – uchwyt z lupą i podświetleniem LED ZD11M-2

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

TRZECIARĘKA ZD-11M
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka”, pająk – uchwyt ZD11M

TRZECIARĘKA SN-392
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka” z lupą 90 mm, Proskit SN-392

TRZECIARĘKA
Uchwyt montażowy typu „Trzecia ręka” z lupą 60 mm

eprasa.pl ef7662c802

nowe podzespoły

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

Niskoprofilowy czujnik kolorów RGBIR z kwalifikacją AEC-Q100

Do oferty firmy Vishay Intertechnology wchodzi pierwszy niskoprofilowy czujnik RGBIR z kwalifikacją AEC-Q100, opracowany do wyznaczania temperatury barwowej w motoryzacji. Model VEML6046X00 jest zamykany w niskoprofilowej obudowie o wymiarach 2,67×2,45×0,6 mm. Zawiera fotodiodę, wzmacniacz niskoszumowy i 16-bitowy przetwornik A/C.

Dzięki oddzielnym kanałom R, G, B i podczerwieni (IR) układ umożliwia obliczanie temperatury barwowej w celu równoważenia punktu bieli wyświetlaczy. Czułość widmowa kanału zielonego odpowiada czułości ludzkiego oka, co pozwala uzyskać dużą dokładność, a kanał IR zapewnia stabilne wyniki pomiarów przy różnych źródłach światła. Dzięki szerokiemu zakresowi jasności światła otoczenia od 0 lx do 176 klx, czujnik nie ulega nasyceniu w świetle dziennym, a duża czułość – wynosząca 0,0053 lx/ct – pozwala na umieszczanie go za ciemnymi panelami szklanymi.

VEML6046X00 charakteryzuje się zakresem temperatury roboczej do +110°C. Pracuje z napięciem zasilania od 2,5 do 3,6 V przy poborze prądu wynoszącym typowo 0,5 μA. Zawiera interfejs I²C o napięciu pracy od 1,7 do 3,6 V. Zakres zastosowań układu obejmuje sterowanie podświetleniem ekranów samochodowych i systemów infotainment, przyciemnianie lusterek wstecznych, systemy sterowania oświetleniem wnętrza, wyświetlacze przezierne itp.

www.vishay.com

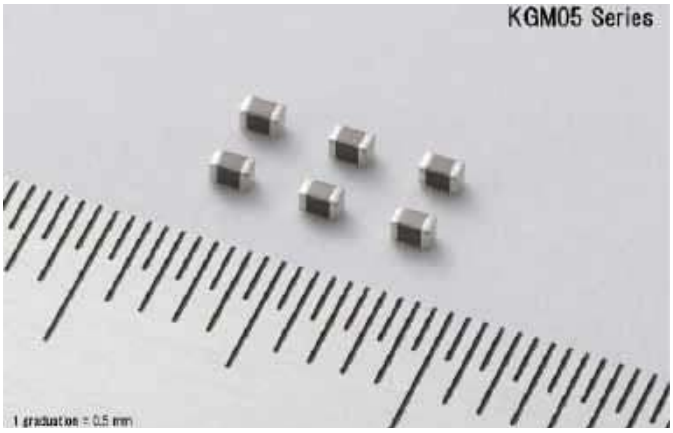
Podwójny tranzystor MOSFET do współpracy z superkondensatorami o napięciu 3 V

W ofercie firmy Advanced Linear Devices jest obecnie dostępny podwójny tranzystor MOSFET, zaprojektowany specjalnie do współpracy z superkondensatorami o napięciu 3 V. ALD910030 to tranzystor typu SAB (Supercapacitor Auto-Balancing), zapewniający precyzyjne równoważenie napięć i prądów upływu w aplikacjach 12-woltowych, gdzie zapobiega ewentualnym stanom awaryjnym, praktycznie nie pobierając mocy. Napięcie progowe bramki zostało precyzyjnie ustalone na poziomie 3,0 V (VGS=VDS). Zakres zastosowań ALD910030 obejmuje m.in. mierniki zużycia mediów, systemy zasilania awaryjnego i źródła energii odnawialnej. ALD910030 jest zamykany w obudowie SOIC-8. Jego ceny hurtowe zaczynają się od 4,43 USD przy zamówieniach 50 sztuk.

www.aldinc.com

Pierwszy na rynku kondensator MLCC o pojemności 47 μF w obudowie rozmiaru 0402

Kyocera AVX wprowadza na rynek pierwszy kondensator MLCC o pojemności 47 μF, zamykany w obudowie 0402 (1,0×0,5 mm)



o grubości 0,5 mm. Największy odpowiednik z wcześniejszej oferty charakteryzował się ponad dwukrotnie mniejszą pojemnością, wynoszącą 22 μF.

Nowy model występuje w wariantach z dwoma typami dielektryków: X6S i X5R. Pierwszy z nich (ozn. KGM05DS60E476MH) charakteryzuje się szerszym zakresem temperatury roboczej, wynoszącym od –55 do +105°C i jest produkowany na napięcie znamionowe 2,5 V. Drugi pracuje w węższym zakresie temperatury (–55...+85°C) i jest produkowany na napięcia znamionowe 2,5 V i 4 V (ozn. odpowiednio KGM05DR50E476MH i KGM05DR50G476MH).

www.kyocera-avx.com

Zaawansowane czujniki Halla o wysokiej czułości, zrealizowane na bazie antymonku indu

AHE101, AHE102, AHE108 i AHE300 to najnowsze czujniki Halla firmy Diodes Inc., wyprodukowane na bazie antymonku indu i wyróżniające się dużej czułością, umożliwiającą pomiar słabych pól magnetycznych. Ich drugą zaletą jest małe napięcie offsetu, nieprzekraczające 10 mV. Wszystkie cztery układy charakteryzują się

eprasa.pl ef7662c802

mostkową architekturą. Pracują z maksymalnym napięciem polaryzacji równym 2 V. Ich zakres rezystancji wejściowej i wyjściowej wynosi – w zależności od wariantu – od 240 do 550 Ω, a napięcie Halla od 168 do 415 mV (przy 50 mT). Zakres dopuszczalnej temperatury pracy rozciąga się od –40 do +110°C (AHE300) lub +125°C (pozostałe). Dostępne są warianty w obudowach SOT23-4 i SIP-4.

www.diodes.com

Miniaturowe, wysokotemperaturowe diody LED w ofercie Würth Elektronik

Würth Elektronik powiększa ofertę diod LED z serii WL-SMTW. Jednokolorowe diody SMD typu top-view są obecnie dostępne w obudowach 1608 o wymiarach zaledwie 1,6×0,8×0,55 mm. Są to diody niezawodne i energooszczędne, dostępne w wersjach: niebieskiej, zielonej, żółtej, bursztynowej i w dwóch czerwonych (630 nm lub 640 nm). Podobnie jak wcześniejsze odpowiedniki z tej serii nie emitują one promieniowania UV ani IR. Z kolei do oferty diod w standardowym rozmiarze 3528 (3,5×2,8×1,85 mm) wchodzi wariant o dopuszczanej temperaturze pracy podwyższonej do +100°C. Jest on dostępny w 5 wersjach kolorystycznych: niebieskiej, zielonej, żółtej, bursztynowej i czerwonej.

Diody LED z serii WL-SMTW nadają się do podświetlania wyświetlaczy LCD, instalacji światłowodowych oraz do zastosowań przemysłowych i medycznych. Podobnie jak inne produkty z oferty Würth Elektronik są oferowane bez minimalnego progu zamówienia.

www.we-online.com

Precyzyjny czujnik odległości dToF w lekkiej i kompaktowej obudowie

Sony Image Sensing Solutions prezentuje miniaturowy, lekki czujnik odległości o symbolu AS-DT1, mogący znaleźć zastosowanie w dronach i robotyce. Moduł jest produkowany w obudowie o wymiarach 31×29×29 mm i masie 50 g. Pracuje z wykorzystaniem technologii Direct Time of Flight (dToF), pozwalającej uzyskać dużą szybkość i rozdzielczość oraz szeroki zakres pomiaru. Zastosowany w czujniku wielopunktowy sensor SPAD (Single Photon Avalanche Diode) zawiera matrycę 24×24 pikseli, pracującą z maksymalną szybkością rejestracji mapy głębii równą 30 fps. Zapewnia rozdzielczość 0,25 mm i dokładność ±5 cm (przy odległości 10 m).

AS-DT1 pracuje z użyciem emiterów o długości fali 940 nm. Umożliwia pomiar odległości od obiektów o małym kontraście i niskim współczynniku odbicia, problematycznych w przypadku innych technik pomiaru. Nadaje się do pracy wewnątrz i na zewnątrz pomieszczeń. Dzięki małym wymiarom i masie aluminiowej obudowy może być łatwo integrowany z szeroką gamą urządzeń – począwszy od robotów w restauracjach i magazynach, aż po drony używane do inspekcji i pomiarów. Zapewnia zasięg do 40 m wewnątrz pomieszczeń oraz do 20 m w terenie otwartym, przy oświetleniu 100 000 lx.

www.image-sensing-solutions.eu

REKLAMA

eprasa.pl ef7662c802

Ciche mikroprzełączniki o niezawodności 1 miliona cykli

Przełączniki z nowej serii KSC XA „Soft Sound" firmy Littelfuse zostały zaprojektowane do tych aplikacji z sektora motoryzacyjnego, medycznego czy konsumenckiego, w których kluczowa jest cicha praca. Ich drugą zaletą jest niezawodność na poziomie 1 miliona cykli. Przełączniki KSC XA charakteryzują się dużą siłą aktywacji (do 9,6 N), co zmniejsza ryzyko przypadkowego przełączenia. Są produkowane w obudowach SMD o powierzchni 6,2×6,2 mm i wysokości 4,9 mm z wyprowadzeniami typu „J". Stopień ochrony IP67 potwierdza ich dużą odporność na wodę i kurz.

www.littelfuse.com

Czujniki prądowe o dużej dokładności pomiaru i dobrych właściwościach szumowych

Allegro MicroSystems informuje o rozszerzeniu oferty czujników prądowych o dwa nowe układy, oznaczone symbolami CT4022 i CT4032. Sensory, stanowiące rozszerzenie rodziny XtremeSense TMR, projektowane są pod kątem aplikacji clean energy, wymagających dużej dokładności pomiaru i dobrych właściwości szumowych. Wykazują nawet 15-krotnie mniejsze napięcie szumu (RMS) w stosunku do czujników opartych na efekcie Halla (5 mA rms). Są układami wysokonapięciowymi, których wewnętrzna bariera izolacyjna umożliwia pracę z napięciem do 1000 V. Nadają się do zastosowań w pompach ciepła, falownikach fotowoltaicznych i ładowarkach pojazdów EV. Mała rezystancja wewnętrznego przewodnika, wynosząca zaledwie 1 mΩ, zapewnia odporność na duże impulsy prądu rozruchowego i ogranicza straty mocy w układzie.

CT4022 i CT4032 charakteryzują się pasmem 500 kHz. Są zamykane w obudowach, odpowiednio, SOIC-8 i SOIC-16 (w wersji szerokiej). Występują wśród nich również modele o kwalifikacji AEC-Q100 Grade 1, zdatne do pracy w zakresie temperatury otoczenia od –40 do +125°C. Układy są dostępne w wariantach o napięciu zasilania 3,3 V i 5 V.

www.allegromicro.com

Pierwsze tranzystory GaN z wbudowaną diodą Schottky'ego

Infineon Technologies prezentuje pierwsze na rynku tranzystory GaN z wbudowaną diodą Schottky'ego, przeznaczone do zastosowań w przemyśle. Są to tranzystory stanowiące rozwinięcie rodziny CoolGaN G5, pozwalające zredukować straty występujące w tzw. czasie martwym i zwiększyć sprawność energetyczną systemów zasilania. Ponadto upraszczają konstrukcję stopni mocy i redukują koszty BOM.

W aplikacjach hard-switching układy zasilające oparte na podzespołach GaN mogą wykazywać duże straty mocy, związane z wysokim napięciem na pojemności wewnętrznej (VSD). Są one tym większe, im dłuższy jest martwy kontrolera. Projektanci układów zasilania stosowali dotąd zewnętrzne diody Schottky'ego, połączone równolegle z tranzystorem lub próbowali skrócić czas martwy w kontrolerze. Obie metody generują jednak dodatkowy wysiłek projektowy i zwiększają koszty. Niedogodności te wyeliminowano w najnowszych tranzystorach CoolGaN G5 z wewnętrzną diodą Schottky'ego, zaprojektowanych specjalnie do zastosowań w układach zasilania dużej mocy i układach napędowych. Pierwsze wersje, produkowane na napięcie przebicia 100 V, są zamykane w obudowach PQFN o powierzchni 5×3 mm i charakteryzują się rezystancją RDS(ON) już od 1,5 mΩ.

www.infineon.com

Szybkie, 4-kanałowe izolatory cyfrowe z kwalifikacją AEC-100, o przepustowości do 50 Mbps

Toshiba Electronics wprowadza do sprzedaży szybkie, 4-kanałowe izolatory cyfrowe z serii DCM34xx0 z kwalifikacją AEC-100, przeznaczone do zastosowań w motoryzacji. Wykazują one odporność na sumacyjne impulsy przepięciowe o szybkości narastania do co najmniej 100 kV/μs i mogą pracować z przepustowością do 50 Mbps. Producent poleca je do zastosowań m.in. w ładowarkach pokładowych i systemach zarządzania akumulatorami (BMS). Izolatory z serii DCM34xx0 są odporne na wejściowe napięcia sumacyjne do 1500 V. Występują w konfiguracjach z: 4 kanałami forward, 3 kanałami forward i pojedynczym kanałem reverse oraz z 2 kanałami forward i 2 kanałami reverse. Wprowadzają zniekształcenia szerokości impulsu na poziomie zaledwie 0,8 ns. Są zamykane w obudowach SOIC-16W i mogą pracować w temperaturze otoczenia od –40 do +125°C.

www.toshiba.semicon-storage.com

Precyzyjny detektor napięcia o zakresie do 76 V

Do oferty firmy Torex wchodzi precyzyjny detektor napięcia XD6138 o dopuszczalnym napięciu wejściowym z zakresu od 0 do 76 V, niezależnym od napięcia zasilającego. Wykazuje mały pobór prądu, wynoszący 0,5 μA przy napięciu zasilania 2,2 V. Umożliwia programowanie napięć progowych detect/release (w zakresach odpowiednio od 2,3 do 20 V oraz od 2,5 do 24 V), a także czasu opóźnienia (przy użyciu zewnętrznego kondensatora). Dostępne

eprasa.pl ef7662c802

są wersje z wyjściem typu CMOS lub otwarty dren, do wyboru jest też aktywny stan logiczny wyjścia Reset. Układ XD6138 jest zamykany w obudowie SOT-25.

www.torex-europe.com

Moduły mocy SiC do ładowarek pokładowych

Firma Rohm zaprezentowała nowe moduły mocy o konfiguracjach 4-in-1 i 6-in-1, zrealizowane w technologii SiC i zamykane w obudowach HSDIP20 o wymiarach 38×31×3,5 mm. Są one przeznaczone do zastosowań w ładowarkach pokładowych pojazdów, realizowanych w topologiach PFC i LLC. Oferta obejmuje 6 modeli o napięciu znamionowym 750 V (ozn. BSTxxx1P4K01) i 7 modeli 1200-woltowych (BSTxxx2P4K01). Zawierają one wszystkie komponenty niezbędne w aplikacjach konwersji mocy, co ułatwia ich implementację. Jak podaje producent, w porównaniu z równoważnym obwodem, zrealizowanym na 6 dyskretnych tranzystorach SiC MOSFET, nowe moduły 6-in-1 pozwalają obniżyć temperaturę roboczą o około 38°C przy pracy z mocą wyjściową 25 W oraz zapewniają ponad 3-krotnie większą gęstość mocy. W porównaniu z podobnymi modułami, realizowanymi w obudowach DIP, gęstość mocy jest większa ponad 1,4×.

Wersja	VDSS	RDS(ON)	ID	Topologia
BST91B1P4K01	750 V	13 mΩ	90 A	4-in-1
BST47B1P4K01		26 mΩ	47 A	
BST31B1P4K01		45 mΩ	31 A	
BST91T1P4K01		13 mΩ	90 A	6-in-1
BST47T1P4K01		26 mΩ	47 A	
BST31T1P4K01		45 mΩ	31 A	
BST70B2P4K01	1200 V	18 mΩ	70 A	4-in-1
BST38B2P4K01		36 mΩ	38 A	
BST25B2P4K01		62 mΩ	25 A	
BST70T2P4K01		18 mΩ	70 A	6-in-1
BST38T2P4K01		36 mΩ	38 A	
BST25T2P4K01		62 mΩ	25 A	

www.rohm.com

Bezpieczniki wysokonapięciowe na zakres 300...600 A do pojazdów elektrycznych

Oferta firmy Mouser powiększyła się o serię wysokonapięciowych bezpieczników Littelfuse 38EV o napięciu znamionowym 500 VDC i szerokim zakresie dopuszczalnej temperatury pracy (od –40 do +125°C). Są one produkowane na zakres prądów znamionowych od 300 do 600 A i zamykane w obudowach o średnicy 30 mm z miedzianymi terminalami do kabli o przekroju od 50 do 200 mm². Charakteryzują się zdolnością wyłączeniową 30 kA. Ich zakres zastosowań obejmuje głównie ochronę komponentów wysokonapięciowych w pojazdach o zasilaniu hybrydowym i elektrycznym.

www.mouser.com

Niskoprofilowe złącza kabel-płytka z możliwością montażu pod elementami chłodzenia

Samtec wprowadza do produkcji niskoprofilowe złącza kabel-płytka Si-Fly LP, przeznaczone do centrów danych oraz aplikacji

REKLAMA

eprasa.pl ef7662c802

HPC i AI, w których istotne są ograniczenia wysokości wokół układów scalonych. Charakteryzują się one bardzo małą grubością, wynoszącą zaledwie 4,35 mm po złączeniu, dzięki czemu mogą się z łatwością mieścić pod radiatorami i innymi elementami chłodzącymi.

Złącza Si-Fly LP obsługują szybkość transmisji 112 Gbps PAM4 na kanał w konfiguracji 2×16 par, zapewniając łączną przepustowość 896 Gbps (×8, dwukierunkowo) lub 1,79 Tbps (×16, jednokierunkowo). Wspierają standardy PCIe 6.0 i CXL 3.2. Technologia Flyover umożliwia prowadzenie sygnałów poza płytką, co eliminuje problemy termiczne, upraszcza projekt płytki drukowanej oraz redukuje koszty dzięki eliminacji re-timerów i możliwości stosowania tańszych płytek o mniejszej liczbie warstw. Zastosowany przewód twinax Eye Speed 34 AWG (92 Ω), charakteryzuje się małym rozrzutem parametrów czasowych pomiędzy parami przewodów i zapewnia bardzo dobrą integralność sygnału.

www.samtec.com

Sprzęgacz optyczny z wbudowanym układem Millera do współpracy z tranzystorami SiC MOSFET

TLP5814H to zintegrowany sprzęgacz optyczny, polecany do współpracy z tranzystorami SiC MOSFET w aplikacjach przemysłowych, w tym falownikach i zasilaczach, narażonych na ekstremalną temperaturę otoczenia. Układ został wyposażony w aktywny obwód Millera do zabezpieczenia współpracującego tranzystora, co zwiększa poziom bezpieczeństwa i minimalizuje liczbę komponentów zewnętrznych. Rezystancja kanału układu Millera wynosi typowo 0,69 Ω, a jego wydajność prądowa to 6,8 A. Parametry te pozwalają zmniejszyć ryzyko niepożądanego włączania

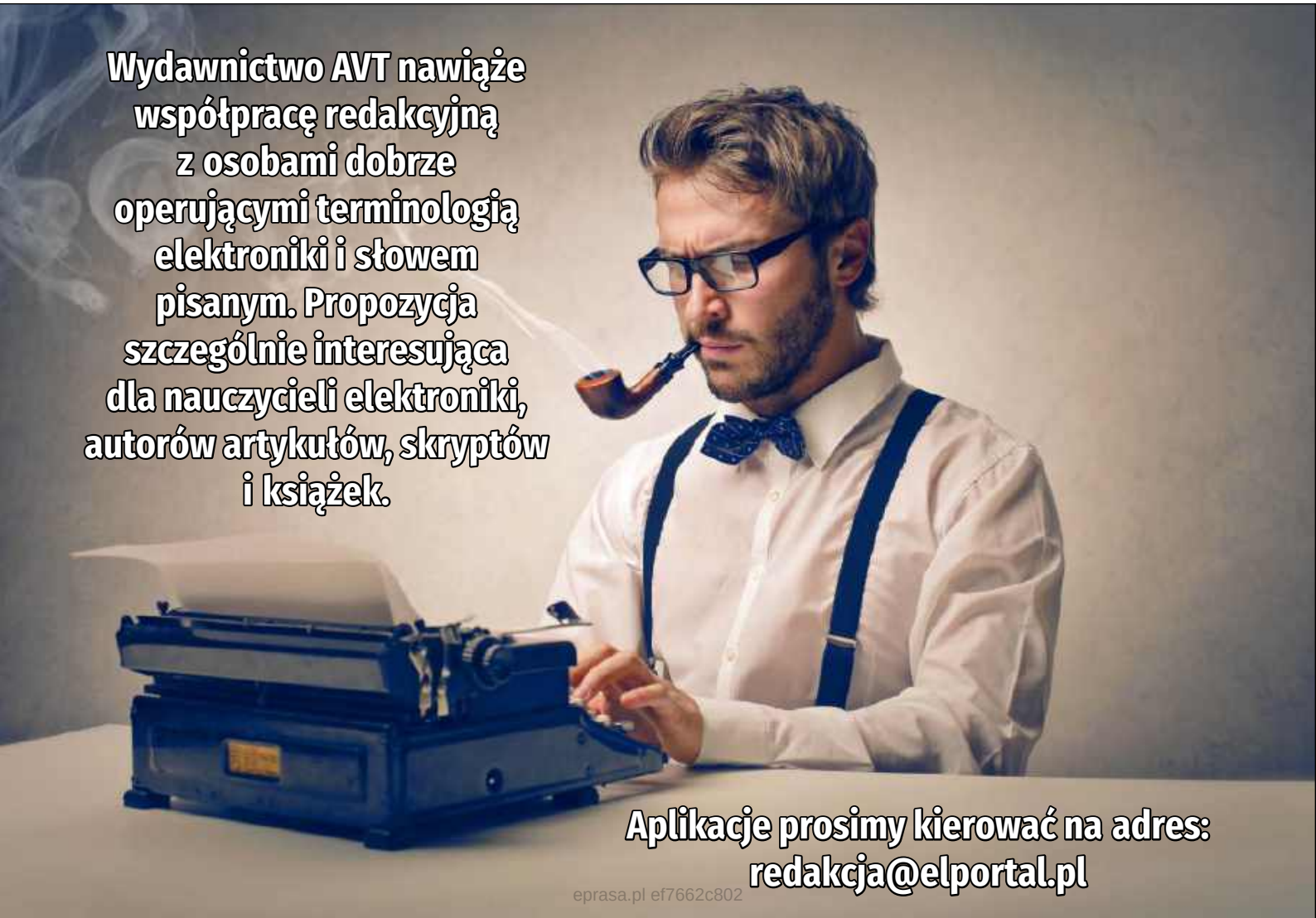
tranzystorów MOSFET i IGBT, wrażliwych na szybkie zmiany napięcia bramki.

TLP5814H pracuje z napięciem zasilania od 13 do 23 V, pobierając przy tym prąd o natężeniu maksymalnie 5 mA. Charakteryzuje się czasem propagacji do 150 ns, maksymalnym wejściowym prądem progowym 3 mA, izolacją do 5 kV (RMS) oraz wydajnością prądową wyjścia rail-to-rail równą +6,8 A/–4,8 A. Zakres dopuszczalnej temperatury pracy to –40...+125°C. Wewnętrzna klatka Faradaya zabezpiecza przed sumacyjnymi przepięciami wejściowymi o szybkości narastania do co najmniej ±70 kV/μs.

Układ jest zamykany w 8-wyprowadzeniowej obudowie SO-8L o wymiarach 10×5,85×2,1 mm i drodze upływu > 8,0 mm.

www.toshiba.semicon-storage.com

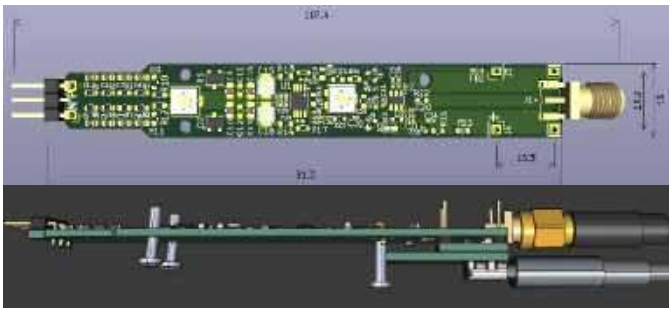
REKLAMA



eprasa.pl ef7662c802

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.



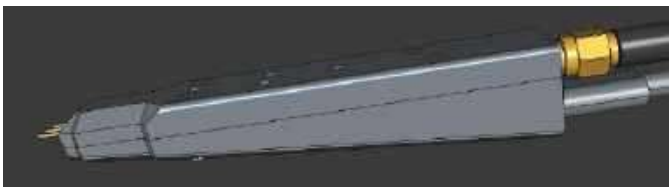
Sonda różnicowa (10×, 100 MHz) do oscyloskopu

Prezentowana konstrukcja to kompaktowa sonda różnicowa do oscyloskopu o paśmie 100 MHz. Nie jest to pierwsza taka konstrukcja autora – jak sam zaznacza w dokumentacji urządzenia, projekt ten to „aktualizacja" innego układu sprzed 5 lat. Prezentowana sonda jest mniejsza i ma własną, dedykowaną obudowę, wykonaną w technice druku 3D. Jedyne, czego nie udało się zoptymalizować autorowi względem pierwowzoru, to cena – moduł nadal kosztuje ok. 50 dolarów (biorąc pod uwagę tylko koszty materiałów).

Modyfikacje względem oryginalnego projektu bazują na zmianach, które do pierwszej wersji wprowadzili użytkownicy portalu Hackaday.io. Sonda powstała jako odpowiedź społeczności DIY na potrzeby wszystkich tych, którzy nie chcą lub nie mogą pozwolić sobie na zakup fabrycznej sondy różnicowej. Przykładowe urządzenie o porównywalnych parametrach, przeznaczone do oscyloskopów marki Keysight, kosztuje – bagatela – 1900 dolarów.

W porównaniu do poprzedniej konstrukcji, nowa sonda jest znacznie smuklejsza – płytka ma wymiary około 13 mm × 100 mm. Dłuższa sonda ułatwia trzymanie jej w ręce i obsługę podczas badania obwodów. Poprzedni projekt miał dwie wersje: jedną zasilaną ze stabilizowanego zasilacza 5 V i drugą, wyposażoną we wbudowany stabilizator i wymagającą zasilania napięciem od 7,5 V do 12 V. W nowej konstrukcji zasilanie znajduje się na osobnym module, więc łatwo można skonfigurować konstrukcję do pracy z typowym napięciem 5 V DC, np. ze złącza USB. Obecnie istnieją 3 moduły zasilania: standardowy interfejs micro USB typu B (5 V), stabilizator napięcia z wejściem 7,5...12 V oraz płytka z wejściem USB-C, obsługująca tryb PD, która dostarcza 9 V lub 12 V do wbudowanego stabilizatora napięcia. W sekcji zasilania dodano jeszcze prosty wskaźnik obecności napięcia w postaci diody LED.

Nowa konstrukcja pozwala na regulację napięcia offsetu w zakresie do 35 mV (na wyjściu). Nieznacznie pogorszyło to inne parametry sondy, głównie dokładność wzmocnienia, jak i tłumienia zakłóceń przedostających się do toru analogowego z linii zasilania, ale redukcja offsetu jest zdaniem autora ważniejsza. Zmiana ta jest opcjonalna, więc konstruując własną sondę na podstawie tego projektu, nie trzeba korzystać ze wspomnianej modyfikacji. Nowa sonda oferuje również lepsze tłumienie sygnału współbieżnego dla wyższych częstotliwości.



Konstrukcja jest umieszczona w specjalnej obudowie, którą odtworzyć można na dowolnej drukarce 3D. Jeśli obudowę taką następnie wyklei się od wewnątrz np. taśmą miedzianą, to zapewni ona bardzo dobry poziom ekranowania RFI.

Autor użył w konstrukcji elementów w obudowach 0402, aby zmniejszyć rozmiar całości. Nie wszystkie elementy mogą jednak być tak małe – wymagany jest dosyć duży odstęp pomiędzy np. wejściami, aby zachować wymagany poziom izolacji (wszak moduł stosowany ma być do pomiarów przy napięciu współbieżnym do 750 V).

https://tiny.pl/hchk3hvm

Polowy analizator środowiska bazujący na sztucznej inteligencji

Zaprezentowana konstrukcja nie bez powodu przypomina tricoder znany ze *Star Treka*. Jest to przenośny analizator środowiska z czujnikami promieniowania, stężenia CO_2, lotnych związków organicznych (VOC), temperatury, wilgotności, światła, dźwięku i pól magnetycznych.

Co go wyróżnia? Wbudowana sztuczna inteligencja (korzystająca z Google Coral Mini), która w prosty sposób informuje, czy w danym miejscu użytkownik jest bezpieczny, czy nie. System podaje informacje: np. „Masz 10 minut, zanim powinieneś wyjść".

Urządzenie wyposażone jest w sporą baterię, zapewniającą wygodę użytkowania. System korzysta z otwartego sprzętu i oprogramowania, zapewniając praktyczne, przydatne funkcje. Oprogramowania zwraca informacje w prostym języku angielskim, podając nie tylko wartości liczbowe z czujników – faktycznie ostrzega, kiedy np. nadejdzie czas zalecanego opuszczenia pomieszczenia.

System uczenia maszynowego oparty jest na „detektorze anomalii", który wykrywa np. zaburzenia odczytów grawitacji czy ruch po okręgu (za pomocą kompasu), ale również realnie groźne sytuacje. Możliwe jest więc także informowanie użytkownika o ewentualnych awariach czujników. Oprogramowanie analizatora napisano początkowo w C++, ale autorowi udało się przekonwertować je do CircuitPythona.

https://hackaday.io/project/203273-ai-field-analyzer

eprasa.pl ef7662c802

AVT sklep

W ofercie AVT*

AVT6085

Najważniejsze parametry:
- załączanie trzech diod LED na wzór świateł w prawdziwym sygnalizatorze drogowym,
- praca przez 24 s od wciśnięcia przycisku,
- niski pobór prądu: poniżej 1 µA w stanie spoczynku i 10...30 mA podczas pracy,
- łatwa obsługa: wystarczy wcisnąć przycisk w celu rozpoczęcia sekwencji,
- płytka imitująca kształt sygnalizatora na skrzyżowaniu,
- prosty montaż,
- zasilanie napięciem 3 V z dwóch baterii AA.

Projekty pokrewne na stronie www.ep.com.pl
(aktywne linki do artykułów):
- Sygnalizator LED
- Energooszczędny sygnalizator LED

* **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

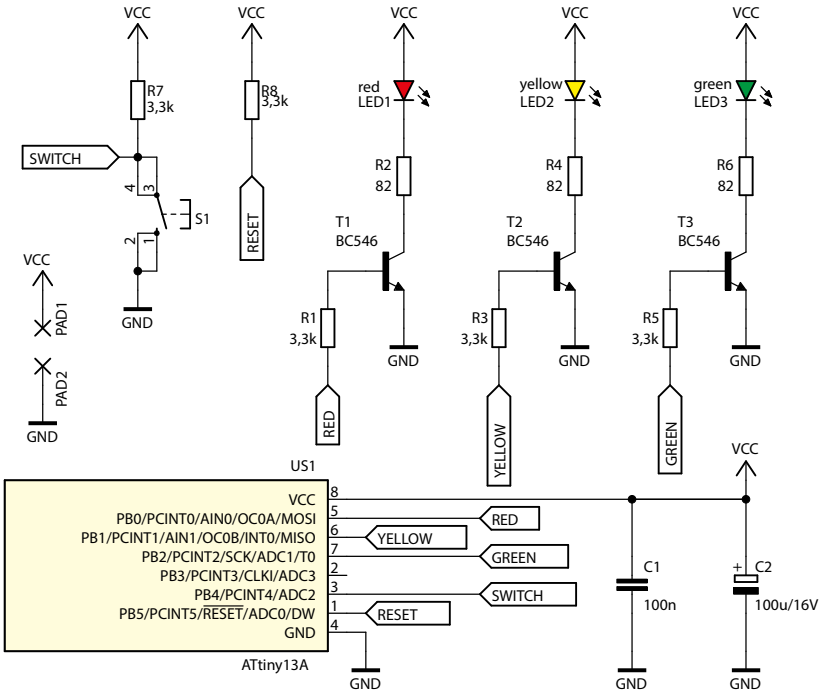
W przypadku braku dostępności na stronie sklepu osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt via e-mail: **kity@avt.pl**

Sygnalizator świetlny

Zabawki dla dzieci to temat cyklicznie przewijający się na łamach „Elektroniki Praktycznej". Ten prosty układ pozwoli maluchom oswajać się z ruchem drogowym i zasadami panującymi na skrzyżowaniach. Taki sygnalizator można zarówno podarować dziecku, jak i zmontować go wspólnie z nim – wszak najmłodsi uwielbiają wspólną pracę!

„Brum, brum, iiiii! Czekaj, czerwone!" Zabawę samochodami, ciężarówkami, śmieciarkami czy jakimikolwiek innymi pojazdami można urozmaicić, choćby poprzez postawienie na skrzyżowaniu „prawdziwego" sygnalizatora świetlnego. Takiego jak te, które dziecko widzi na drogach. To urządzenie może również generować sygnał startu w wyścigach. Mała rzecz, a cieszy!

Prezentowanym układem można również dziecku pokazać, z czego składa się elektronika, jaką widzimy na co dzień. Tranzystory, kondensatory, rezystory, a nawet układ scalony! Jest też płytka, na której widać ścieżki, które z kolei łączą te elementy między sobą. A całość ŻYJE! Może nie



Rysunek 1. Schemat ideowy układu sygnalizatora

Wykaz elementów:

Rezystory: (THT, 0,25 W)
R1, R3, R5, R7, R8: 3,3 kΩ
R2, R4, R6: 82 Ω

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

Półprzewodniki:
LED1: czerwona dyfuzyjna, 10 mm
LED2: żółta dyfuzyjna, 10 mm
LED3: zielona dyfuzyjna, 10 mm
T1...T3: BC546
US1: ATtiny13A DIP8

Pozostałe:
S1: TS12-130
Jedna podstawka DIP8
Koszyk baterii 2 × AA z przewodami (KOSZYK BAT15)

eprasa.pl ef7662c802

podjada chrupek i nie fruwa, ale jednak robi to, czego od niej oczekujemy.

Budowa układu

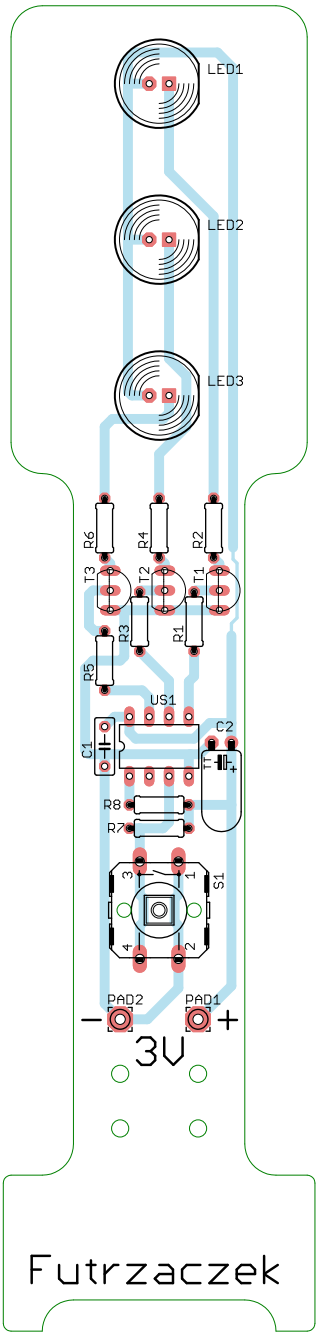
Schemat ideowy omawianego układu znajduje się na **rysunku 1**. Jako światła sygnalizatora służą trzy barwne diody LED1…LED3, o średnicy 10 mm każda. Ponieważ w tym układzie ważne jest uzyskanie dużej jasności świecenia, są one sterowane prądem o natężeniu około 15 mA, ustalonym przez szeregowe rezystory o wartości 82 Ω. Prąd o takim natężeniu jest już sporym wyzwaniem dla mikrokontrolera zasilanego napięciem 3 V (wysoki spadek napięcia na tranzystorach obsługujących wyjścia, silnie zależny od egzemplarza i temperatury), dlatego zdecydowałem się zastosować do sterowania nimi tranzystorowe klucze, pracujące w stanie nasycenia. Tranzystory typu BC546 nadają się do tego celu idealnie, bowiem przy zasileniu ich bazy poprzez rezystor 3,3 kΩ, co skutkuje przepływem przez nią prądu o natężeniu około 0,7 mA, będą w stanie nasycenia przy prądzie kolektora wynoszącym 15 mA. Jednocześnie spadek napięcia na nasyconych tranzystorach jest niewielki (około 20 mV), więc wszystkie diody będą pracowały w podobnych warunkach.

Za sterowanie diodami odpowiada prosty, tani i dobrze znany mikrokontroler ATtiny13A. Przyciskiem S1 można rozpocząć pracę sygnalizatora. Aby układ był bardziej odporny na zakłócenia elektromagnetyczne, wejście mikrokontrolera, które sprawdza stan styków tego przycisku, zostało dodatkowo podciągnięte zewnętrznym rezystorem o rezystancji 3,3 kΩ. Dotyczy to również wejścia zerującego mikrokontroler.

Montaż i uruchomienie

Układ został zmontowany na jednostronnej płytce drukowanej w kształcie stojącego sygnalizatora świetlnego, której obrys mieści się w prostokącie o wymiarach 170 mm × 40 mm. Jej wzór ścieżek oraz schemat montażowy pokazano na **rysunku 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. Kondensator C2 należy wlutować na nóżkach na tyle długich, aby dało się go położyć na powierzchni laminatu. W pełni zmontowany układ prototypowy można zobaczyć na **fotografii 1**. Wszystkie wyprowadzenia elementów, lutowane od strony ścieżek, warto przyciąć na możliwie małą długość, aby nie miały ostrych krawędzi. Można to uzyskać również poprzez zeszlifowanie wszystkich



Rysunek 2. Schemat montażowy i wzór ścieżek płytki

Fotografia 1. Płytka obsadzona elementami

REKLAMA

eprasa.pl ef7662c802

Fotografia 2. Szczegóły montażu koszyka na baterie

lutów na kawałku papieru ściernego o średniej gramaturze (np. 200) po zakończeniu lutowania.

Na fotografii 1 widoczne są również przewody biegnące od koszyka baterii, będącego jednocześnie podstawką dla sygnalizatora. Płytka została przyklejona do krótszego boku koszyka, z którego wychodzą na dole przewody – **fotografia 2**. Przed przyklejeniem warto zmatowić papierem ściernym zarówno powierzchnię laminatu, jak i boczną ściankę koszyka, aby spoina była możliwie wytrzymała. Na koniec trzeba przewlec przewody przez otwory w płytce i przylutować je do odpowiednich pól lutowniczych, najlepiej pozostawiając możliwie mały luz, aby trudniej było o nie przypadkowo zahaczyć i je oderwać. Po włożeniu baterii do koszyka będzie on stanowił stosunkowo ciężką i stabilną podstawę dla sygnalizatora.

Na etapie uruchamiania jest konieczne zaprogramowanie pamięci Flash mikrokontrolera dostarczonym wsadem. Wartości bitów zabezpieczających pozostają niezmienione względem ustawień fabrycznych i powinny wynosić:

```
Low Fuse = 0x6A
High Fuse = 0xFF
```

Szczegóły są widoczne na **rysunku 3**, który zawiera widok okna konfiguracji tychże bitów za pomocą programu BitBurner. Częstotliwość taktowania rdzenia mikrokontrolera wynosi tylko 1,2 MHz, co jest wystarczające w tym zastosowaniu. Z kolei wyłączenie funkcji Brown-Out Detector przyczyni się do zwiększenia energooszczędności urządzenia.

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 1 μA, natomiast podczas pracy, czyli podczas świecenia diod LED, pobór ten waha się od 15 do 30 mA, w zależności od liczby świecących jednocześnie diod. Napięcie zasilania powinno wynosić 3 V lub niewiele więcej, by nie przekroczyć dopuszczalnego prądu diod.

Obsługa układu jest niezwykle prosta: po włożeniu baterii mikrokontroler przechodzi w stan spoczynku. Trzeba wcisnąć przycisk S1, aby go z tego stanu wybudzić. Generuje on wtedy sekwencję świateł:

- 5 sekund: światło czerwone,
- 2 sekundy: światło czerwone i żółte,
- 10 sekund: światło zielone,
- 2 sekundy: światło żółte,
- 5 sekund: światło czerwone,

po czym wyłącza światło czerwone i przechodzi z powrotem do stanu uśpienia. Daje to możliwość jednokrotnego „przejazdu”

Rysunek 3. Konfiguracja bitów zabezpieczających

przez „skrzyżowanie” przez 10 s. Co istotne, zabawka nie wymaga od opiekuna pamiętania o tym, by ją wyłączyć po zakończonej zabawie. Jeżeli przycisk nie będzie wciskany, to światła pozostaną wyłączone.

Pobór energii w układzie został zoptymalizowany poprzez użycie trybu uśpienia mikrokontrolera, z którego jest on wybudzany po wykryciu zewnętrznego przerwania od zmiany styków przycisku oraz w wyniku występowania przerwań od licznika Watchdog. Wciśnięcie przycisku uruchamia Watchdog i konfiguruje go do pracy z generowaniem przerwań co około 1 s. Nawet w czasie pracy mikrokontroler przez większość czasu pozostaje w uśpieniu, wybudza się jedynie, by zaktualizować liczniki co sekundę i ewentualnie zmienić stan świecenia diod.

Do układu nie została przewidziana jakaś szczególna obudowa. Założyłem, że panują w nim napięcia na tyle niskie, że z pewnością nie grożą porażeniem. Nie ma też żadnych elementów nagrzewających się czy wrażliwych na wstrząsy. Warto jednak, aby małoletni człowiek nie dotykał metalowymi rzeczami do lutów elementów na płytce, a także żeby wiedział już, że nie należy wkładać do buzi wszystkich przedmiotów, które znajdzie wokół siebie...

Michał Kurzela, 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 ef7662c802

AVT sklep

W ofercie AVT*

AVT6084

Najważniejsze parametry:
- pięć uniwersalnych modułów cyfrowego audio:
  - AD_PCM1809: przetwornik A/D audio,
  - AD_TAA5242: przetwornik A/D audio,
  - DA_PCM5100: przetwornik D/A,
  - DA_TAD5142: przetwornik D/A,
  - CODEC_TAC5142: zintegrowany kodek z przetwornikami A/D i D/A.
- zasilanie: 5 VDC,
- rozdzielczość: 24 bity,
- częstotliwość próbkowania 8...192 kHz (zależnie od układu),
- interfejs cyfrowy: I²S slave,
- standard napięciowy I²S: 3,3 V,
- kompatybilność z płytką do kursu Sigma DSP oraz z innymi zestawami, ewaluacyjnymi wyposażonymi w intefejs PMOD.

Projekty pokrewne na stronie www.ep.com.pl
(aktywne linki do artykułów):
- Miniklawiatura z podświetlaniem
- Sterownik 12×LED z interfejsem I²C
- Multiplekser analogowy sterowany z magistrali I²C
- Minimoduł z transceiverem CAN
- Minimoduł precyzyjnego generatora częstotliwości zegarkowych
- Minimoduł z procesorem NXP LPC865
- Przedłużacz magistrali I²C
- Dwukanałowy multiplekser magistrali I²C
- Odbiornik optyczny Toslink – minimoduł cyfrowego audio
- Minimoduł z mikroprocesorem LPC802
- Expander wyjść z interfejsem I²C

* **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**

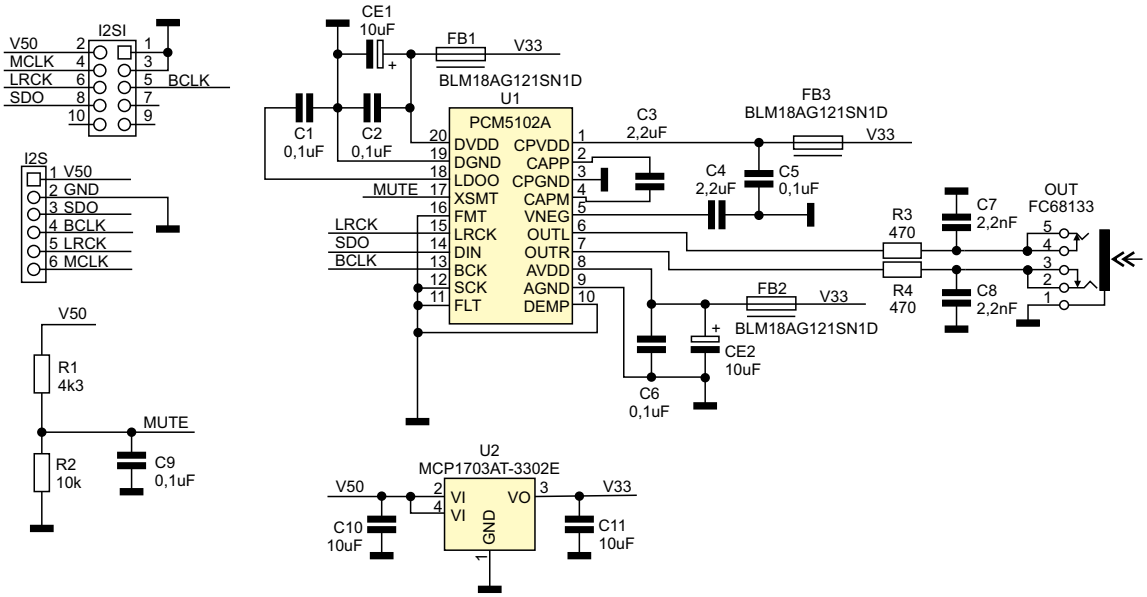
W przypadku braku dostępności na stronie sklepu osoby zainteresowane zakupem płytek drukowanych (PCB) prosimy o kontakt via e-mail: **kity@avt.pl**

Minimoduły cyfrowego audio – przetworniki A/D i D/A (2)

W poprzednim odcinku zaprezentowaliśmy dwa minimoduły przetworników analogowo-cyfrowych. Tym razem prezentujemy kolejne trzy płytki: DA_PCM5100 i DA_TAD5142 (z przetwornikami D/A) oraz CODEC_TAC5142 (zintegrowany układ z przetwornikami A/D i D/A).

DA_PCM5100: przetwornik D/A

Schemat układu pokazano na **rysunku 5**. Przetwornik D/A, w postaci układu U1 typu PCM5100 (lub zgodnego z nim PCM5101/2, różniącego się wartością SN odpowiednio: >100 dB, 106 dB, 112 dB i oczywiście ceną), integruje w sobie kompletny przetwornik audio 192 kHz/24 bit z buforem wyjściowym. Sygnał wejściowy ze złącza I²S lub I²SI, zgodnego z AudioDSP, doprowadzony jest do U1. Sygnał analogowy, po filtracji za pomocą sieci R3, R4, C7, C8, dostępny jest na złączu OUT (mini Jack stereo 3,5 mm). Ze względu na wbudowaną pompę ładunkową (obwód C3, C4, C5, FB3), przy pojedynczym zasilaniu 3,3 V, możliwe jest uzyskanie 2 Vrms amplitudy wyjściowej. Stabilizator LDO U2 typu MCP1703 zapewnia zasilanie układu.



Rysunek 5. Schemat ideowy płytki przetwornika DA_PCM5100

eprasa.pl ef7662c802

Wykaz elementów:

DAC_PCM5100A
Rezystory: (SMD 0603, 1%)
R1: 4,3 kΩ
R2: 10 kΩ
R3, R4: 470 Ω

Kondensatory: (X7R, 10 V)
C1, C2, C5, C6, C9: 100 nF (SMD 0603, X7R, 10 V)
C3, C4: 2,2 µF (SMD 0603, X7R, 10 V)
C7, C8: 2,2 nF (SMD 0603, NP0, 16 V)
C10, C11: 10 µF (SMD 0603, X7R, 10 V)
CE1, CE2: tantalowy 10 µF (SMD A, 3216, 10 V)

Półprzewodniki:
U1: PCM5102A (SSOP20)
U2: MCP1703AT-3302E (SOT-89)

Pozostałe:
FB1...FB3: dławik ferrytowy SMD 0603 (typ BLM18AG121SN1D)
I²S: złącze SIP 1 × 6 pin., kątowe 2,54 mm
I²SI: gniazdo 2 × 5 pin., kątowe 2,54 mm (typ ZL263-10DG)
OUT: złącze Jack 3,5 mm stereo (typ FC68133)

DAC_TAD5142
Rezystory:
R1: 22 kΩ (SMD 0603, 1%)
RP1: drabinka 4 × 330 Ω (CRA06S08)

Kondensatory: (X7R, 10 V)
C1, C2: 1 µF (SMD 0603, X7R, 10 V)
C3, C5: 100 nF (SMD 0603, X7R, 10 V)
C4, C6...C8: 10 µF (SMD 0603, X7R, 10 V)
CE1...CE3: tantalowy 10 µF (SMD A, 3216, 10 V)

Półprzewodniki:
U1: TAD5124IRGER (VQFN24_050RGE)
U2: MCP1703AT-3302E (SOT-89)

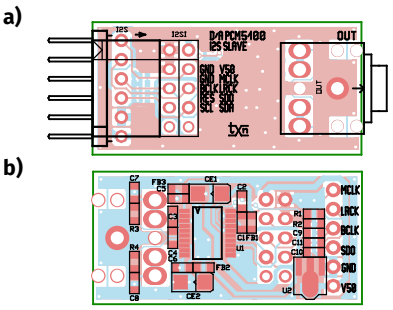
Pozostałe:
FB1: dławik ferrytowy SMD 0603 (typ BLM18AG121SN1D)
I²S: złącze SIP 1 × 6 pin., kątowe 2,54 mm
I²SI: gniazdo 2 × 5 pin., kątowe 2,54 mm (typ ZL263-10DG)
OUT: złącze Jack 3,5 mm stereo (typ FC68133)
OUT1, OUT2: złącze SIP 1 × 3 pin., proste 2,54 mm
SD: złącze SIP 1 × 2 pin., proste 2,54 mm

CODEC_TAC5142
Rezystory:
R1, R2: 100 Ω (SMD 0603, 1%)

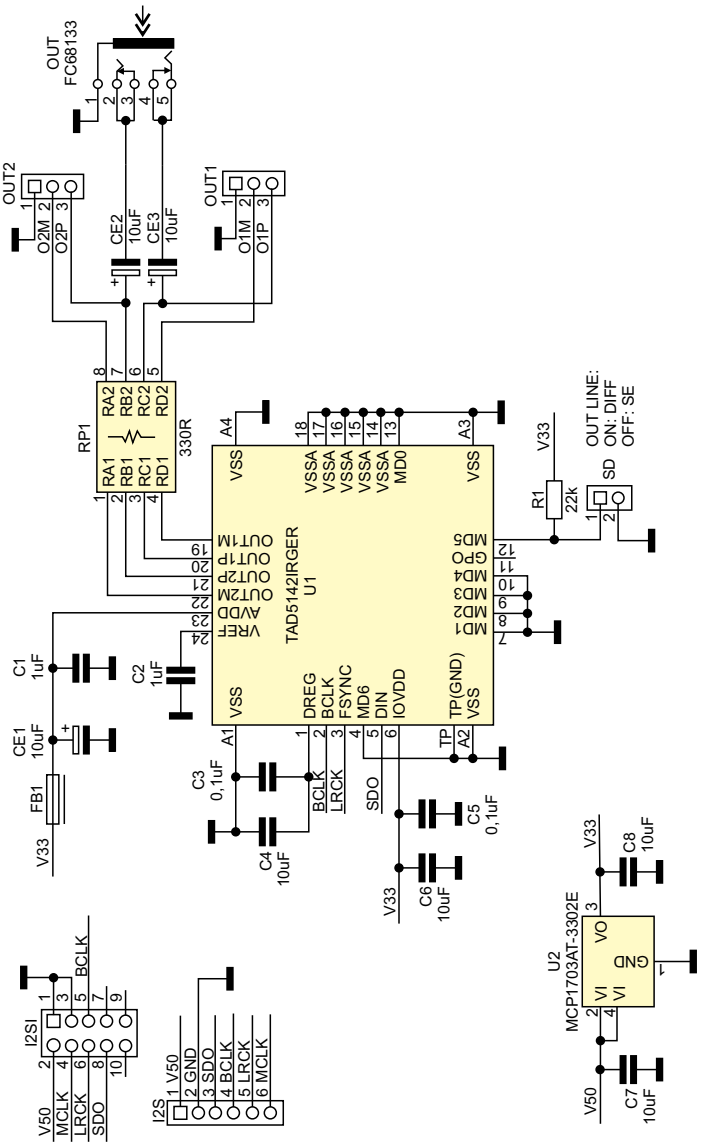
Kondensatory: (X7R, 10 V)
C1, C2, C9: 1 µF (SMD 0603, X7R, 10 V)
C3, C5: 100 nF (SMD 0603, X7R, 10 V)
C4, C6...C8: 10 µF (SMD 0603, X7R, 10 V)
C10...C13: 4,7 µF (SMD 0805, X7R, 16 V)
CE1...CE3: tantalowy 10 µF (SMD A, 3216, 10 V)

Półprzewodniki:
U1: TAC5142IRGER (VQFN24_050RGE)
U2: MCP1703AT-3302E (SOT-89)

Pozostałe:
FB1: dławik ferrytowy SMD 0603 (typ BLM18AG121SN1D)
I²S: złącze SIP 1 × 4 pin., kątowe 2,54 mm
I²SI: gniazdo 2 × 5 pin., kątowe 2,54 mm (typ ZL263-10DG)
IN, OUT: złącze śrubowe MPT 2,54 mm (MPT0.5/3-2.54)



Rysunek 6. Schemat montażowy płytki przetwornika DA_PCM5100 (a – strona TOP, b – strona BOTTOM)



Rysunek 7. Schemat ideowy płytki przetwornika DA_TAD5142

Przetwornik U1 pracuje w trybie slave I²S. Oprócz sygnałów I²S nie wymaga doprowadzenia sygnału zegarowego MCLK, gdyż generowany jest on wbudowanym PLL z sygnału BCLK, co znacząco upraszcza aplikację. Standard napięciowy I²S to 3,3 V. Elementy R1, R2, C9 współpracują z wewnętrznym układem wyciszania wyjścia MUTE podczas załączania i wyłączania układu.

Schemat montażowy modułu pokazano na **rysunku 6**.

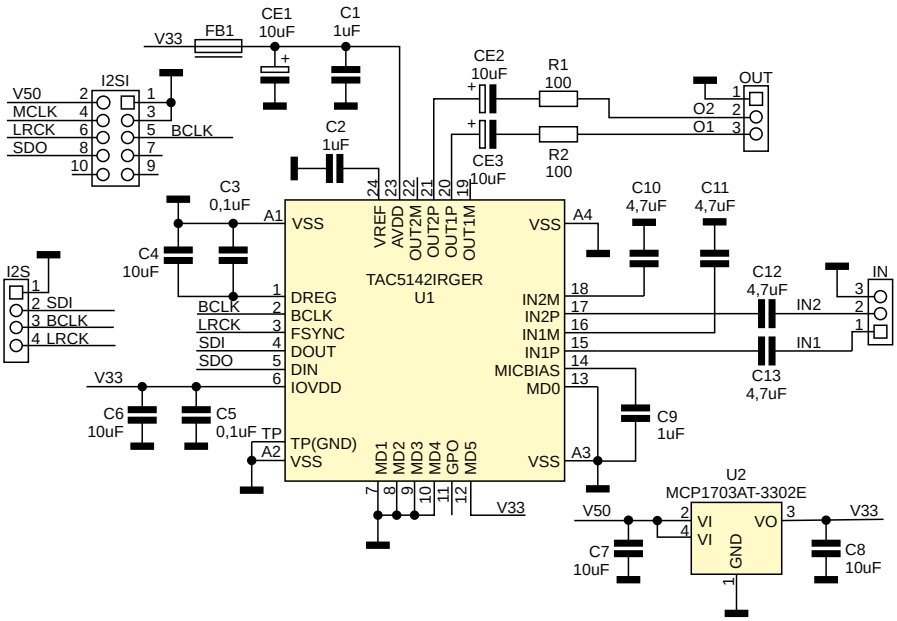
Rysunek 8. Schemat montażowy płytki przetwornika DA_TAD5142 (a – strona TOP, b – strona BOTTOM)

DA_TAD5142: przetwornik D/A

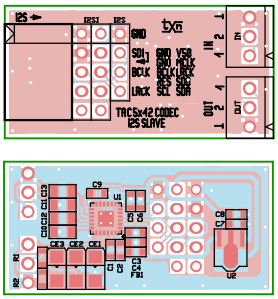
Schemat układu pokazano na **rysunku 7**. Przetwornik D/A bazuje na układzie U1 typu TAD5142, integrującym w sobie kompletny przetwornik audio 192 kHz/24 bit. (SN > 107 dB) z buforem wyjściowym. Sygnał wejściowy ze złącza I²S lub I²SI (zgodnego z AudioDSP) doprowadzony jest do U1. Przetwornik ma różnicowe wyjścia audio, z możliwością zmiany konfiguracji buforów wyjściowych. W modelu wykorzystano tryb różnicowy, w którym sygnały kanałów dostępne są na złączach OUT1, OUT2 – w tym przypadku zwora SD musi być założona. Drugim trybem pracy jest tryb unipolarny, w którym sygnał wyjściowy, po dodatkowej separacji (CE2, CE3), dostępny jest na złączu OUT – zwora SD musi być zdjęta. Stabilizator LDO U2 typu MCP1703 zapewnia zasilanie układu. Przetwornik U1 pracuje w trybie slave I²S (standard napięciowy 3,3 V).

Schemat montażowy modułu pokazano na **rysunku 8**.

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 9. Schemat ideowy płytki CODEC_TAC5142



Rysunek 10. Schemat montażowy płytki CODEC_TAC5142 (a – strona TOP, b – strona BOTTOM)

CODEC_TAC5142: zintegrowany kodek z przetwornikami A/D i D/A

Schemat układu pokazano na **rysunku 9**. Płytka opiera się na układzie U1 typu TAC5142, integrującym w sobie kompletne przetworniki audio A/D i D/A 192 kHz/24 bit. (SN >100 dB) z buforem wyjściowym, o cechach poprzednio opisanych układów TAA/TAD. W niektórych przypadkach zastosowanie kodeka pozwala zaoszczędzić kilka elementów i wyprowadzeń sygnałów sterujących (wspólne sygnały BCLK, LRCK).

Sygnał wejściowy ze złącza I²SI (standard 3,3 V) doprowadzony jest do przetwornika D/A układu U1. Przetwornik ma konfigurowalne, różnicowe wyjścia audio, w modelu zastosowano je w trybie wyjść niesymetrycznych (z sygnałem wyprowadzonym na złącze OUT, 1 Vrms). Sygnał wejściowy do przetwornika A/D doprowadzony jest natomiast do złącza IN – jego wejścia także mogą pracować w trybie różnicowym, w modelu zastosowano jednak tryb niesymetryczny. Sygnał I²S z danymi SDI z przetwornika A/D dostępny jest na dodatkowym złączu I²S. Stabilizator LDO U2 typu MCP1703 zapewnia zasilanie układu. Przetwornik U1 pracuje w trybie slave I²S (standard napięciowy 3,3 V).

Schemat montażowy modułu pokazano na **rysunku 10**.

Adam Tatuś, EP

AVT sklep

Najważniejsze parametry:
- moduł na bazie scalonego termometru PCT2075D,
- zgodność układu wyprowadzeń i kompatybilność programowa z termometrami z serii LM75x,
- dokładność: ±1°C przy 25°C,
- rozszerzona adresacja (do 27 układów na wspólnej szynie I²C),
- napięcie zasilania: 2,7...5,5 V,
- pobór prądu: 0,5 mA,
- wyjście termostatowe o obciążalności do 24 mA @ 5 V,
- wybór adresu za pomocą zworek lutowniczych.

Projekty pokrewne na stronie www.ep.com.pl
(aktywne linki do artykułów):
- Miniklawiatura z podświetlaniem
- Sterownik 12×LED z interfejsem I²C
- Multiplekser analogowy sterowany z magistrali I²C
- Minimoduł z transceiverem CAN
- Minimoduł precyzyjnego generatora częstotliwości zegarkowych
- Minimoduł z procesorem NXP LPC865
- Przedłużacz magistrali I²C

* **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

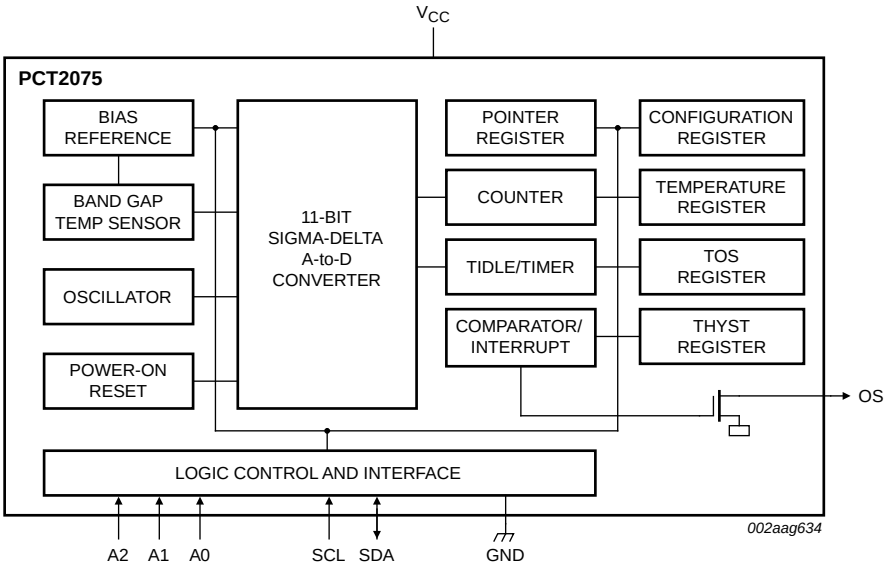
Cyfrowy termometr/termostat I²C zgodny z Grove

Prezentowany moduł oparty jest na cyfrowym termometrze I²C PCT2075D firmy NXP. Układ ten pracuje w zakresie temperatur od –25°C do 100°C, z dokładnością ±1°C przy 25°C i jest zgodny zarówno pod względem wyprowadzeń, jak i obsługi programowej, z serią przemysłowych termometrów LM75x. Cechą szczególną PCT2075D jest rozszerzona adresacja, umożliwiająca użycie nawet 27 układów na jednej magistrali I²C.

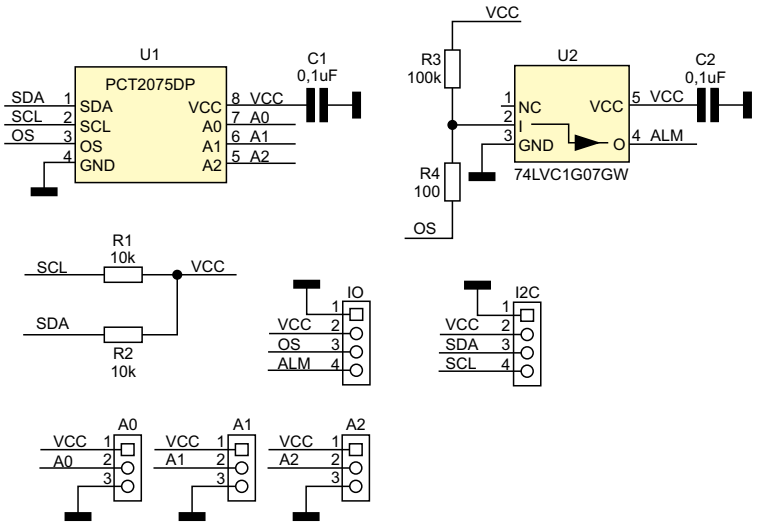
Budowa wewnętrzna PCT2075D została pokazana na **rysunku 1**, zaś schemat ideowy modułu – na **rysunku 2**.

Płytka zasilana jest napięciem 2,7...5,5 V poprzez złącze I²C, do którego doprowadzone są również linie sygnałowe magistrali I²C.

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 1. Struktura wewnętrzna PCT2075D (za notą NXP)



Rysunek 2. Schemat ideowy modułu

Układ U1 typu PCT2075D oprócz przetwarzania temperatury, oferuje funkcję termostatu z wyjściem OS, wyprowadzonym na złącze IO. Aby zapobiec podgrzewaniu struktury układu U1 prądem wyjściowym linii OS, co prowadziłoby do zmniejszenia dokładności pomiaru temperatury, płytkę wyposażono w dodatkowy bufor separujący U2, którego sygnał wyjściowy ALM również doprowadzono do złącza IO. Wyjście OS U1 (typu otwarty dren) podciągnięte jest do dodatniej szyny zasilania poprzez rezystor R3 i może zostać użyte do monitorowania stanu termostatu, np. przez procesor. Wyjście ALM służy natomiast do sterowania obciążeniem przez transoptor lub przekaźnik SSR, a jego obciążalność to 24 mA przy napięciu 5 V (maksymalny szczytowy prąd 50 mA). Zwory A0, A1, A2 służą do adresacji U1 zgodnie z **tabelą 1**. Kompatybilność z termometrami z serii LM75x zapewnia pierwsze 8 adresów w zakresie: 0x48...0x4F.

Termometr zmontowany jest na niewielkiej, dwustronnej płytce drukowanej, zgodnej formatem z Grove. Rozmieszczenie elementów pokazano na **rysunku 3**, a zmontowany moduł – na fotografii tytułowej. Montaż jest oczywisty i nie wymaga opisu.

Sprawdzenie działania modułu najprościej wykonać jest przy użyciu Arduino lub Raspberry Pi i dowolnej biblioteki obsługującej termometr LM75x. Moduł wymaga zasilania w zakresie 2,7...5,5 V, pobór prądu podczas pracy jest mniejszy niż 0,5 mA. Po konfiguracji adresacji zworami A2...A0 moduł jest gotowy do pracy.

Ze względu na zgodność z rodziną LM75x, płytka umożliwia montaż każdego kompatybilnego termometru w obudowie TSSOP8, np. LM75B, SE95DP, TCN75A czy TMP1075D.

Adam Tatuś, EP

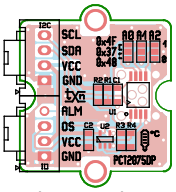
Wykaz elementów:

Rezystory: (SMD 0603, 5%)
R1, R2: 10 kΩ
R3: 100 kΩ
R4: 100 Ω

Kondensatory:
C1, C2: 100 nF (SMD 0603, X7R, 10 V)

Półprzewodniki:
U1: PCT2075DP (TSSOP8_065)
U2: 74LVC1G07GW (TSSOP5)

Pozostałe:
IO, I²C: złącze Grove (4 pin, proste)



Rysunek 3. Rozmieszczenie elementów

Tabela 1. Adresacja układu DP2075D

A2	A1	A0	Adres I²C	hex
0	0	0	1 001 000	48
0	0	1	1 001 001	49
0	1	0	1 001 010	4A
0	1	1	1 001 011	4B
1	0	0	1 001 100	4C
1	0	1	1 001 101	4D
1	1	0	1 001 110	4E
1	1	1	1 001 111	4F
Open	0	0	1 110 000	70
Open	0	Open	1 110 001	71
Open	0	1	1 110 010	72
Open	1	0	1 110 011	73
Open	1	Open	1 110 100	74
Open	1	1	1 110 101	75
Open	Open	0	1 110 110	76
Open	Open	1	1 110 111	77
0	Open	0	101 000	28
0	Open	1	101 001	29
1	Open	0	101 010	2A
1	Open	1	101 011	2B
0	0	Open	101 100	2C
0	1	Open	101 101	2D
1	0	Open	101 110	2E
1	1	Open	101 111	2F
0	Open	Open	110 101	35
1	Open	Open	110 110	36
Open	Open	Open	110 111	37

REKLAMA

pl.linkedin.com/company/elektronika-praktyczna

eprasa.pl ef7662c802

AVT sklep

Najważniejsze parametry:
- moduł translatora poziomów logicznych zgodny z Grove,
- konwersja napięć 3,3 V – 5 V,
- wbudowane rezystory podciągające.

Projekty pokrewne na stronie www.ep.com.pl
(aktywne linki do artykułów):
- Minimoduł z mikroprocesorem LPC802
- Expander wyjść z interfejsem I²C

* **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.

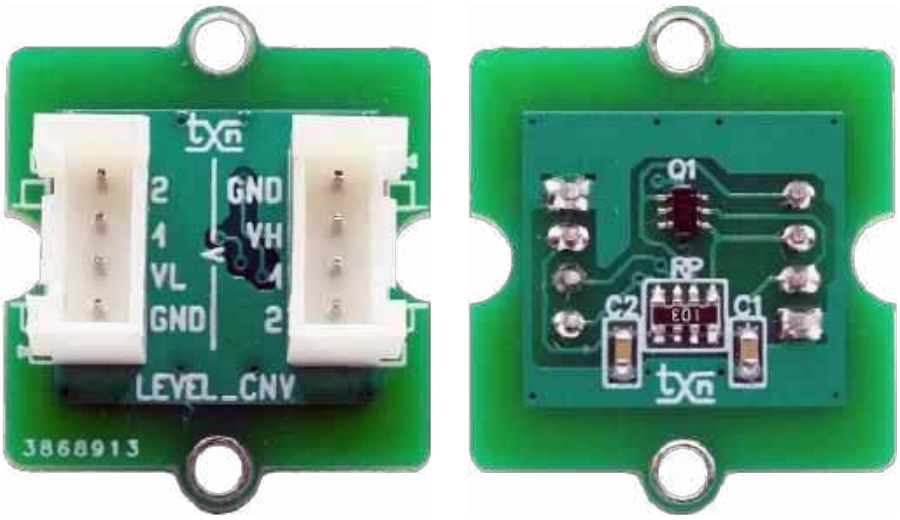
Kity, w których występuje układ scalony wymagający zaprogramowania, mają następujące dodatkowe wersje:
- **wersja [A+]** – płytka drukowana **[A]** + zaprogramowany układ **[UK]** i dokumentacja,
- **wersja [UK]** – zaprogramowany układ.

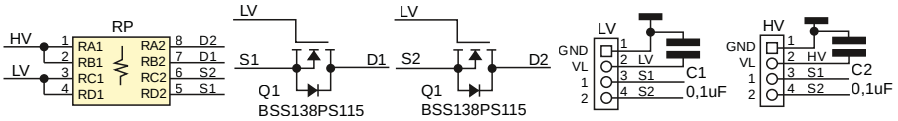
Nie każdy zestaw AVT występuje we wszystkich wersjach! Każda wersja ma załączony ten sam plik PDF! Podczas składania zamówienia upewnij się, którą wersję zamawiasz!
http://sklep.avt.pl

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

Translator poziomów I²C Grove

Translator poziomów I²C zawsze znajdzie zastosowanie w warsztacie DIY, chociażby do podłączenia nowoczesnych czujników (zgodnych z napięciem 3,3 V) do klasycznego Arduino lub układów 5-woltowych do Raspberry Pi.





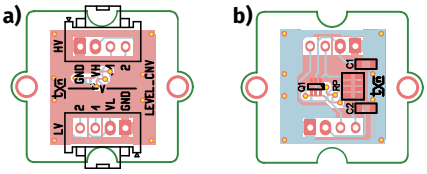
Rysunek 1. Schemat ideowy układu translatora

Schemat układu pokazano na **rysunku 1**. Aktywna część składa się z zaledwie dwóch elementów: podwójnego tranzystora Q1 typu BSS138 oraz drabinki rezystorowej RP. Kondensatory C1, C2 zapewniają dodatkowe odsprzęganie zasilania pomiędzy współpracującymi układami zewnętrznymi. Zasada działania została opisana w nocie aplikacyjnej AN10441 firmy NXP, dostępnej online.

Magistrala I²C (zgodna z logiką o napięciu 3,3 V), wraz z napięciem zasilania, doprowadzona jest do translatora poprzez złącze LV. Interfejs 5-woltowy jest dostępny na złączu HV.

Jeżeli sygnały SCL i SDA przyjmują wysoki stan logiczny, obie struktury tranzystora Q1 są zatkane, a rezystory znajdujące się wewnątrz sieci rezystorowej RP podciągają sygnały magistral do odpowiednich poziomów logicznych. Jeżeli sygnał ze strony interfejsu 3,3 V (LV) przyjmuje stan niski, odpowiedni tranzystor otwiera się i „ściąga" swoim drenem sygnał interfejsu 5 V (HV) do masy. W przypadku, gdy stan niski pojawi się po stronie 5 V (HV), wewnętrzna dioda tranzystora Q1 wymusza stan niski (~0,7 V) po stronie interfejsu 3,3 V (LV), zaś – po przekroczeniu napięcia progowego bramka-źródło tranzystora Q1 – zostaje skutecznie zwarta poprzez obwód dren-źródło. Pomimo nieskomplikowanej konstrukcji układ doskonale sprawdza się przy konwersji dwukierunkowej, bez potrzeby zapewnienia dodatkowego sygnału sterującego przepływem danych. Jedynym ograniczeniem jest dopuszczalna prędkość transmisji – układ poprawnie pracuje do ok. 400 kHz. W przypadku magistrali I²C w trybie High Speed lub pracy przy jeszcze wyższych częstotliwościach, należy zastosować bardziej „złożony" konwerter, oparty na specjalizowanych układach scalonych.

Moduł zmontowany jest na dwustronnej płytce drukowanej, mechanicznie i elektrycznie kompatybilnej ze standardem Grove. Rozmieszczenie elementów pokazano na **rysunku 2**. Montaż jest typowy i nie wymaga opisu, a sam układ nie wymaga wstępnej konfiguracji ani uruchamiania. Zmontowaną płytkę pokazano na fotografii tytułowej.



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

Wykaz elementów:

Rezystory:
RP: drabinka rezystorowa 4×10 kΩ (CRA06S08)

Kondensatory:
C1, C2: 100 nF (SMD 0603, X7R, 10 V)

Półprzewodniki:
Q1: BSS138PS115 (SC88)

Pozostałe:
LV, HV: złącze Grove (4 pin, proste)

Adam Tatuś, EP

REKLAMA

facebook.com/ElektronikaPraktyczna

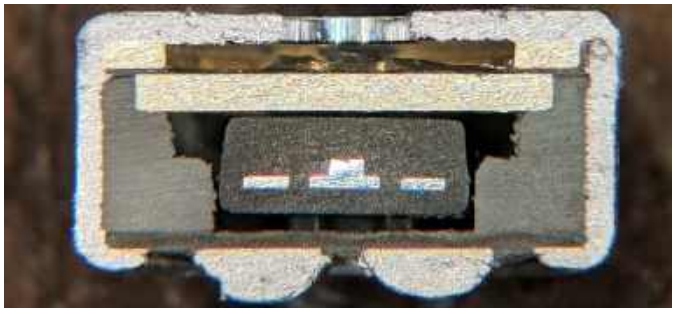
eprasa.pl ef7662c802

Przetworniki akustyczne okiem praktyka

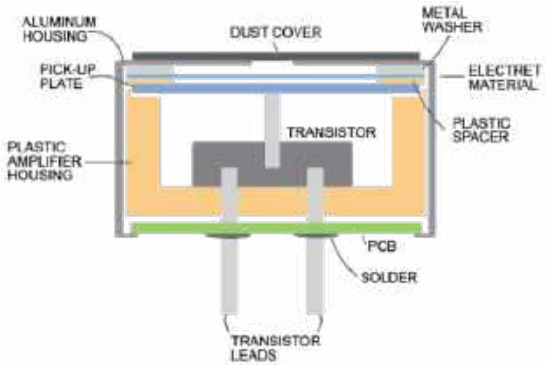
Przetworniki akustyczne stanowią bardzo zróżnicowaną grupę komponentów zamieniających falę dźwiękową na sygnał elektryczny lub odwrotnie. W praktyce konstruktorskiej spotykamy wiele typów takich przetworników, wyspecjalizowanych do różnych zadań: od rozmaitych mikrofonów, przez głośniki dynamiczne, aż po wyspecjalizowane czujniki ultradźwiękowe, hydrofony czy też przetworniki kostne. W artykule prezentujemy przegląd wybranych, współczesnych przetworników akustycznych wraz z opisem zasady ich działania, typowych parametrów oraz najważniejszych aspektów projektowych. Celowo pomijamy głośniki dynamiczne czy mikrofony, stosowane w profesjonalnych systemach audio – wykraczają one znacznie poza ramy niniejszego opracowania. Skupiamy się natomiast na elementach znacznie mniejszych, często niepozornych, choć we współczesnej elektronice obecnych dosłownie na każdym kroku. Opisujemy także kilka rodzajów mniej popularnych, ale niezwykle interesujących konstrukcji przetworników, które dopiero od stosunkowo niedawna budują swoją pozycję rynkową.

Mikrofony elektretowe

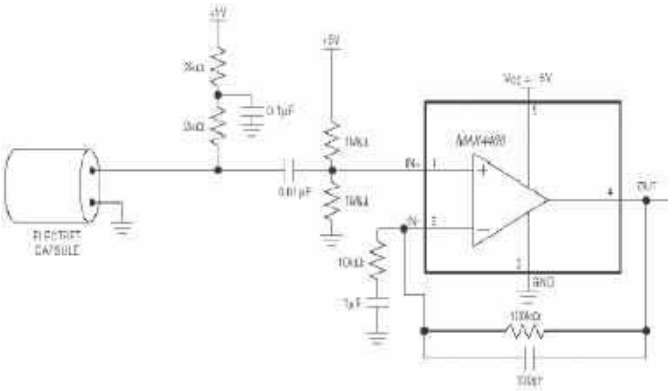
Klasyczny mikrofon elektretowy jest odmianą mikrofonu pojemnościowego, w którym, wewnątrz metalowej kapsuły, znajduje się naładowana elektrostatycznie płytka elektretowa oraz membrana (**fotografia 1**). Całość tworzy kondensator płaski, którego pojemność zmienia się pod wpływem drgań membrany. Zmiany te przekładają się natomiast bezpośrednio na generowanie sygnału napięciowego – pod tym względem mikrofony elektretowe różnią się od klasycznych konstrukcji pojemnościowych, w których brak stałego dipola (tworzonego przez elektret) wymuszał konieczność stosowania zewnętrznego napięcia polaryzującego, podanego wprost na membranę.



Fotografia 1. Przekrój klasycznego mikrofonu elektretowego (https://t.ly/sNAJg)



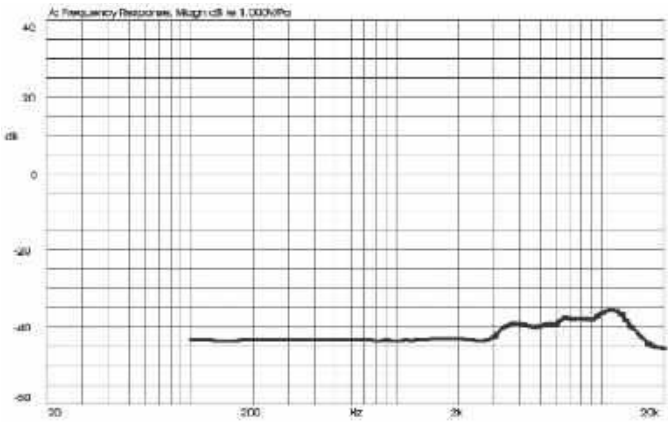
Rysunek 1. Budowa mikrofonu elektretowego (https://t.ly/Zs7Ez)



Rysunek 2. Typowy schemat aplikacyjny przedwzmacniacza do mikrofonu elektretowego (https://t.ly/VB8Jb)

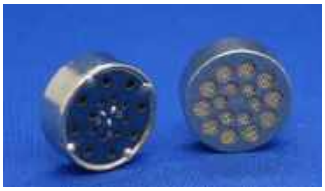
Ze względu na bardzo wysoką impedancję mikrofonów elektretowych, w ich konstrukcji powszechnie umieszcza się wewnętrzny tranzystor JFET, pełniący rolę prostego bufora (**rysunek 1**). Do poprawnej pracy i tak jest zatem wymagana polaryzacja przy użyciu zewnętrznego napięcia stałego – sygnał generowany przez układ membrany nie jest bowiem bezpośrednio dostępny na wyjściu, ale trafia wprost na bramkę tranzystora. W praktyce trzeba zatem podciągnąć „gorące" wyprowadzenie mikrofonu do dodatniej szyny zasilania za pomocą rezystora o wartości (najczęściej) rzędu kilku... kilkunastu kΩ. Obecność wewnętrznego bufora mimo wszystko znacznie upraszcza implementację przedwzmacniaczy współpracujących z popularnymi elektretami (**rysunek 2**), pozwala także na łatwe stosowanie tego typu przetworników w przewodowych zestawach słuchawkowych, w których mikrofon znajduje się na końcu dość długiego przewodu łączącego go z wejściem mikrofonowym (np. komputera).

Mikrofony elektretowe rozpowszechniły się dzięki niskiej cenie, małym wymiarom i łatwości aplikacji – przez lata były standardem m.in. w akcesoriach komputerowych, dyktafonach, starszych generacjach telefonów komórkowych, a także domofonach, telefonach stacjonarnych, zabawkach i wielu innych. Typowe, miniaturowe kapsuły elektretowe mają średnicę od ok. 4 mm do 9...10 mm i wysokość rzędu kilku milimetrów. W większości przypadków metalowa obudowa jest wyposażona w fabrycznie naklejony, cienki filtr



Rysunek 3. Charakterystyka częstotliwościowa mikrofonu elektretowego typu CMC-5044TF-A (https://t.ly/D0rzh)

eprasa.pl ef7662c802



Fotografia 2. Kapsuła mikrofonowa typu JLI-2590A o charakterystyce kardioidalnej (https://t.ly/70Jp2)

Fotografia 3. Kapsuła mikrofonowa typu JLI-1660NB-38 o charakterystyce dwukierunkowej (https://t.ly/NNBd6)

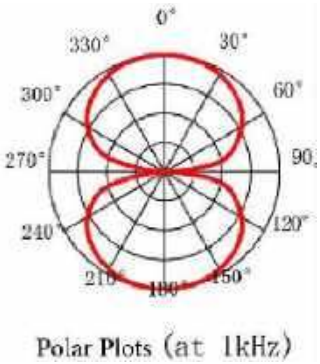
przeciwpyłowy, zabezpieczający delikatną membranę przed gromadzeniem zanieczyszczeń wewnątrz komory akustycznej.

Mikrofony elektretowe wymagają polaryzacji napięciem stałym, zwykle od 1,5...2 V do 10 V i pobierają niewielki prąd (około 0,5 mA). Czułość nominalna mieści się zwykle w przedziale –56...–36 dBV (0 dB odpowiada czułości 1 V/Pa), a pasmo przenoszenia od rozciąga się od około 50...100 Hz do 16...20 kHz, przy czym ograniczenie pasma od dołu wynika w dużej mierze z niewielkich wymiarów całości. Wewnętrzny tranzystor JFET zapewnia impedancję wyjściową rzędu pojedynczych kΩ.

Podczas implementacji układu z mikrofonem elektretowym należy zwrócić uwagę na prawidłowe polaryzowanie i filtrację zasilania. Typowy układ pracy, oprócz rezystora podciągającego, wymaga także kondensatora sprzęgającego sygnał z wejściem przedwzmacniacza. Pojemność kondensatora należy dobrać w zależności od spodziewanej impedancji wejściowej następnego stopnia, tak aby utworzyć filtr górnoprzepustowy o częstotliwości poniżej pasma akustycznego. Dobierając elementy sprzężenia zmiennoprądowego warto też pamiętać o ograniczeniach charakterystyki samego mikrofonu. Przykładowy wykres, zaczerpnięty z noty katalogowej kapsuły CMC-5044TF-A, można zobaczyć na **rysunku 3**.

Warto dodać, że poszczególne modele mikrofonów elektretowych różnią się nie tylko wymiarami, pasmem przenoszenia czy czułością, ale także – i to w znacznym stopniu – charakterystyką kierunkową. O ile większość typowych kapsuł miniaturowych wykazuje charakterystykę wielokierunkową lub kardioidalną (przykład na **fotografii 2**), to niektóre modele – za sprawą odpowiednich otworów po obydwu stronach obudowy – mogą oferować diametralnie inną kierunkowość. Dość rzadko spotykane (ale wciąż dostępne na rynku) są mikrofony dwukierunkowe – przykładowy model tego typu o oznaczeniu JLI-1660NB-38 można zobaczyć na **fotografii 3**, zaś jego charakterystykę – na **rysunku 4**.

Mikrofony elektretowe, choć proste w użyciu, są dość wrażliwe na zakłócenia elektromagnetyczne – wewnętrzny tranzystor pracuje z dość dużą impedancją wejściową, co sprzyja zbieraniu szumów RF. Dlatego obudowy mikrofonów są metalowe i zwykle łączone z masą w celu ekranowania. Projektując układ z przetwornikiem elektretowym warto unikać prowadzenia w pobliżu niego szybkich sygnałów cyfrowych, które mogłyby indukować zakłócenia w torze audio. Ponieważ parametry elektretu mogą nieco zależeć od temperatury i starzenia (ładunek na dielektryku może z czasem ulegać częściowemu rozładowaniu), w zastosowaniach wymagających długoterminowej stabilności oraz w skrajnych warunkach środowiskowych coraz częściej zastępuje się je nowoczesnymi mikrofonami MEMS.



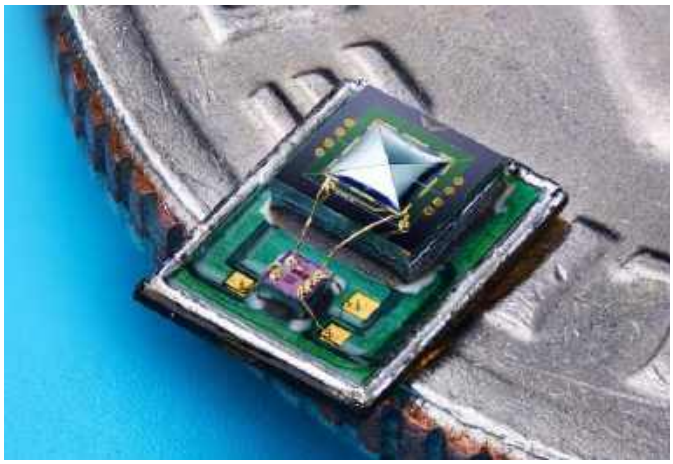
Rysunek 4. Dwukierunkowa charakterystyka mikrofonu typu JLI-1660NB-38 (https://t.ly/NNBd6)

Mikrofony MEMS

Mikrofony MEMS (ang. *Micro-Electro-Mechanical Systems*) to najnowsza generacja mikrofonów półprzewodnikowych, które w miniaturowej, niskoprofilowej obudowie integrują precyzyjny element akustyczny oraz układ elektroniczny ASIC, odpowiedzialny za wstępną obróbkę sygnału. Istnieją trzy główne odmiany mikrofonów MEMS. Znaczna część modeli bazuje – podobnie jak elektrety – na zasadzie kondensatora o zmiennej pojemności (ugięcie mikromembrany względem perforowanej płytki stałej). W odróżnieniu od przetworników elektretowych, mikrofony MEMS nie mają jednak wbudowanego na stałe ładunku w materiale membrany – wymagają zatem polaryzacji, dokładnie tak jak klasyczne mikrofony pojemnościowe. Polaryzację tę realizuje się wewnętrznie, tj. w układzie ASIC towarzyszącym czujnikowi. ASIC ten zawiera też przedwzmacniacz sygnału, a w przypadku mikrofonów cyfrowych – także przetwornik analogowo-cyfrowy. Oprócz mikrofonów pojemnościowych można także spotkać się z konstrukcjami bazującymi na materiałach piezoelekrycznych lub piezorezystancyjnych. Co ciekawe, pomimo początkowego sukcesu, jaki odniosły konstrukcje pojemnościowe, w literaturze specjalistycznej coraz częściej można znaleźć wzmianki o rosnącym udziale mikrofonów MEMS bazujących na materiałach piezoelektrycznych – autorzy podkreślają nawet, że z czasem takie właśnie układy w dużej mierze zastąpią (lub wręcz wyprą z rynku) mikrofony pojemnościowe, a to z uwagi na pewne unikalne właściwości (w tym m.in. prostszy proces produkcyjny).

Mikrofony MEMS są wykonywane w technice krzemowej, co zapewnia doskonałą powtarzalność parametrów oraz możliwość daleko idącej miniaturyzacji. Konstrukcja mikrofonów MEMS stanowi w istocie strukturę hybrydową – układ ASIC jest montowany tuż obok właściwego przetwornika i łączony z nim techniką bondingu (**fotografia 4**). Pomimo dość złożonej konstrukcji i konieczności umieszczenia komory akustycznej wewnątrz obudowy, typowe wymiary tego rodzaju elementów są naprawdę niewielkie – zwykle poziome boki obudowy mają długość ok. 2...4 mm, a wysokość całkowita najczęściej nie przekracza 1 mm. Dostępne są wersje z portem akustycznym od góry lub od dołu, co ułatwia montaż w różnych produktach (np. mikrofon z portem od góry można zamontować pod otworem w obudowie urządzenia, a z portem od dołu – na płytce drukowanej tak, by otwór akustyczny prowadził na zewnątrz przez otwór w PCB). Mikrofony MEMS mogą być zasilane niskim napięciem w zakresie 1,5...3,3 V i oferują bardzo mały pobór mocy – typowo 0,1...0,3 mA w trybie aktywnym (niektóre mają ponadto tryb „czuwania", w którym pobór spada do kilku...kilkudziesięciu μA).

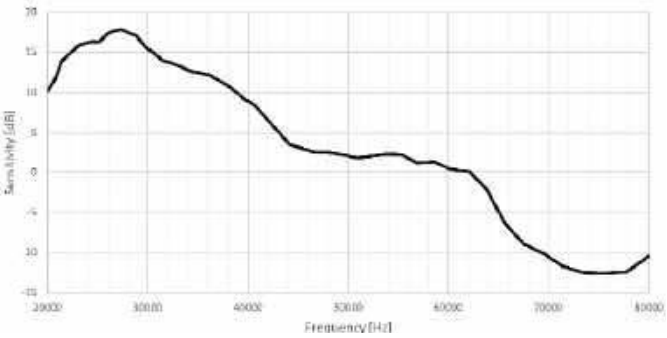
Czułość analogowa mikrofonów MEMS jest przeważnie porównywalna z kapsułami elektretowymi (np. –38 dBV w przypadku modelu IM70A135V01). W odniesieniu do mikrofonów cyfrowych



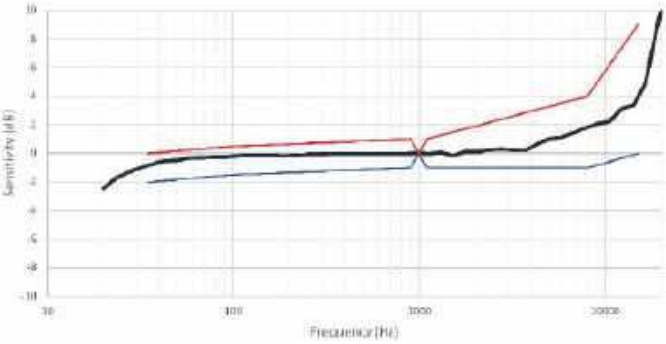
Fotografia 4. Budowa wewnętrzna typowego mikrofonu MEMS (https://t.ly/ZXhse)

eprasa.pl ef7662c802

Fotografia 5. Widok mikrofonu cyfrowego IMP23ABSU (https://t.ly/cor4K)



Rysunek 5. Charakterystyka amplitudowa mikrofonu IMP23ABSU w paśmie ultradźwiękowym (https://t.ly/cor4K)



Rysunek 6. Charakterystyka amplitudowa mikrofonu IMP23ABSU w paśmie słyszalnym (https://t.ly/cor4K)

podawanie czułości w tej samej jednostce nie miałoby natomiast większego sensu – dlatego też w notach katalogowych cyfrowych układów MEMS analogiczny parametr jest wyrażany w odniesieniu do pełnej skali, czyli w dBFS. Typowa wartość, spotykana najczęściej w notach katalogowych mikrofonów różnych producentów, to około –26 dBFS.

Co ciekawe, niektóre modele mikrofonów MEMS doskonale radzą sobie z rejestracją nie tylko fal dźwiękowych w zakresie słyszalnym dla człowieka (tj. do 20 kHz), ale także ultradźwięków. Jako przykład może posłużyć mikrofon IMP23ABSU (**fotografia 5**) marki ST Microelectronics, który – dzięki odpowiednio zoptymalizowanej strukturze pojemnościowej – jest w stanie odbierać drgania nawet do 80 kHz (**rysunek 5**), a przy tym oferuje niezwykle płaską charakterystykę w paśmie słyszalnym (**rysunek 6**).

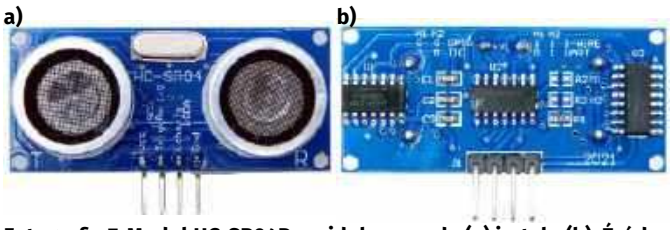
Ze względu na bardzo łatwą implementację (niskie napięcie zasilania, prosty interfejs cyfrowy lub analogowy, mały pobór mocy oraz dobre parametry akustyczne) mikrofony MEMS praktycznie wyparły popularne do niedawna elektrety z rynku urządzeń mobilnych i pozostałej elektroniki konsumenckiej. Znajdziemy je obecnie

Fotografia 6. Kamera akustyczna FOTRIC TD2 oparta na 64 cyfrowych mikrofonach MEMS (https://t.ly/yIxR0)

w smartfonach, tabletach, laptopach, zestawach AR/VR, inteligentnych głośnikach i asystentach głosowych, aparatach słuchowych, a nawet w profesjonalnych rejestratorach pola dźwiękowego (gdzie potrzebna jest miniaturyzacja wieloelementowych macierzy mikrofonowych). Krzemowa technologia otwiera też drogę do niestandardowych zastosowań – np. wspomnianych już mikrofonów ultradźwiękowych MEMS czy mikrofonów kierunkowych opartych na interferencji sygnałów z wielu czujników MEMS, umieszczonych we wspólnej obudowie. Ciekawymi urządzeniami, które można już bez problemu kupić na potrzeby zastosowań przemysłowych, są kamery akustyczne – przykładowo kamera FOTRIC TD2 zawiera macierz złożoną z 64 cyfrowych mikrofonów MEMS, które umożliwiają precyzyjną lokalizację źródła hałasu (np. spowodowanego nieszczelnością rurociągu czy uszkodzeniem łożyska maszyny) na drodze analizy amplitudowo-fazowej zapisów zbieranych z sensorów (**fotografia 6**).

Przetworniki ultradźwiękowe (nadajniki i odbiorniki)

Przetworniki ultradźwiękowe to wyspecjalizowane elementy emitujące lub odbierające fale akustyczne o częstotliwościach powyżej pasma słyszalności, czyli >20 kHz. Powszechnie spotykane są niedrogie, ultradźwiękowe moduły dalmierzowe pracujące zwykle na częstotliwości około 40 kHz – przykładem ich zastosowania, bodaj najbardziej rozpowszechnionym, jest moduł HC-SR04 (**fotografia 7**), zawierający parę przetworników (nadajnik i odbiornik), dostrojonych do tej samej częstotliwości rezonansowej. Elementem czynnym takiego przetwornika jest zwykle piezoceramiczna płytka współpracująca z metalową membraną i dostrojona do danej częstotliwości roboczej.



Fotografia 7. Moduł HC-SR04P – widok z przodu (a) i z tyłu (b). Źródło: https://t.ly/meHS9

eprasa.pl ef7662c802

Fotografia 8. Tani nadajnik ultradźwiękowy z widocznym oznaczeniem (https://t.ly/7esIF)

Fotografia 9. Przetwornik ultradźwiękowy o szczelności IP67 (https://t.ly/cA8L-)

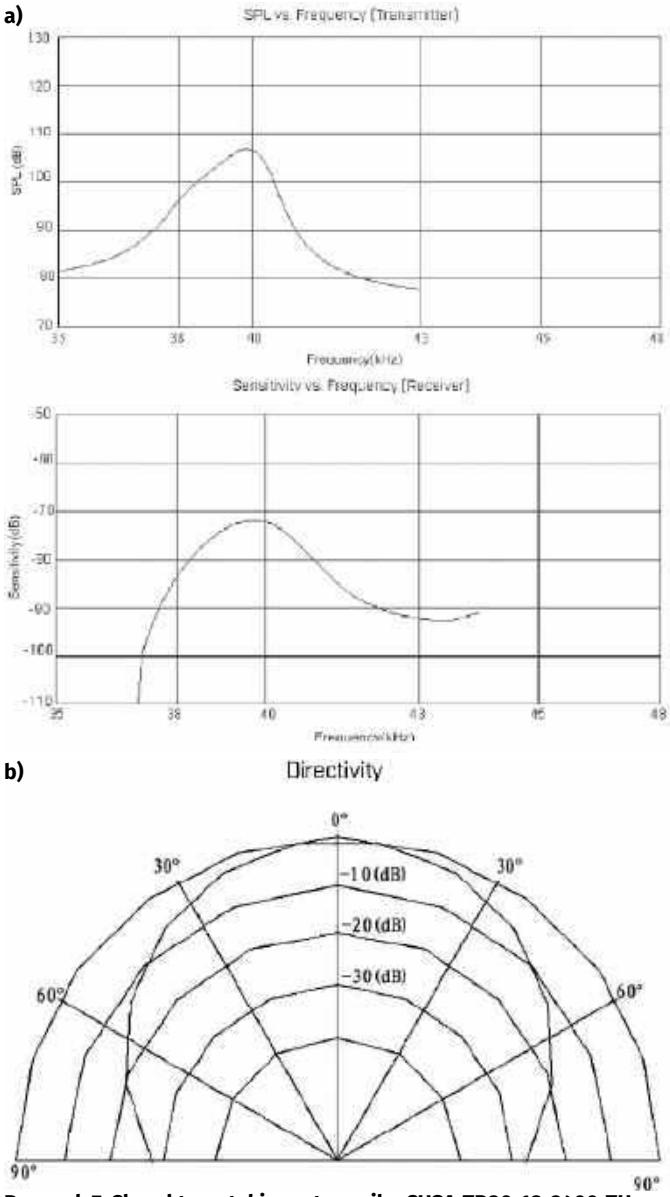
Typowy nadajnik ultradźwiękowy (oznaczany np. literą „T" nadrukowaną lub w inny sposób naniesioną na obudowę przetwornika – **fotografia 8**) zbudowany jest tak, by emitować możliwie silny sygnał akustyczny na zadanej częstotliwości rezonansowej. Odbiornik („R") jest natomiast zoptymalizowany pod względem maksymalnej czułości. Tego rodzaju pary komponentów są produkowane w obudowach otwartych, tj. zabezpieczonych (od strony membrany) jedynie drobną siatką metalową lub klatką z tworzywa sztucznego i szeroko stosowane w dalmierzach pracujących w powietrzu, w warunkach relatywnie czystego otoczenia. Znacznie droższe są specjalistyczne przetworniki o wysokim stopniu szczelności (nawet IP67), stosowane w bardziej wymagających warunkach przemysłowych – patrz **fotografia 9**. Pewnym kompromisem mogą być czujniki przeznaczone do samochodowych systemów parkowania (**fotografia 10**) – te są stosunkowo tanie (ze względu na powszechność tego typu rozwiązań), a zarazem szczelnie zabezpieczone przed wilgocią i pyłem, co jest rzecz jasna absolutnie konieczne z uwagi na pracę tuż nad jezdnią, w różnych warunkach pogodowych. Z oczywistych przyczyn przetworniki do zastosowań samochodowych, sprzedawane w zestawach do samodzielnego montażu, są produkowane w dość szerokiej gamie kolorystycznej (**fotografia 11**), ułatwiającej dobór odpowiedniego czujnika do koloru karoserii.

Fotografia 12. Otwarty transceiver ultradźwiękowy CUSA-TR80-18-2400-TH marki Same Sky (https://t.ly/i3Fy1)

Przetworniki stosowane w czujnikach parkowania mają, w odróżnieniu od opisanych wcześniej prostych nadajników i odbiorników,

Fotografia 10. Tanie, ultradźwiękowe czujniki parkowania oraz ich charakterystyki (https://t.ly/11C8t)

Fotografia 11. Różne wersje kolorystyczne czujników parkowania (https://t.ly/11C8t)



Rysunek 7. Charakterystyki przetwornika CUSA-TR80-18-2400-TH: częstotliwościowe (a) oraz kierunkowa (b). Źródło: https://t.ly/i3Fy1

eprasa.pl ef7662c802

Fotografia 13. Badanie nieniszczące z użyciem przetwornika ultradźwiękowego przyłożonego bezpośrednio do testowanego obiektu (https://t.ly/QZxSG)

konstrukcję „dwukierunkową", tj. pełnią funkcję zarówno nadajnika, jak i odbiornika sygnałów. Na rynku można znaleźć także konstrukcje otwarte, które również obsługują nadawanie i odbiór, ale nie są dokładnie zabezpieczone przed wpływem środowiska – przykładowy model CUSA-TR80-18-2400-TH marki Same Sky można zobaczyć na **fotografii 12**, a charakterystyki częstotliwościowe i kierunkowe tegoż komponentu – na **rysunku 7**.

Fotografia 14. Niewielkie urządzenie dopplerowskie do badań przepływów naczyniowych (https://t.ly/JV2W2)

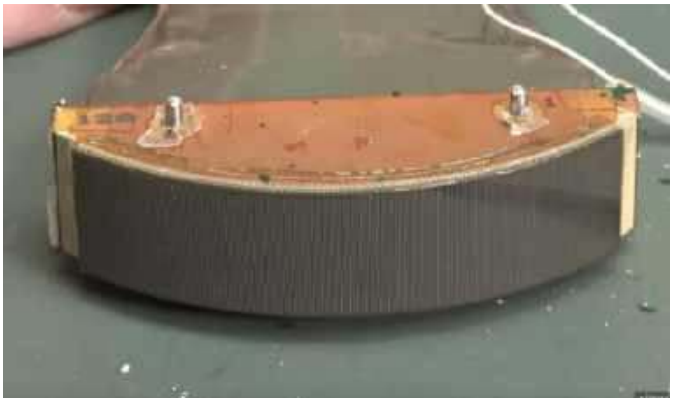
Fotografia 15. Dopplerowski detektor tętna płodu do użytku domowego (https://t.ly/oq05x)

Fotografia 16. Wnętrze głowicy dopplerowskiej współpracującej z detektorem tętna płodu. Widoczny podwójny przetwornik ultradźwiękowy (nadajnik i odbiornik) w postaci płaskiej płytki piezoceramicznej (https://t.ly/6K7Jt)

Wszystkie opisane do tej pory rodzaje przetworników są stosowane wyłącznie w otwartym powietrzu. Ogromna liczba zastosowań ultradźwięków, zwłaszcza w przemyśle i medycynie, opiera się jednak na bezpośredniej transmisji drgań. Jako przykład można wymienić chociażby nieniszczące badania materiałowe, powszechnie używane do detekcji pęknięć w konstrukcjach metalowych czy rurociągach (**fotografia 13**).

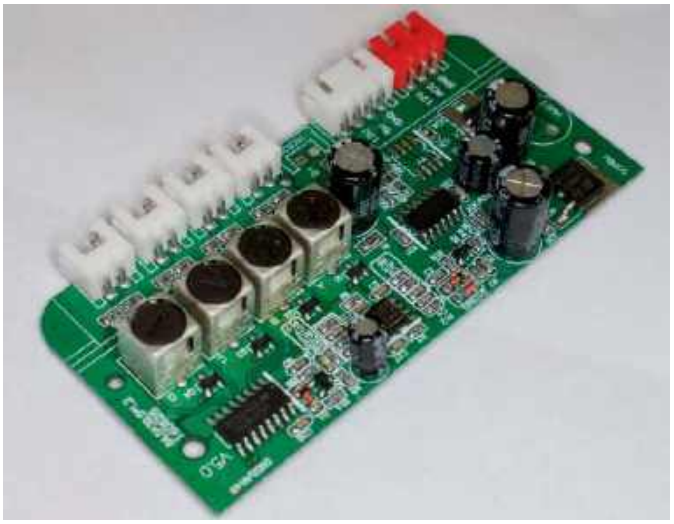
Innym przykładem jest diagnostyka medyczna, w której proste przetworniki ultradźwiękowe są stosowane do wykonywania procedur dopplerowskich – i to zarówno w obszarze angiologii (do badania przepływów w dużych naczyniach – **fotografia 14**), jak i do wykrywania tętna płodu (**fotografie 15** i **16**). Wyspecjalizowane macierze mikroskopijnych, gęsto upakowanych przetworników są natomiast podstawą budowy głowic ultrasonograficznych (**fotografia 17**). W tych aplikacjach konieczne jest zapewnienie odpowiedniego kontaktu głowicy pomiarowej z badanym obiektem, tj. zmniejszenie impedancji akustycznej na granicach ośrodków (głowica-powietrze-skóra) – z tego właśnie względu jakiekolwiek próby wykonania badań bez użycia odpowiedniej ilości żelu kończą się fiaskiem.

Projektując układ z przetwornikiem ultradźwiękowym należy pamiętać, że element piezoelektryczny ma charakter silnie pojemnościowy i jest dostrojony do stosunkowo wąskiego pasma częstotliwości. W nadajniku – w celu uzyskania maksymalnej emisji – najlepiej jest pobudzać przetwornik sygnałem o częstotliwości rezonansowej, gdyż nawet niewielkie odstrojenie może znacząco obniżyć poziom emitowanego dźwięku. Sygnał sterujący powinien mieć także odpowiednio wysoką amplitudę (dochodzącą nawet do 100 V w przypadku aplikacji wymagających uzyskania wysokiego poziomu ciśnienia akustycznego, czyli SPL). Dlatego też w aplikacjach dalekiego zasięgu stosuje się niewielkie transformatory, zapewniające jednocześnie



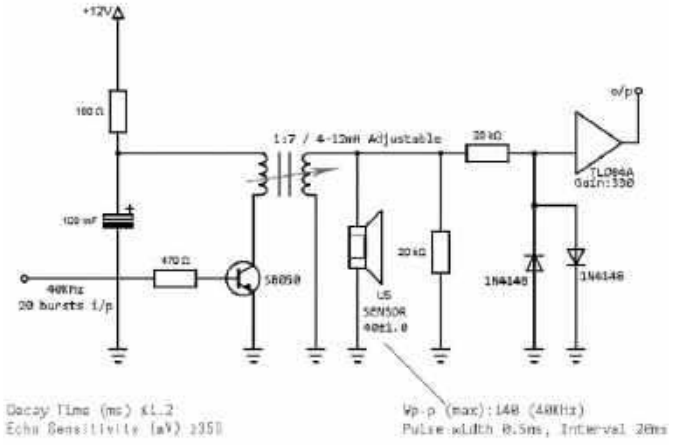
Fotografia 17. Macierz przetworników ultradźwiękowych wymontowana z głowicy USG (https://t.ly/-amNh)

eprasa.pl ef7662c802

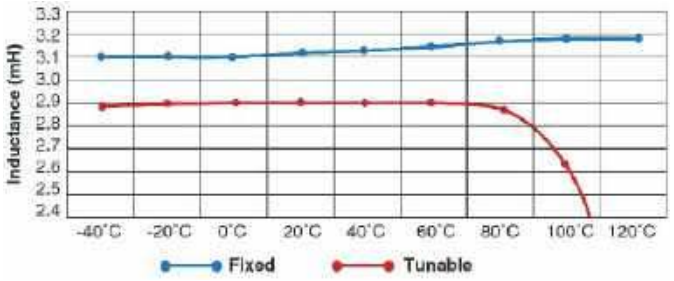


Fotografia 18. Płytka drukowana kontrolera taniego, uniwersalnego systemu czujników parkowania. Widoczne miniaturowe transformatory strojone, pracujące w torach nadawczych (https://t.ly/01Y15)

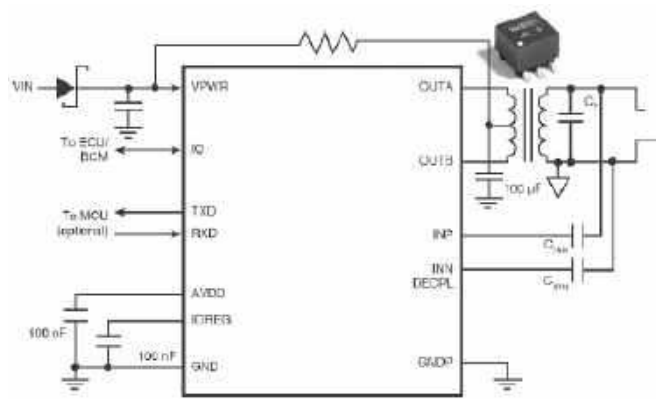
dopasowanie impedancyjne. Przykładowo w tańszych, uniwersalnych systemach czujników parkowania można znaleźć transformatory strojone za pomocą pokrętła zintegrowanego z ruchomym rdzeniem (**fotografia 18**, **rysunek 8**). Profesjonalne wykonania, implementowane przez producentów pojazdów, muszą jednak zapewniać najwyższy poziom niezawodności – a, podobnie jak w przypadku innych elementów regulacyjnych, transformatory dostrajane mechanicznie zachowują gorszą stabilność, m.in. w funkcji temperatury (**rysunek 9**). Z tego powodu w aplikacjach wyższej klasy zalecane jest stosowanie specjalnych transformatorów o stałej indukcyjności,



Rysunek 8. Schemat ideowy przykładowego toru nadawczo-odbiorczego w tanim systemie czujników parkowania (https://t.ly/K7eRI)



Rysunek 9. Porównanie charakterystyk stabilności termicznej indukcyjności transformatorów do aplikacji ultradźwiękowych. Widoczna jest silna zależność L(T) w przypadku transformatorów regulowanych oraz znacznie lepsza stabilność termiczna w przypadku elementów o stałej indukcyjności (https://t.ly/cvmox)



Rysunek 10. Schemat aplikacyjny samochodowego dalmierza ultradźwiękowego na bazie układu AFE i transformatora zwiększającego napięcie podawane na przetwornik (https://t.ly/cvmox)

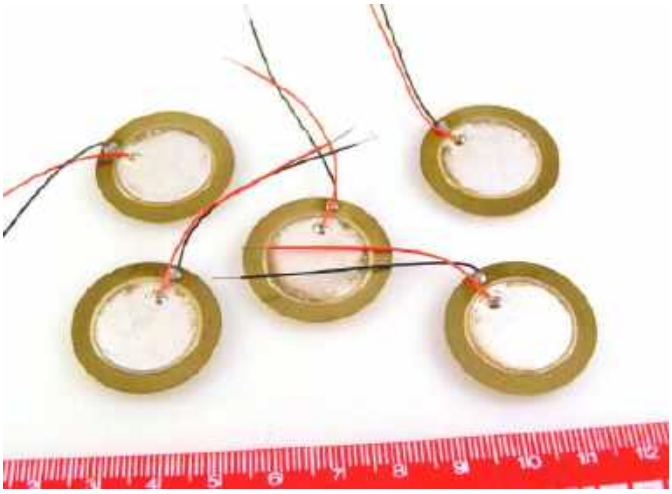
precyzyjnie dobranych do pojemności przetwornika. Takie rozwiązania oferuje m.in. firma CoilCraft – na **rysunku 10** można zobaczyć przykładowy schemat aplikacyjny układu, opartego na specjalizowanym AFE i współpracującego z transceiverem ultradźwiękowym.

Fotografia 19. Przetwornik dużej mocy do myjek ultradźwiękowych (40 kHz, 60 W) – https://t.ly/DdRWb

Na koniec tej części artykułu warto wspomnieć o jeszcze jednej kategorii przetworników, która w ostatnich latach zyskała na popularności z uwagi na upowszechnienie niedrogich myjek ultradźwiękowych. W tych aplikacjach stosowane są przetworniki działające na częstotliwości (przeważnie) około 40 kHz, jednak o zupełnie innej konstrukcji niż nadajniki/odbiorniki przeznaczone do pracy w powietrzu. Po pierwsze, pozwalają one na uzyskanie nieporównanie większej mocy (rzędu kilkudziesięciu watów – **fotografia 19**), przez co wymagają też odpowiednio zoptymalizowanego układu zasilania. Po drugie, są to przetworniki przeznaczone do pracy w bezpośrednim kontakcie ze ścianą zbiornika

Fotografia 20. Zestaw przetworników zamontowanych do zbiornika przemysłowej myjki ultradźwiękowej dużej mocy (https://t.ly/R_y3f)

eprasa.pl ef7662c802



Fotografia 21. Klasyczne „blaszki piezo", powszechnie stosowane jako sygnalizatory akustyczne m.in. w kalkulatorach, zegarkach elektronicznych czy zabawkach (https://t.ly/yCgG8)

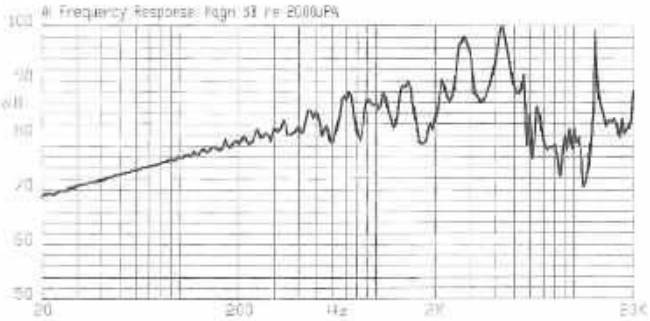
– dlatego też element pełniący rolę interfejsu mechanicznego zawiera często np. gwint do przykręcenia (choć wielu producentów stosuje tylko wysokotemperaturowy klej epoksydowy). W przypadku systemów czyszczenia ultradźwiękowego o bardzo dużej mocy akustycznej, powszechnie stosuje się łączenie wielu identycznych przetworników w jeden, wspólny system (**fotografia 20**).

Przetworniki piezoelektryczne (głośniki i sygnalizatory)

Przetworniki piezoelektryczne bazują na zjawisku odkształcania materiału pod wpływem przyłożonego napięcia (odwrotny efekt piezoelektryczny). Najbardziej rozpowszechnioną formą jest dysk piezoceramiczny – cienka płytka z materiału piezoelektrycznego, zwykle PZT (cyrkonianu-tytanianu ołowiu), naklejona jest na krążek metalowy (**fotografia 21**). Taki dwuwarstwowy element wygina się, gdy między elektrodami piezoceramiki przyłożone zostanie zewnętrzne napięcie. Ponieważ ugięcie jest niewielkie, typowe zastosowania takich przetworników to generowanie tonów o dość wysokiej częstotliwości – rezonans zachodzi przeważnie przy kilku kilohercach, co jest powszechnie wykorzystywane w konstrukcji buzzerów (sygnalizatorów akustycznych). Dostępne są zarówno wersje aktywne (z wbudowanym generatorem), jak i pasywne – wymagające zasilania napięciem zmiennym (zwykle przebiegiem prostokątnym, generowanym np. przez mikrokontroler). Oprócz klasycznych „blaszek piezo" często spotykane są także przetworniki mocowane w obudowie (komorze rezonansowej), która dodatkowo wzmacnia dźwięk, a często zawiera też elementy ułatwiające zamocowanie sygnalizatora do obudowy urządzenia (**fotografia 22**).

Największe zalety przetworników piezo to prosta konstrukcja (brak cewki, magnesów itp.), bardzo mały pobór prądu i wysoka niezawodność – dzięki temu są one idealne do urządzeń bateryjnych, gdzie okresowo trzeba wygenerować głośny sygnał przy minimalnym koszcie energetycznym. Typowe parametry prostszych przetworników to: częstotliwość rezonansowa w zakresie 2...6 kHz, poziom natężenia dźwięku dochodzący do 80...100 dB, napięcie maksymalne – około 30 V. Prąd w warunkach maksymalnego wysterowania osiąga wartość kilku miliamperów i jest determinowany zarówno przez przyłożone do przetwornika napięcie międzyszczytowe, jak i reaktancję pojemnościową przetwornika przy danej częstotliwości.

Fotografia 22. Przetwornik piezoelektryczny w tworzywowej obudowie (https://t.ly/IQrL_)



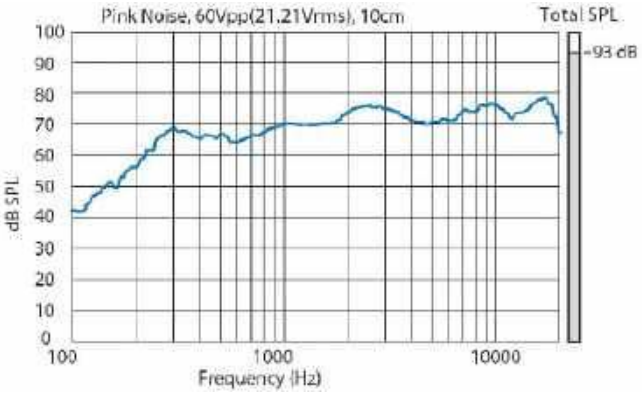
Rysunek 11. Charakterystyka częstotliwościowa prostego buzzera piezo (https://t.ly/Qa0WF)

Fotografia 23. Szerokopasmowy głośnik piezoelektryczny o wymiarach 50×46,3×2 mm (https://t.ly/5_Ot5)

Warto pamiętać, że – z uwagi na silnie zafalowaną charakterystykę częstotliwościową z wyraźnym pikiem rezonansowym – prostsze przetworniki typu „buzzer" nie nadają się do odtwarzania dźwięku o złożonej charakterystyce widmowej (np. komunikatów głosowych). Przykładową charakterystykę można zobaczyć na **rysunku 11**. Nie należy jednak całkowicie deprecjonować konstrukcji piezoelektrycznych – na rynku są bowiem dostępne także wyspecjalizowane przetworniki, które – pomimo bardzo kompaktowych wymiarów – zaskakująco dobrze zachowują się w szerokim zakresie widma sygnału akustycznego (przykład charakterystyki głośnika, który można zobaczyć na **fotografii 23**, pokazuje **rysunek 12**).

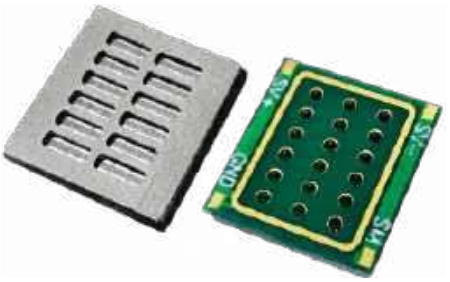
Głośniki MEMS (mikrogłośniki półprzewodnikowe)

Rozwój technologii MEMS, który zrewolucjonizował konstrukcję mikrofonów, od niedawna znajduje zastosowanie także w głośnikach. Głośnik MEMS to najczęściej płaski układ krzemowy, w którym metodami mikroobróbki stworzono ruchome elementy drgające



Rysunek 12. Charakterystyka częstotliwościowa przykładowego głośnika piezo (https://t.ly/_jNIX)

eprasa.pl ef7662c802



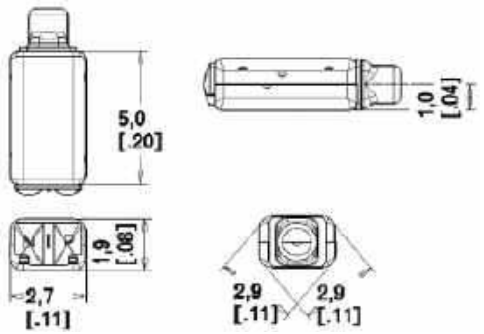
Fotografia 24. Głośnik xMEMS Sycamore (https://t.ly/bJ89F)

– np. membrany lub belki – pobudzane siłami elektrostatycznymi lub piezoelektrycznymi. Idea jest analogiczna do głośnika dynamicznego, ale realizowana w skali mikro, bez cewek i magnesów. Pionierem w tej dziedzinie jest firma xMEMS, która kilka lat temu zaprezentowała pierwszy komercyjny mikrogłośnik piezoelektryczny tego rodzaju. Aktualnie dostępne produkty przeznaczone są głównie do zastosowań w słuchawkach dousznych, aparatach słuchowych, okularach AR itp., gdzie miniaturyzacja i niska masa mają kluczowe znaczenie dla użyteczności docelowego urządzenia. Ponieważ amplitudy uzyskiwane w technologii MEMS są mikroskopijne, głośnik taki składa się często z wielu równolegle pracujących elementów (mikromembran) w jednym układzie, drgających synchronicznie. Całość zamknięta jest w szczelnej obudowie o wymiarach zaledwie kilku milimetrów. Przykładowo układ xMEMS Sycamore (**fotografia 24**) ma wymiary zaledwie 8,41×9,00×1,13 mm i waży 150 mg, a mimo to jest szerokopasmowym przetwornikiem do słuchawek dousznych – według producenta oferuje pasmo zaczynające się już od głębokiego basu (porównywalnego z klasycznymi przetwornikami).

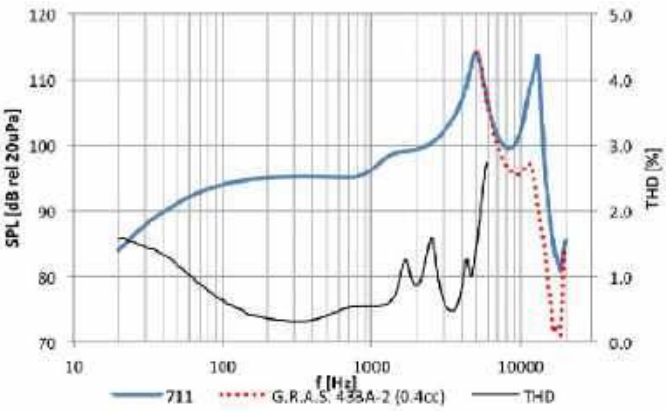
Głośniki MEMS oferują kilka unikalnych zalet. Po pierwsze, są bardzo szybkie i precyzyjne – krzemowa struktura oferuje minimalne straty i doskonałą powtarzalność, dzięki czemu dźwięk odtwarzany jest z niskimi zniekształceniami i niemal identycznie w obu kanałach (co ma znaczenie w systemach stereo). Po drugie, przetworniki MEMS są płaskie i małe, można je więc zintegrować na płytce wraz z innymi układami półprzewodnikowymi, a w dodatku ich konstrukcja jest w pełni monolityczna, przez co trwała i niewrażliwa na wstrząsy. Taka struktura może być też hermetyczna – niektóre mikrogłośniki xMEMS są obudowane tak, że osiągają stopień ochrony IP58, co w przypadku tradycyjnych głośników wymagałoby zastosowania specjalnych membran i uszczelnień.

Przetworniki armaturowe

Przetworniki armaturowe (ang. *balanced armature*) zasługują na uwagę jako technologia bardzo efektywna w skali mikro. Składają się z miniaturowej cewki nawiniętej wokół ruchomej, metalowej kotwiczki, zawieszonej w polu magnesów trwałych – w wyniku przepływu prądu przez uzwojenie kotwiczka drga, poruszając przymocowaną do niej niewielką, sztywną membranę, wykonaną z aluminium. Całość mieści się w obudowie o wielkości kilku milimetrów. Z uwagi na doskonałą jakość dźwięku i wysoką efektywność



Rysunek 13. Wymiary przetwornika WBFK-30095-000 (https://t.ly/Gfz-y)



Rysunek 14. Charakterystyki przetwornika WBFK-30095-000 (https://t.ly/Gfz-y)

przetwarzania, opisywane elementy znajdują zastosowanie nie tylko w słuchawkach klasy high-end, ale także w aplikacjach profesjonalnych, np. medycznych (aparaty słuchowe).

Co ważne, poszczególne modele znacząco różnią się obsługiwanym zakresem pasma akustycznego, dzięki czemu dwa lub trzy przetworniki mogą być złożone w celu uzyskania systemu dwu- lub trójdrożnego. W efekcie otrzymujemy coś na kształt zespołu głośnikowego, ale w wydaniu miniaturowym – mieszczącym się nawet w klasycznych słuchawkach. Jako przykład warto tutaj przytoczyć przetworniki armaturowe marki Knowles: wysokotonowy WBFK-30095-000 (**fotografia 25**, **rysunki 13** i **14**) oraz nisko- i średniotonowy CI-22955-000 (**fotografia 26**, **rysunki 15** i **16**).

Przetworniki armaturowe mają zróżnicowaną impedancję (od kilkunastu do nawet 90 Ω) i potrafią generować wysoki poziom ciśnienia akustycznego przy niewielkim napięciu: typowy driver armaturowy osiąga SPL rzędu około 100 dB przy pobudzeniu sygnałem 100-miliwoltowym.

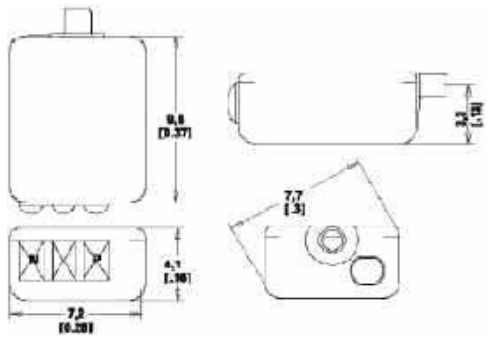
Przetworniki kostne

Przetwornik kostny (ang. *bone conduction transducer*) to specjalny rodzaj głośnika, który przekazuje dźwięk przez bezpośrednie

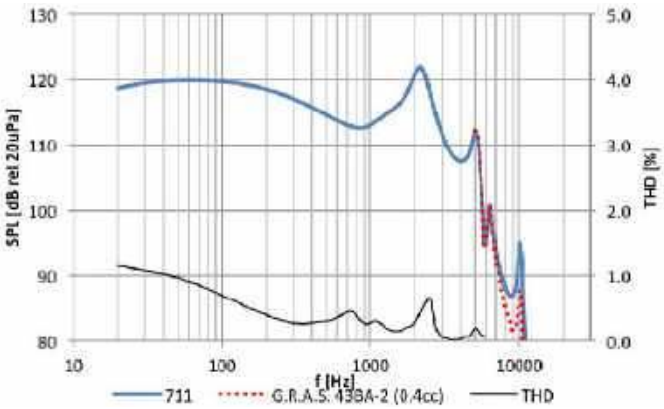
Fotografia 25. Przetwornik armaturowy WBFK-30095-000 (https://t.ly/Gfz-y)

Fotografia 26. Przetwornik armaturowy CI-22955-000 (https://t.ly/Q2goG)

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 15. Wymiary przetwornika CI-22955-000 (https://t.ly/Q2goG)

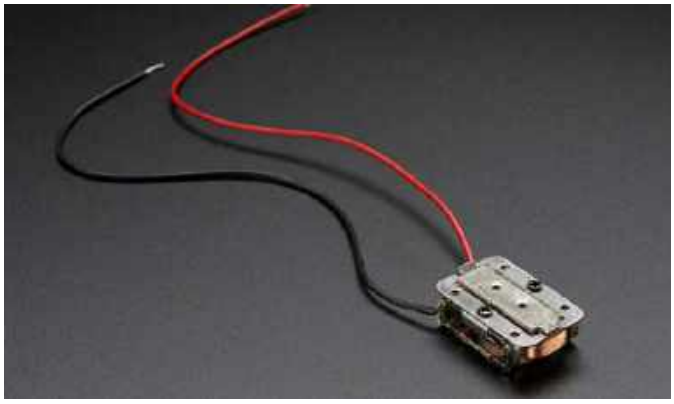


Rysunek 16. Charakterystyki przetwornika CI-22955-000 (https://t.ly/Q2goG)

wprowadzenie w drgania kości czaszki użytkownika. Drgania te propagują do ucha wewnętrznego, omijając klasyczną drogę powietrzną (przez błonę bębenkową). Dzięki temu możliwe jest np. słyszenie dźwięków przy jednoczesnym pozostawieniu otwartego kanału słuchowego (słuchawki kostne nie zatykają uszu, jak typowe konstrukcje dokanałowe czy douszne), przydają się też u osób z uszkodzoną błoną bądź niedrożnym przewodem słuchowym.

Typowy głośnik kostny ma formę małej przystawki wibrującej, którą dociska się do kości. Cienka warstwa skóry tylko w niewielkim stopniu tłumi drgania, dzięki czemu przekaz dźwięku jest efektywny, a zarazem dyskretny. Wewnątrz przetwornika znajduje się zwykle układ drgający z masą, zaś konwersja sygnału elektrycznego na fale mechaniczne odbywa się przy użyciu układu cewka-magnes.

Dość popularnym w ostatnich latach przykładem przetwornika kostnego jest 8-omowy moduł oferowany przez znaną markę Adafruit (**fotografia 27**). Całość jest wykonana w metalowej obudowie o wymiarach 21,5×14×7,9 mm i waży 9,6 g. Przetwornik nadaje się do odtwarzania dźwięków w zakresie częstotliwości od 300 Hz do 19 kHz i oferuje SPL na poziomie 90,1 dB.



Fotografia 27. Przetwornik kostny marki Adafruit (https://t.ly/yVQwb)

Podsumowanie

Jak widać, nie ma jednego, uniwersalnego przetwornika akustycznego – różnorodność rozwiązań dostępnych na rynku pozwala dobrać element optymalny do niemal każdego, nawet najbardziej specjalistycznego zadania. Dobrym przykładem jest rynek mikrofonów – do niedawna wyraźnie podzielony na konstrukcje stosowane w wysokiej klasy systemach audio (ten sektor był dotąd zdominowany przez mikrofony dynamiczne, wstęgowe czy pojemnościowe) oraz proste i tanie, niczym przysłowiowy barszcz, kapsuły elektretowe. Dziś znakomita większość urządzeń codziennego użytku bazuje na nowoczesnych mikrofonach MEMS, które – za sprawą niewielkich wymiarów, małego poboru mocy i doskonałych charakterystyk akustycznych – napędzają rynek urządzeń mobilnych i ubieralnych, akcesoriów komputerowych, a nawet niektórych urządzeń pomiarowych czy studyjnych. To samo dzieje się zresztą w świecie przetworników służących do generowania dźwięku – choć w profesjonalnych systemach audio wciąż królują duże i ciężkie głośniki dynamiczne, to w bardziej kompaktowych aplikacjach coraz częściej spotykamy się z implementacjami miniaturowych przetworników armaturowych, a nawet głośników MEMS, będących ostatnim krzykiem mody wśród producentów m.in. słuchawek dokanałowych.

A co przyniesie przyszłość? Z pewnością będziemy świadkami dalszego przesuwania ciężaru prac badawczo-rozwojowych w stronę rozwiązań mikromechanicznych, zwłaszcza tych opartych na technologiach monolitycznych. Walka wśród producentów będzie zapewne toczyła się także o dalszą miniaturyzację, choć o tę będzie już coraz trudniej – wszak współczesne mikrofony MEMS czy głośniki i tak mają już wymiary liczone co najwyżej w pojedynczych milimetrach. A, jak powszechnie wiadomo, fizyki oszukać się nie da – choć zapewne, niczym as w rękawie producentów, pozostaje jeszcze do wykorzystania kilka technik, które pozwolą w przyszłości tworzyć jeszcze bardziej kompaktowe przetworniki o zadziwiającej jakości dźwięku.

inż. Przemysław Musz, EP

REKLAMA

eprasa.pl ef7662c802

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

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

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

BESTSELLERY sklepu AVT – sklep.avt.pl

Mierniki Testery FNIRSI

Rabat dla Czytelników EP
przy zakupie podaj kod **EP2505FN** **–3%**

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

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

FN-LCR-P1
Tester elementów FNIRSI LCR-P1

FN-HRM10
Tester rezystancji wewnętrznej akumulatorów FNIRSI HRM-10

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

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

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

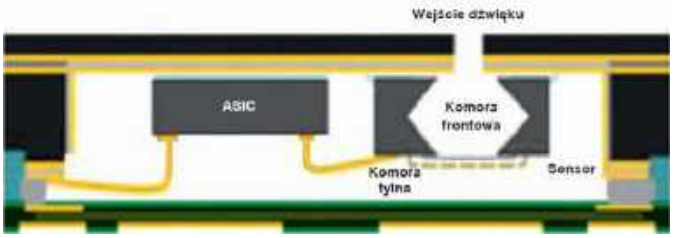
Mikrofony MEMS w praktyce konstruktora

Wraz z rozpowszechnieniem asystentów głosowych, systemów IoT oraz urządzeń mobilnych i ubieralnych, mikrofony MEMS (ang. Micro-Electro-Mechanical Systems*) stały się jednym z podstawowych elementów stosowanych we współczesnej elektronice audio. Te miniaturowe przetworniki, wykonywane w zaawansowanej technologii półprzewodnikowej, szybko wypierają z rynku starsze mikrofony elektretowe dzięki swoim niewielkim wymiarom, niskiemu zapotrzebowaniu na energię oraz łatwości integracji z układami cyfrowymi. Przy okazji sierpniowego „Tematu Numeru", poświęconego przetwornikom akustycznym, warto bliżej przyjrzeć się konstrukcjom i zasadom działania różnych odmian mikrofonów MEMS, ich parametrom technicznym, dostępnym rodzajom wyjść oraz praktycznym wskazówkom dotyczącym montażu tych elementów na płytkach drukowanych.*

Mikrofony MEMS zrewolucjonizowały konstrukcje urządzeń audio – od smartfonów i bezprzewodowych zestawów słuchawkowych, poprzez laptopy i kamery, aż po sprzęt medyczny czy sensory środowiskowe. Daleko posunięta miniaturyzacja pozwala na montaż nawet wielu mikrofonów w jednym urządzeniu (np. w ramach macierzy mikrofonowej poprawiającej kierunkowość i jakość rozpoznawania głosu). Dzięki temu urządzenia mogą rejestrować fale akustyczne wielokanałowo i realizować zaawansowane funkcje, takie jak eliminacja szumów otoczenia czy lokalizacja źródła dźwięku. Co więcej, mikrofony MEMS cechują się także bardzo dobrą powtarzalnością parametrów i stabilnością długoterminową, spełniając wymagania profesjonalnych zastosowań pomiarowych (np. w ramach stacji monitoringu hałasu).

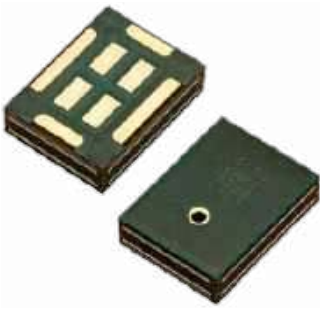
Budowa i zasada działania mikrofonów MEMS

W praktycznym ujęciu mikrofon MEMS jest najczęściej układem typu *dual-die*, tj. zawierającym dwa główne komponenty: właściwy sensor MEMS (akustyczny przetwornik pojemnościowy) oraz współpracujący z nim układ scalony (ASIC), realizujący szereg funkcji: zasilanie i stabilizację punktu pracy struktury mikromechanicznej, wstępne kondycjonowanie sygnału oraz jego przetwarzanie (np. konwersję A/C). Obie struktury są połączone ze sobą



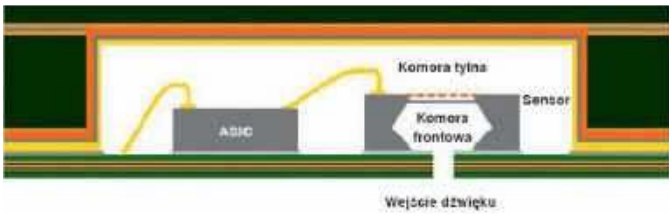
Rysunek 1. Budowa mikrofonu MEMS z górnym portem akustycznym (https://t.ly/-u4QP)

eprasa.pl ef7662c802



Fotografia 1. Przykładowy mikrofon MEMS z górnym portem (https://t.ly/bQr41)

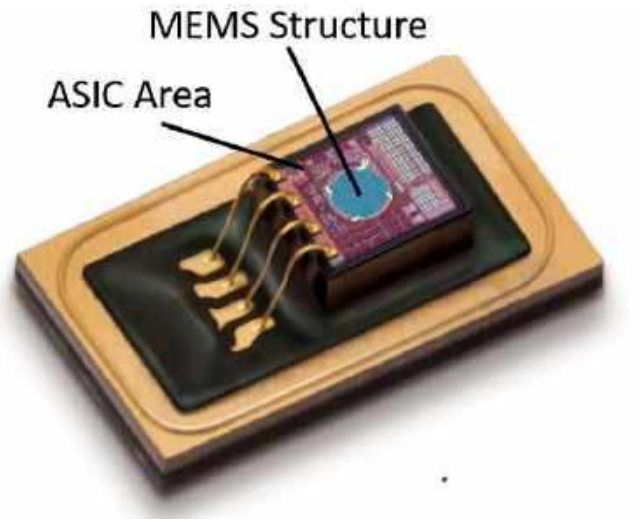
Fotografia 2. Przykładowy mikrofon MEMS z dolnym portem (https://t.ly/cYsNf)



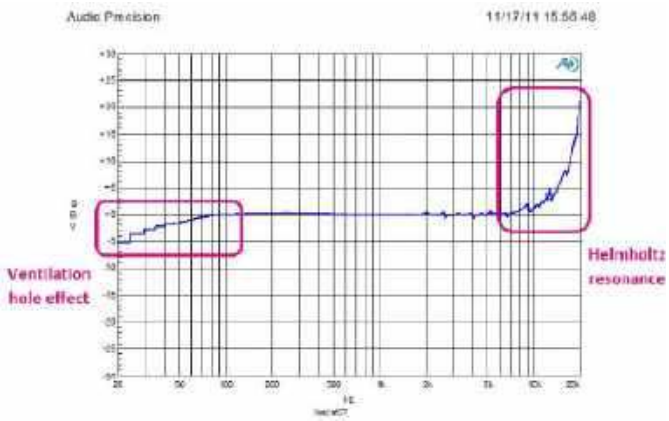
Rysunek 2. Budowa mikrofonu MEMS z dolnym portem akustycznym (https://t.ly/-u4QP)

z użyciem techniki bondingu, stosowanej we wszystkich innych układach scalonych (zarówno monolitycznych, jak i hybrydowych) i zamknięte we wspólnej obudowie z wyprowadzeniami umożliwiającymi montaż SMD. W odróżnieniu od większości typowych układów półprzewodnikowych, obudowa mikrofonu MEMS musi być wyposażona w otwór akustyczny, aby fale dźwiękowe mogły dotrzeć do membrany. Otwór ten bywa umieszczony w górnej ściance obudowy (tzw. mikrofony *top-port*, jak na **rysunku 1**, **fotografia 1**) albo w jej spodzie, czyli od strony PCB (konstrukcja *bottom-port* – **rysunek 2**, **fotografia 2**). Gwoli ścisłości należy dodać, że istnieją także – znacznie rzadziej spotykane – konstrukcje monolityczne (**fotografia 3**), w których całość – zarówno ASIC, jak i właściwy przetwornik – są wykonane w ramach wspólnej struktury krzemowej.

Wewnątrz obudowy wydzielone są dwie komory akustyczne: przednia, umieszczona bezpośrednio przed membraną (często jest nią przestrzeń pod pokrywką obudowy w przypadku konstrukcji *top-port* lub sama mikromechaniczna wnęka w strukturze MEMS w przypadku *bottom-port*) oraz tylna, znajdująca się po drugiej stronie membrany. Wielkość tych komór wpływa na charakterystykę częstotliwościową mikrofonu – przykładowo ograniczona objętość komory przedniej

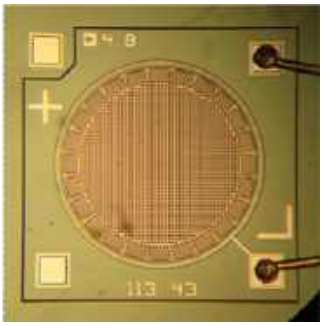


Fotografia 3. Mikrofon MEMS o budowie monolitycznej (https://t.ly/42OSz)



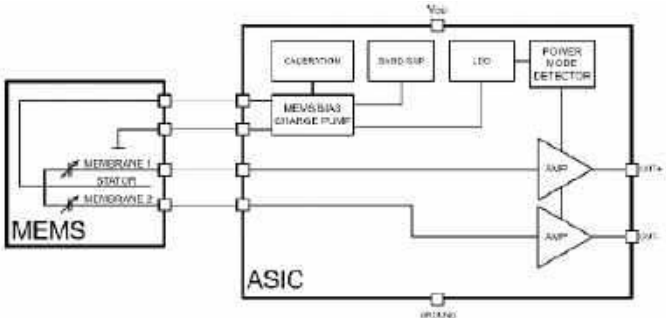
Rysunek 3. Charakterystyka częstotliwościowa mikrofonu MEMS z zaznaczonymi odchyleniami spowodowanymi wpływem geometrii komór przedniej i tylnej (https://t.ly/lzljc)

może powodować rezonans i pewne podbicie w paśmie akustycznym, co wpływa na odbiór wysokich tonów, podczas gdy wielkość i geometria komory tylnej determinują w dużej mierze przenoszenie niskich częstotliwości (**rysunek 3**). Projektanci mikrofonów MEMS optymalizują te parametry, dążąc do uzyskania względnie płaskiej charakterystyki w pasmie audio, przy jednoczesnym zachowaniu możliwie najmniejszych wymiarów całości.



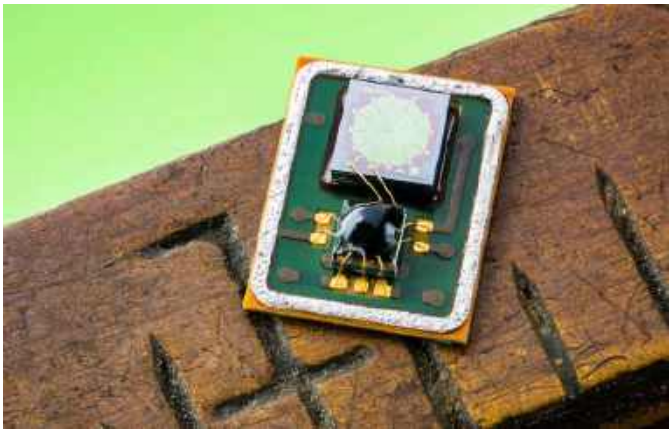
Fotografia 4. Struktura mikrofonu pojemnościowego MEMS (https://t.ly/9LXjd)

Podstawowa technologia stosowana (już od wielu lat) do produkcji mikrofonów MEMS opiera się na pomiarze zmian pojemności pomiędzy delikatną membraną, a stałą (nieruchomą) płytką perforowaną, pełniącą rolę drugiej okładziny kondensatora płaskiego. W widoku mikroskopowym tego rodzaju sensora zwraca uwagę charakterystyczna, zwykle okrągła struktura, umieszczona w bloku krzemowym znajdującym się tuż obok układu ASIC – to właśnie ów kondensator (**fotografia 4**). Struktura czujnika jest zasilana napięciem rzędu nawet kilkunastu woltów, wytwarzanym przez pompę ładunkową (**rysunek 4**) z głównego napięcia zasilania mikrofonu. Podbicie wartości napięcia jest konieczne w celu wytworzenia stabilnego pola elektrycznego – na tyle silnego, by móc uzyskać użyteczny sygnał wyjściowy. Niestety, takie rozwiązanie wiąże się nie tylko z relatywnie sporym poborem mocy, ale także dość długim czasem rozruchu (od 10 ms do nawet 800 ms w skrajnych przypadkach), co dyskwalifikuje tego rodzaju przetworniki z użycia w aplikacjach wymagających bardzo szybkiego wybudzenia ze stanu obniżonego poboru mocy.



Rysunek 4. Schemat blokowy pojemnościowego mikrofonu MEMS z wyjściem różnicowym. Widoczna pompa ładunkowa polaryzująca układ przetwornika typu kondensatorowego (https://t.ly/YFfnL)

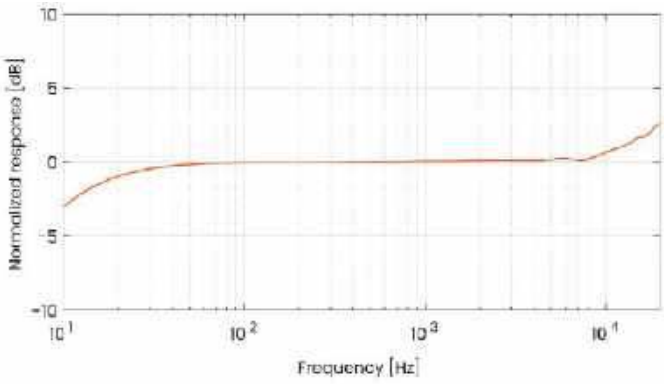
eprasa.pl ef7662c802



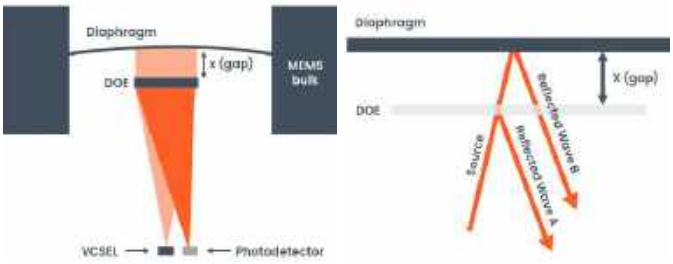
Fotografia 5. Struktura mikrofonu piezoelektrycznego MEMS (https://t.ly/z8P1y)

Warto wspomnieć, że oprócz dominujących na rynku mikrofonów pojemnościowych MEMS pojawiły się także konstrukcje bazujące na zjawisku piezoelektrycznym (**fotografia 5**), w których drgająca membrana generuje ładunek elektryczny bez potrzeby zewnętrznej polaryzacji – co upraszcza cały układ. Nie jest bowiem wymagane wysokie napięcie polaryzujące ani wewnętrzna pompa ładunkowa. Zaletą takich mikrofonów jest znacznie mniejsza wrażliwość na czynniki środowiskowe: brak szczeliny kondensatora oznacza wyraźnie lepszą odporność na pył, wilgoć czy drobiny, dostające się z otoczenia do komory przedniej. Dzięki temu mikrofon może pracować w trudnych warunkach (np. w urządzeniach mobilnych), a nawet obyć się bez dodatkowych osłon akustycznych. Ponadto mikrofony piezo MEMS cechują się bardzo krótkim czasem startu i niskim zużyciem mocy, co ułatwia realizację funkcji ciągłego nasłuchu (ang. *always-on*) przy zasilaniu bateryjnym czy też podczas pracy w trybie budzenia dźwiękiem (ang. *wake-on-sound*). Mimo tych zalet, mikrofony piezo są wciąż nowością i ustępują liczebnie klasycznym konstrukcjom pojemnościowym, te ostatnie okazały się bowiem „sprawdzone w boju" – są dobrze dopracowane i oferują doskonałe parametry akustyczne.

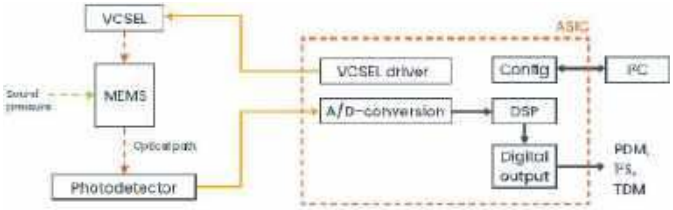
Fotografia 6. Mikrofon SBM100 marki sensiBEL (https://t.ly/8xs4k)



Rysunek 5. Charakterystyka częstotliwościowa mikrofonu SBM100 (https://t.ly/7XHi7)



Rysunek 6. Zasada działania optycznego mikrofonu SBM100 (https://t.ly/7XHi7)



Rysunek 7. Schemat blokowy mikrofonu SBM100 (https://t.ly/7XHi7)

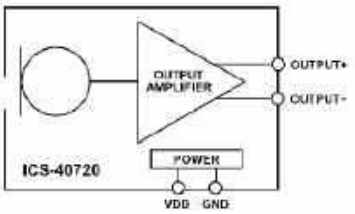
Warto wspomnieć także o supernowoczesnych mikrofonach MEMS, opartych na technologii optycznej. Takie właśnie rozwiązanie opracowała firma sensiBEL – mikrofon SBM100 (**fotografia 6**) oferuje zakres dynamiczny na poziomie 132 dB (tj. o 20 dB większy niż standardowe mikrofony MEMS), niebywale wprost płaską charakterystykę częstotliwościową (**rysunek 5**) oraz bardzo niski poziom szumów własnych. Technologia opiera się na pomiarze odbicia światła laserowego, emitowanego przez laser wnękowy typu VCSEL, od ruchomej membrany (**rysunek 6**). Dane, po przetworzeniu przez zintegrowany układ ASIC, są udostępniane w rozdzielczości 24 bitów przez jeden z popularnych interfejsów cyfrowych (PDM, I²S lub 8-kanałowy TDM – patrz **rysunek 7**).

Interfejsy wyjściowe stosowane w mikrofonach MEMS

Jednym z podstawowych kryteriów podziału mikrofonów MEMS jest rodzaj wyjścia. W przeciwieństwie do klasycznych konstrukcji pasywnych oraz mikrofonów elektretowych (wyposażonych w prosty bufor JFET), znaczna część dostępnych na rynku komponentów z tej grupy udostępnia „na gotowo" sygnał cyfrowy, który może być podłączony wprost do mikrokontrolera lub procesora aplikacyjnego. Wciąż istnieje jednak zapotrzebowanie na konstrukcje z wyjściem analogowym – i to od nich zaczniemy opis interfejsów stosowanych w mikrofonach MEMS.

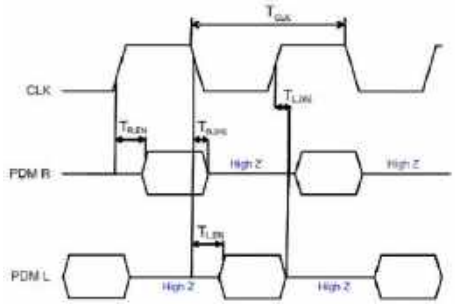
Wyjście analogowe

Analogowy mikrofon MEMS jest zwykle wyposażony tylko w trzy wyprowadzenia: zasilanie, masę oraz wyjście sygnału. Czasem spotyka się dodatkowe wyprowadzenie drugiego wyjścia w fazie przeciwnej (w przypadku wyjścia różnicowego – patrz **rysunek 8**), ale zdecydowana większość modeli do aplikacji konsumenckich ma jednak wyjście niezbalansowane (ang. *single-ended*). Sygnał wyjściowy ma postać napięciową, o określonej czułości wyrażonej w dBV, mierzonej przy 94 dB SPL i częstotliwości (zwykle) 1 kHz.

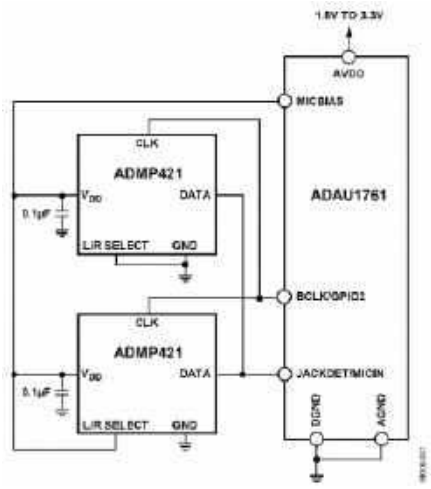


Rysunek 8. Mikrofon MEMS z różnicowym wyjściem analogowym (https://t.ly/gVXLq)

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 9. Transmisja danych stereo za pośrednictwem łącza PDM (https://t.ly/q1aPw)



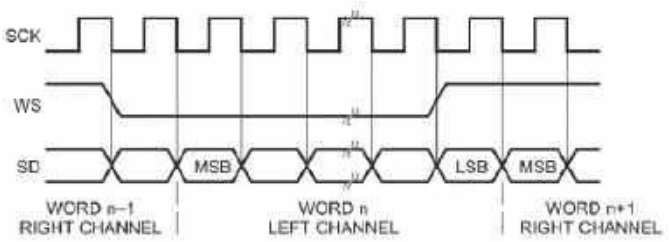
Rysunek 10. Przykład połączenia dwóch mikrofonów z interfejsem PDM do procesora DSP (https://t.ly/C3l3E)

Charakterystyczną cechą analogowych mikrofonów MEMS jest obecność składowej stałej napięcia na wyjściu. Ponieważ wewnętrzny przedwzmacniacz jest zasilany pojedynczym napięciem, jego wyjście musi być wewnętrznie polaryzowane pewnym stałym offsetem (zwykle około połowy napięcia zasilania). Typowe wartości tego offsetu zawierają się w zakresie 0,8...1,5 V. W praktyce oznacza to, że przed podaniem sygnału na wejście kolejnego stopnia (np. wzmacniacza operacyjnego lub przetwornika ADC) należy użyć kondensatora zapewniającego sprzężenie zmiennoprądowe (tj. odcinającego składową stałą).

Wyjście analogowe jest dobrym wyborem, gdy sygnał ma trafić np. do klasycznego wzmacniacza mocy, układu nadajnika FM czy prostego układu nagrywającego. W nowoczesnych systemach cyfrowych, gdzie sygnał dźwiękowy i tak będzie próbkowany przez mikrokontroler lub kodek, użycie mikrofonu analogowego oznaczałoby jednak konieczność zastosowania zewnętrznego przetwornika ADC. W takich przypadkach rozwiązaniem znacznie upraszczającym projekt jest zastosowanie mikrofonu z wyjściem cyfrowym.

Wyjście cyfrowe

Cyfrowe mikrofony MEMS integrują w swojej strukturze kompletny tor przetwarzania sygnału: od membrany i przedwzmacniacza, poprzez przetwornik analogowo-cyfrowy, aż po interfejs wyjściowy. Jednym z najbardziej rozpowszechnionych formatów danych jest PDM (ang. Pulse Density Modulation – modulacja gęstości impulsów). Mikrofon generuje ciąg bitów o wysokiej częstotliwości (rzędu kilku MHz), w którym gęstość impulsów logicznej



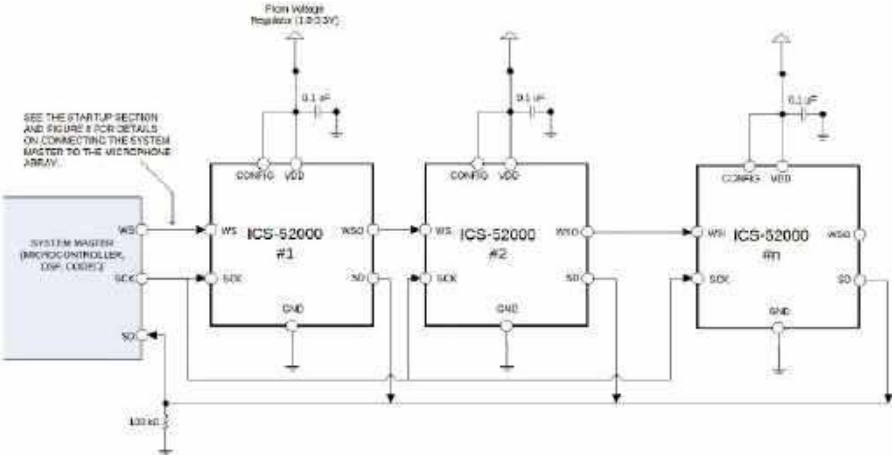
Rysunek 11. Komunikacja I²S (https://t.ly/Au0uj)

„1" odpowiada chwilowej amplitudzie sygnału audio. Innymi słowy, PDM to jednobitowy strumień, z którego oryginalny sygnał można odzyskać za pomocą cyfrowego filtru dolnoprzepustowego (decymatora). Zaletami modulacji PDM są m.in. prostota sprzętowa interfejsu oraz odporność na zakłócenia – sygnał jednobitowy jest odporny na niewielkie przekłamania.

Mikrofony z wyjściem w formacie PDM nie generują własnego zegara – wymagają doprowadzenia sygnału CLK z zewnętrznego kontrolera lub procesora dźwięku. Na linii DATA mikrofon wystawia kolejne bity modulowanego sygnału, zaś linia L/R pozwala skonfigurować, przy którym zboczu zegara mikrofon wystawia swój bit (**rysunek 9**). Umożliwia to podłączenie dwóch mikrofonów PDM do jednej pary linii CLK i DATA – będą one nadawać naprzemiennie, tworząc konfigurację stereofoniczną. Taką konfigurację zilustrowano na **rysunku 10**, gdzie dwa mikrofony dzielą wspólny zegar i linię danych, a ich podłączenie różni się tylko stanem pinów L/R, wymuszającym przyporządkowanie układu fizycznego do danego kanału.

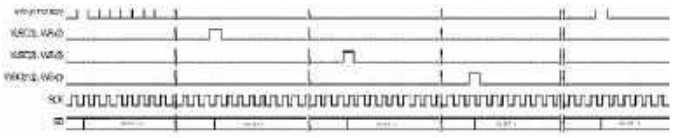
Alternatywnym rozwiązaniem, spotykanym w wielu mikrofonach MEMS, jest wbudowany interfejs I²S, przez który układ przekazuje na wyjście gotowe słowa audio (np. 24-bitowe próbki w standardowym formacie). Wyprowadzenia takiego mikrofonu to zatem typowe linie I²S: zegar bitów (BCLK), linia danych (SD) oraz sygnał ramki (WS – word select) określający kanał (**rysunek 11**). Zaletą I²S jest pełna zgodność z interfejsami audio większości mikrokontrolerów i procesorów sygnałowych – mikrofon obsługujący ten standard komunikacji może być bezpośrednio podłączony do linii I²S mikrokontrolera, bez potrzeby pisania oprogramowania do dekompresji PDM ani stosowania zewnętrznego kodeka. Niestety interfejs I²S, podobnie jak PDM, ogranicza do dwóch liczbę urządzeń na magistrali. Istnieją natomiast specjalizowane interfejsy do wielokanałowego przesyłu danych audio – jednym z nich jest TDM (ang. *Time Division Multiplexing*).

Mikrofony z interfejsem TDM transmitują swoje dane w podziale czasowym przy wspólnym zegarze, często korzystając z dodatkowych sygnałów synchronizacji ramki. Przykładem jest mikrofon InvenSense ICS-52000 – pierwszy na rynku mikrofon MEMS z interfejsem TDM obsługującym do 16 mikrofonów na jednej magistrali (**rysunek 12**).



Rysunek 12. Podłączenie zestawu mikrofonów komunikujących się z hostem za pośrednictwem interfejsu TDM (https://t.ly/ICz3n)

eprasa.pl ef7662c802



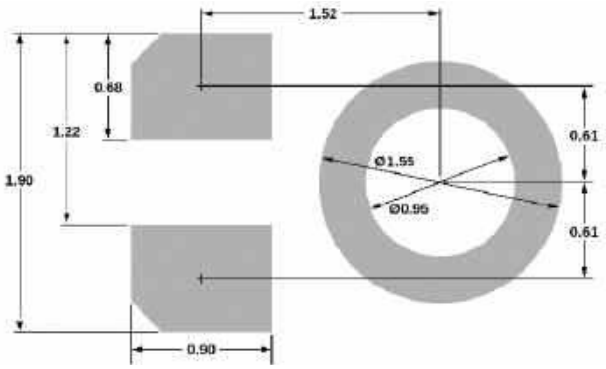
Rysunek 13. Komunikacja wielokanałowa przez interfejs TDM (https://t.ly/ICz3n)

Układ ten umożliwia budowę dużych matryc mikrofonowych (np. do dalekosiężnego rozpoznawania mowy) bez skomplikowanego okablowania – wszystkie mikrofony dołącza się równolegle do linii zegara i danych, a każdy z nich transmituje dane w przypisanym mu oknie czasowym w ramach ramki TDM (**rysunek 13**). W rezultacie cztery linie (Clock, Frame Sync, Data In, Data Out) mogą obsłużyć wiele mikrofonów jednocześnie, obciążając system jedynie zagregowanym strumieniem danych. Wadami TDM są: większy stopień komplikacji protokołu oraz mniejsza tolerancja na błędy czasowe, przez co rozwiązanie to jest stosowane głównie w aplikacjach specjalistycznych (np. sprzęt konferencyjny, inteligentne głośniki z rozbudowaną matrycą mikrofonów itp.). W większości standardowych zastosowań stereofonicznych sprawdza się natomiast któryś z prostszych interfejsów omówionych poprzednio.

Montaż mikrofonów MEMS na PCB

Montaż mikrofonów MEMS na płytce drukowanej wymaga zwrócenia uwagi na kilka specyficznych kwestii. Mikrofony *top-port* można montować bez dodatkowych owiertów w samej płytce – otwór akustyczny znajduje się na wierzchu komponentu. Projektując obudowę urządzenia należy jednak przewidzieć, by dźwięk docierał do tego otworu (np. poprzez otwór w panelu obudowy czy odpowiedni kanał akustyczny). Często stosuje się naklejane grille lub siateczki zabezpieczające otwór od góry w celu ochrony przed kurzem.

Mikrofony z dolnym otworem są znacznie bardziej wymagające, zarówno pod względem projektowym, jak i procesowym. Konieczność wykonania otworu w PCB pod elementem, dokładnie w miejscu odpowiadającym otworowi w obudowie mikrofonu (**rysunek 14**) może wydawać się niezbyt dużym wyzwaniem w dobie doskonałego oprogramowania EDA. Trzeba jednak pamiętać o nieidealnym procesie montażu. Nawet przy zastosowaniu automatu pick & place należy się bowiem liczyć z (choćby niewielką) niedokładnością pozycjonowania, a na dodatek sama płytka drukowana także jest produkowana z pewną tolerancją. Mało tego – montaż mikrofonu MEMS na podłożu o grubości rzędu 1,0 mm (czyli standardowym laminacie stosowanym do produkcji wielu PCB) wiąże się z zaburzeniem wypadkowej geometrii przedniej komory, gdyż objętość i kształt otworu w płytce stanowią niejako przedłużenie komory zintegrowanej wewnątrz obudowy mikrofonu. Z tego też względu idealną (i zalecaną przez producentów) sytuacją jest mocowanie mikrofonu na płytce rigid-flex, która może być znacznie cieńsza niż jakakolwiek standardowa płytka na bazie sztywnego laminatu FR4.



Rysunek 14. Przykładowy rysunek wymiarowy footprintu mikrofonu typu bottom-port (https://t.ly/VOD15)

Niezależnie od typu portu, istnieje ponadto szereg innych wskazówek montażowych dotyczących mikrofonów MEMS – pokrótce wymienimy najważniejsze z nich.

Lutowanie i profil reflow

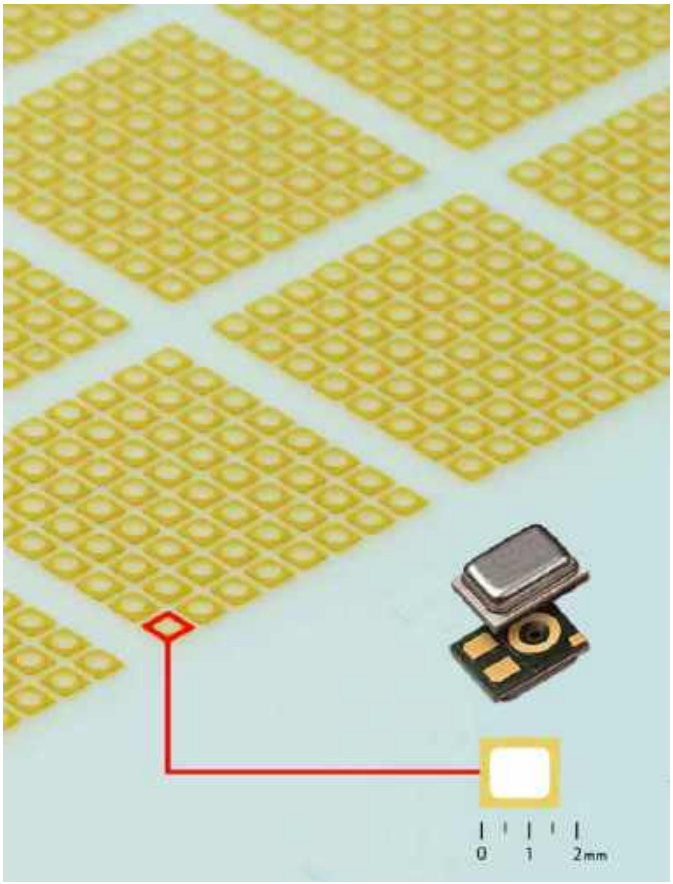
Mikrofony MEMS są kompatybilne ze standardowym lutowaniem rozpływowym (reflow) i wytrzymują typowe profile temperatur. Ważne jest jednak, by ściśle przestrzegać zaleceń dotyczących ramp temperaturowych – zbyt gwałtowne nagrzewanie lub przekroczenie temperatury szczytowej mogą uszkodzić delikatną strukturę MEMS.

Użycie topników i czyszczenie PCB

Należy unikać nadmiernej ilości topnika przy lutowaniu mikrofonów, zwłaszcza w przypadku modeli z dolnym portem akustycznym. Resztki topnika lub lotne opary mogą wnikać do wnętrza przez otwór i osadzać się na membranie, pogarszając czułość lub powodując niestabilność długoterminową. Zaleca się więc stosowanie past lutowniczych o obniżonej zawartości topnika do montażu mikrofonów typu *bottom-port*. Po lutowaniu nie należy natomiast stosować mycia ultradźwiękowego ani agresywnego czyszczenia chemicznego – płyny mogą dostać się do wnętrza sensora i go uszkodzić. Jeśli płytka musi być myta, trzeba rozważyć zatkanie otworu mikrofonu na czas czyszczenia, a następnie usunięcie zabezpieczenia po zakończeniu całego procesu. W przypadku płytek drukowanych z mikrofonami MEMS (zwłaszcza typu *bottom-port*) najlepiej więc korzystać z past *no-clean* i unikać procesów mycia, jeśli tylko jest to możliwe.

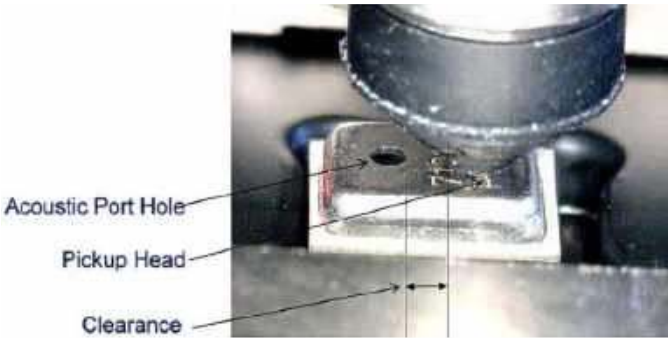
Ochrona przed zanieczyszczeniami

Także podczas eksploatacji otwór mikrofonu powinien być chroniony przed kurzem, pyłem i cieczami. W urządzeniu gotowym do pracy często stosuje się akustyczne filtry membranowe (np. z materiału GORE-TEX – **fotografia 7**), naklejane na otwór w obudowie

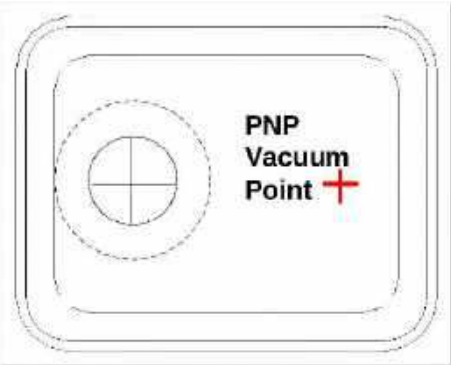


Fotografia 7. Membrany ochronne GORE-TEX (https://t.ly/8LwGu)

eprasa.pl ef7662c802



Fotografia 8. Widok głowicy automatu pick & place podczas pobierania mikrofonu MEMS z taśmy (https://t.ly/e1vyL)



Rysunek 15. Oznaczenie miejsca zalecanego przyłożenia przyssawki automatu montażowego (https://t.ly/e1vyL)

urządzenia lub bezpośrednio na kapsułę mikrofonu typu *top-port*. Filtry te przepuszczają fale akustyczne, ale skutecznie zatrzymują cząsteczki kurzu i krople wody, zapewniając wysoki stopień ochrony (oczywiście tylko wtedy, gdy cała reszta urządzenia jest również właściwie zaprojektowana pod kątem szczelności). Pewną alternatywą są wspomniane już mikrofony piezoelektryczne MEMS, które z natury swojej konstrukcji są znacznie mniej wrażliwe na zanieczyszczenia.

Technika pick & place

Przy automatycznym montażu SMT mikrofonów z górnym portem należy zwrócić uwagę, by dysza podciśnieniowa pobierająca element nie zasłaniała otworu akustycznego mikrofonu. Chwycenie komponentu dyszą próżniową w pobliżu otworu może uszkodzić membranę poprzez działanie nagłej różnicy ciśnień. Producenci często wskazują w dokumentacji zalecane punkty trzymania – np. obszar obudowy oznaczony symbolem, z dala od otworu (**fotografia 8**, **rysunek 15**). Czasem można nawet spotkać się z propozycjami specjalnych końcówek chwytających, dostosowanych do obsługi danego modelu mikrofonu.

Przegląd parametrów i charakterystyk mikrofonów MEMS

Podobnie jak tradycyjne przetworniki pasywne, także mikrofony MEMS opisuje się szeregiem parametrów elektryczno-akustycznych. Poniżej omówimy pokrótce najważniejsze z nich.

- **Czułość** określa napięcie wyjściowe (w przypadku mikrofonów analogowych) lub poziom liczbowy (w przypadku cyfrowych), generowany przez mikrofon przy zadanym poziomie ciśnienia akustycznego. Standardowo podaje się czułość przy 94 dB SPL (tj. przy pobudzeniu falą sinusoidalną o ciśnieniu 1 Pa i standardowej częstotliwości testowej równej 1 kHz). Przykładowy mikrofon o czułości –38 dBV, wystawiony na działanie źródła dźwięku o SPL równym 94 dB, wygeneruje sygnał o wartości skutecznej około 12,6 mV. W przypadku mikrofonów cyfrowych czułość jest wyrażona w dBFS (decybelach odniesionych do pełnej skali). Najczęściej spotykana w notach katalogowych wartość –26 dBFS @ 94 dB SPL oznacza, że przy ciśnieniu 1 Pa sygnał cyfrowy ma wartość –26 dB względem maksymalnego kodu, który może zwrócić przetwornik ADC. Innymi słowy, pozostaje pewien margines do stanu przesterowania – typowo mikrofony cyfrowe są tak skalibrowane, by w spodziewanych warunkach pracy mieć jeszcze pewien zapas dynamiki, zanim sygnał osiągnie 0 dBFS (szczyt pełnej skali).
- **Stosunek sygnał/szum (SNR)** definiowany jest zwykle przy sygnale o SPL równym 94 dB @ 1 kHz i odniesiony do szumu własnego mikrofonu. Typowe mikrofony MEMS osiągają SNR rzędu 59...65 dB(A). Dostępne są także modele o wyższym SNR – wspomniany już mikrofon optyczny SBM100 osiąga stosunek sygnał-szum na poziomie aż 80 dB.
- **Pasmo przenoszenia** – większość mikrofonów MEMS jest zoptymalizowana pod kątem pasma mowy, tj. od około 100 Hz do 10...20 kHz. Typowe charakterystyki wykazują spadek czułości poniżej 100 Hz (np. –6 dB przy 50 Hz) i pewien wzrost w wyższej części pasma akustycznego, często z rezonansowym pikiem leżącym na granicy lub powyżej pasma akustycznego (wynikającym z rezonansu Helmoltza w komorze przedniej mikrofonu).
- **Zakres dynamiki** mikrofonu to różnica między poziomem szumu własnego a maksymalnym poziomem dźwięku, jaki układ może zarejestrować. Górny limit zakresu jest wyznaczony przez osiągnięcie THD równego 10% i nosi nazwę punktu przeciążenia akustycznego (ang. AOP – *Acoustic Overload Point*). Nowoczesne mikrofony mają parametr AOP na poziomie 120...130 dB SPL, przy szumie własnym ok. 30 dB SPL, co daje dynamikę rzędu 90...100 dB. Model ICS-40638 marki InvenSense oferuje szczególnie wysoki AOP (138 dB SPL), co – przy poziomie szumu 31 dB – daje aż 107-decybelowy zakres dynamiki. A to nie lada osiągnięcie zważywszy na fakt, że już 130 dB SPL to poziom porównywalny z... hałasem startującego odrzutowca.
- **Napięcie zasilania i pobór prądu** – mikrofony MEMS podążają za standardami wyznaczonymi przez współczesne systemy wbudowane. Dlatego też większość układów jest projektowana do pracy przy napięciu od 1,5...1,8 V do 3,6 V, co pozwala na bezpośrednie podłączenie do głównej linii zasilania procesora. Starsze modele (oraz niektóre wciąż produkowane analogowe) wymagają natomiast napięcia 3,0...3,3 V. Pobór prądu różni się znacznie w zależności od zastosowanej technologii, rodzaju wyjścia i oczywiście – konkretnego modelu. Energooszczędne mikrofony MEMS mogą pracować już przy średnim poborze prądu na poziomie 60...70 μA, ale wiele układów dostępnych na rynku pobiera w czasie normalnej pracy kilkaset mikroamperów lub więcej.

Podsumowanie

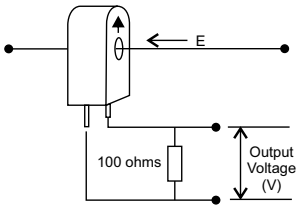
Mikrofony MEMS znalazły zastosowanie w ogromnej liczbie urządzeń – od smartfonów i laptopów (gdzie często można doliczyć się kilku sztuk, które umożliwiają odbiór stereo lub zaawansowaną redukcję szumów), poprzez sprzęt AGD z funkcją asystenta głosowego, aż po aparaturę medyczną, a nawet profesjonalne systemy pomiaru dźwięku. Ich niewielkie rozmiary, niski pobór mocy i proste podłączenie (zwłaszcza poprzez wyjście cyfrowe) sprawiają, że mikrofony półprzewodnikowe są idealnym wyborem dla współczesnej elektroniki nasłuchującej otoczenie. Dla projektanta kluczowe jest zrozumienie różnic między dostępnymi typami interfejsów oraz przestrzeganie zaleceń montażowych – wtedy implementacja mikrofonu MEMS przebiegnie bezproblemowo, a urządzenie zyska czuły „słuch" na miarę XXI wieku.

inż. Przemysław Musz, EP

eprasa.pl ef7662c802

Masa nieco inaczej

Masa kojarzy nam się z czymś dużym, ciężkim i... niemożliwym do pominięcia. Przez wiele lat w elektronice tym pojęciem określano zarówno potencjał odniesienia, względem którego mierzone są wszystkie napięcia, jak i linię o niskiej impedancji, do której spływają wszystkie prądy. Tylko czy aby na pewno trzeba te dwa ujęcia łączyć nierozerwalnie?



Rysunek 2. Typowe podłączenie przekładnika prądowego [1]

Wszyscy przyzwyczailiśmy się do oznaczania masy na schemacie typowymi „stopkami", często opatrzonymi oznaczeniem GND, jak chociażby na fragmencie schematu z **rysunku 1**. Jest to informacja dla wszystkich, którzy ów schemat czytają, że węzły w ten sposób oznaczone należy połączyć ze sobą – tak w głowie, obrazowo. Są one połączone również fizycznie w układzie. W teorii masa jest ekwipotencjalna, czyli każdy jej punkt ma taki sam potencjał. W praktyce różnie z tym bywa, a mogą się o tym przekonać ci, którzy projektowali obwody kluczujące wysokie prądy…

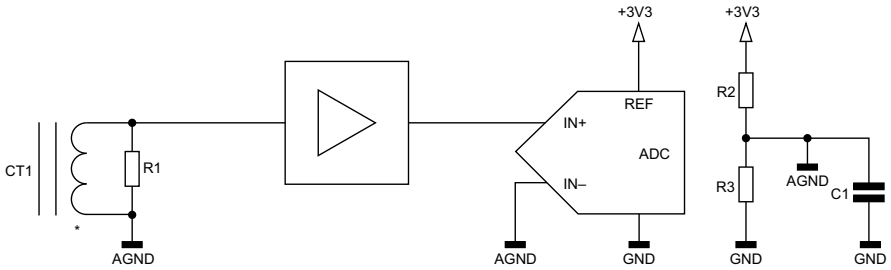
Jednak nie o tym jest dzisiejszy odcinek „Notatnika Konstruktora". Utarło się bowiem również przekonanie, niebezpodstawne zresztą, że masa jest węzłem mającym potencjał odniesienia (0 V) dla wszystkich napięć w układzie. Na dawniejszych schematach bywały zresztą umieszczone adnotacje w stylu „wszystkie napięcia mierzone względem masy woltomierzem o oporności…", co jasno dawało do zrozumienia, gdzie należy przyłożyć czarną sondę multimetru. Ponadto w urządzeniach konstruowanych na metalowym chassis, bądź z płytkami obudowanymi w metalowe ramki (jak w dawnych telewizorach), właśnie owe metalowe fragmenty pełniły funkcję połączenia o niskiej impedancji.

Jednak nie we wszystkich sytuacjach takie rozumienie masy ma sens. Jako przykład wezmę sygnał z czujnika analogowego, konkretniej z przekładnika prądowego. Typowy przekładnik prądowy pracuje pod obciążeniem rezystancyjnym, wynoszącym np. 50 Ω, jak na **rysunku 2**. Dzięki temu prąd indukowany w jego uzwojeniu powoduje powstawanie napięcia na tymże rezystorze, o takim samym kształcie co ów prąd i z minimalnym przesunięciem fazowym, wynikającym z indukcyjności tegoż uzwojenia. W porządku, ale do czego ta masa?

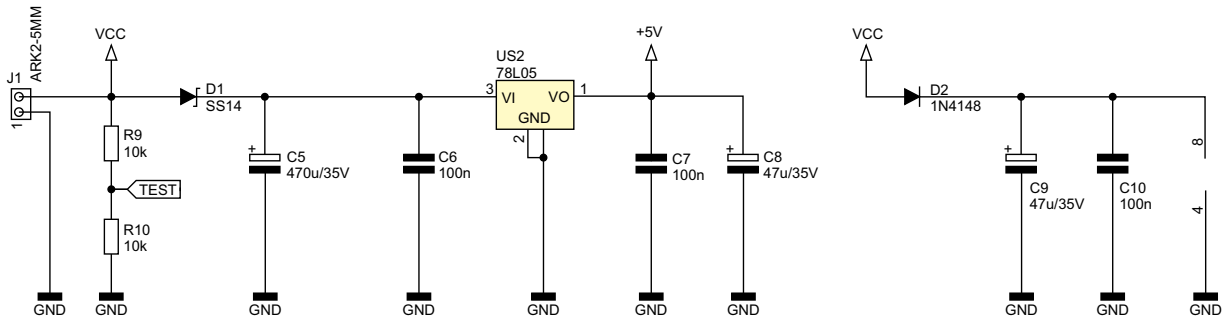
Wyobraźmy sobie, że mikrokontroler miałby ten sygnał na bieżąco, cyklicznie, mierzyć. Wartość chwilowa tego przebiegu służyłaby do późniejszego wyznaczenia chociażby wartości skutecznej prądu. Trzeba ten sygnał, o amplitudzie rzędu kilkudziesięciu miliwoltów, odpowiednio wzmocnić oraz dopasować do wejścia przetwornika analogowo-cyfrowego mikrokontrolera. Najprostszym rozwiązaniem w tej sytuacji byłoby podniesienie potencjału jednego z wyprowadzeń przekładnika do wartości równej połowie napięcia odniesienia przetwornika, czyli chociażby napięcia zasilającego ów mikrokontroler, jak na **rysunku 3**. Potem ową składową stałą można wprowadzić na wejście odwracające tegoż przetwornika, by odjął on tę składową stałą przy każdorazowym obliczaniu wyniku przetwarzania. Takie rozwiązanie ma również zaletę w postaci przenoszenia składowej stałej przez tor przetwarzania analogowego, przez co amplituda sygnału nie zostaje w żaden sposób stłumiona.

Jaki ma to związek z moim wstępem na temat mas? Otóż w tym układzie istnieją dwa węzły odniesienia, których potencjały można nazwać masami. Pierwszym, takim dosyć oczywistym, jest ujemny zacisk źródła zasilania, na przykład „–" akumulatora. Względem tego potencjału jest ustalane napięcie zasilające mikrokontroler czy mnóstwo innych wielkości w urządzeniu. Drugą masę, którą można byłoby nazwać analogową, stanowi wyjście wtórnika napięciowego dzielącego napięcie zasilające przetwornik A/C na pół. Różnica potencjałów między wymienionymi masami jest stała i wynosi około 1,65 V (w przypadku mikrokontrolera zasilanego napięciem 3,3 V).

Czemu o tym piszę? Spotkałem się w swojej praktyce z przypadkami pomiaru napięć zawsze względem masy zasilacza. Ma to sens w większości przypadków, lecz próba oszacowania np. offsetu napięciowego wzmacniacza z **rysunku 3** nie uda się ani trochę, bowiem zarówno na wejściu, jak i na wyjściu wzmacniacza woltomierz pokaże zawsze tę samą wartość, wynoszącą około

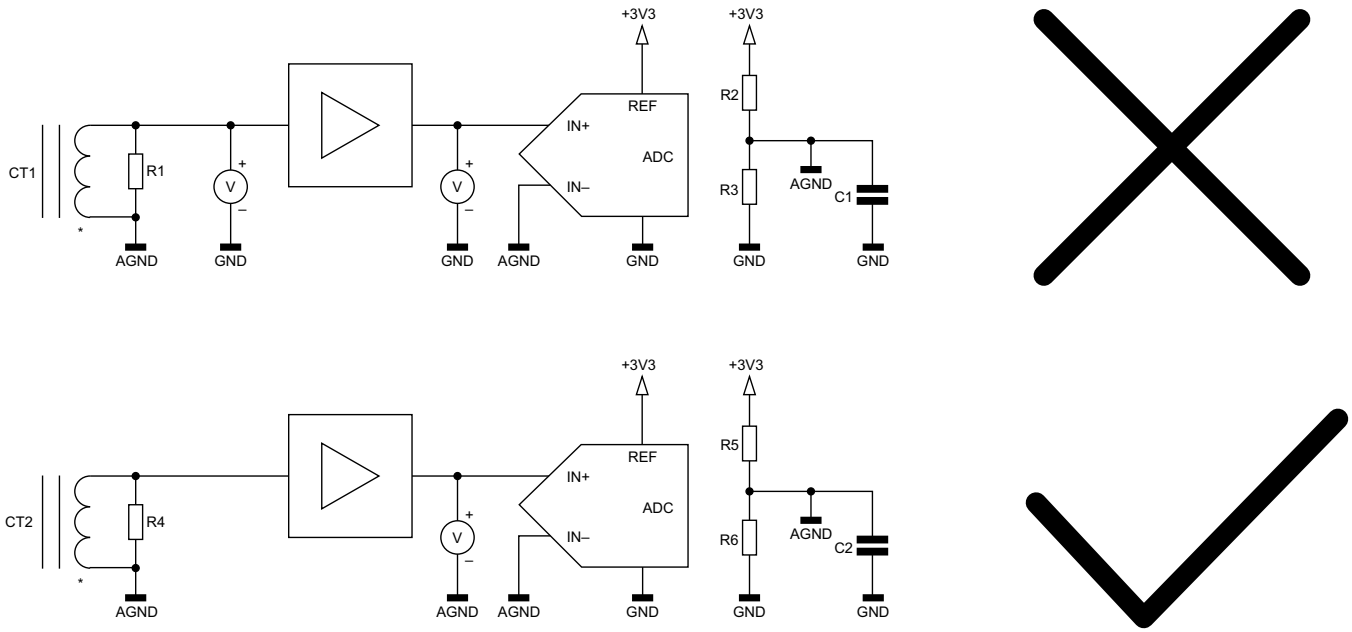


Rysunek 3. Nadanie składowej stałej sygnałowi i wprowadzenie jej do przetwornika A/C



Rysunek 1. Przykładowy schemat narysowany z wykorzystaniem symboli masy

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 4. Zmiana węzła odniesienia upraszcza pomiar offsetu napięciowego

1,65 V. Czynione są później straszne zabiegi, mające na celu obliczenie tego offsetu na podstawie ostatniej, fluktuującej cyfry na wyświetlaczu multimetru, przez co o jakiejkolwiek sensownej dokładności tego pomiaru można zapomnieć. Ustalenie offsetu może się udać dopiero po zmianie punktu odniesienia, czyli po przyłożeniu ujemnej sondy woltomierza do opisanej wyżej masy analogowej, a dodatniej do wyjścia tego wzmacniacza, jak na **rysunku 4**. Wtedy już jak najbardziej wprost zmierzymy offset napięciowy wzmacniacza, który wyniesie np. +2,3 mV, bez konieczności uwzględniania dodatkowej składowej stałej, z którą nie wiadomo co począć. Zagadnienie niby proste i oczywiste, ale niekiedy całkowicie pomijane w codziennej, zabieganej praktyce.

Michał Kurzela, EP

Źródła:

[1] https://t.ly/OrGf9

REKLAMA

eprasa.pl ef7662c802

Oszczędzanie energii w teorii i w praktyce (9)

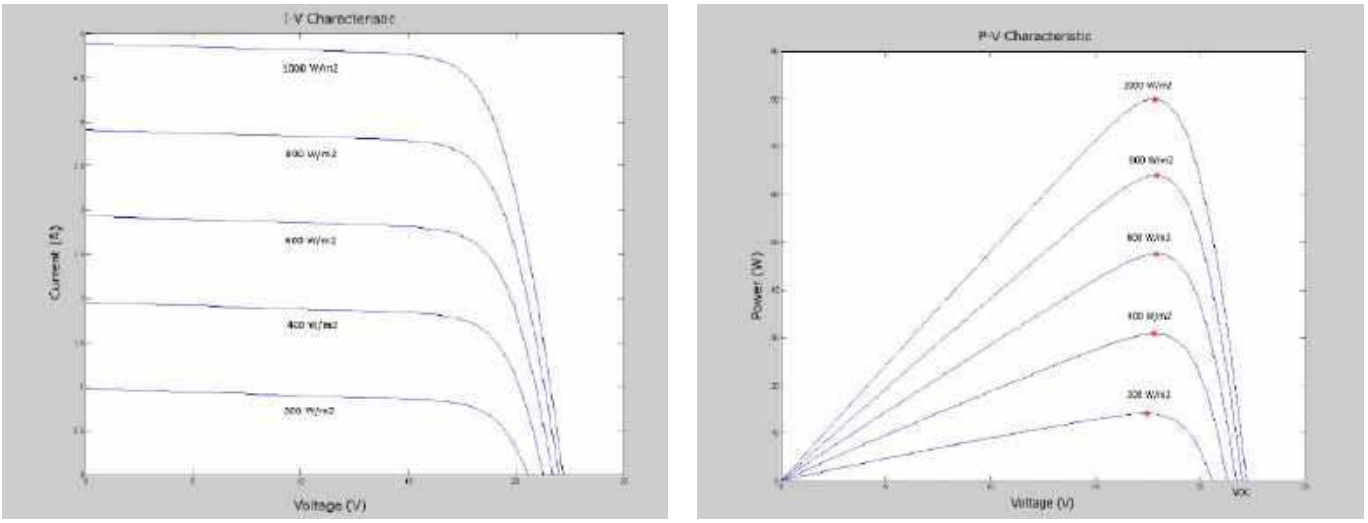
W poprzedniej części cyklu omawialiśmy użycie sieci GSM i przykładową płytkę GSM/GPS AND Technologies BK-A7970 z modułem SIMCOM A7670E. W tym odcinku jednak, zamiast zapowiedzianych pomiarów tego modułu, zajmiemy się nieco innym tematem: wykorzystaniem alternatywnych, odnawialnych źródeł energii do zasilania urządzeń elektronicznych. Te źródła były wprawdzie wspomniane w jednym z wcześniejszych artykułów, ale nie zostały wtedy omówione dokładnie. Przyjrzyjmy się im zatem, a do pomiarów modułu GSM wrócimy w przyszłości.

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

Gdy urządzenie znajduje się w miejscu trudno dostępnym, pozbawionym konwencjonalnych źródeł zasilania, do wyboru są trzy bazowe rozwiązania: ogniwa fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe oraz różne generatory oparte na rozpadzie promieniotwórczym. W tej trzeciej kategorii mieszczą się radioizotopowe generatory termoelektryczne (RTG), używane niegdyś do zasilania radiolatarni i stacji pogodowych, generatory Stirlinga (korzystające z rozpadu nuklearnego jako źródła ciepła), oraz nowa technologia rozwijana od kilku lat i dostępna tylko dla nielicznych firm i instytucji badawczych: baterie betawoltaiczne. Twórcy tej technologii sugerują niebywałą żywotność tego rodzaju źródeł energii, ale dostępne obecnie generatory nie przekraczają mocy 100 μW, co przy przykładowym napięciu 3 V daje maksymalny prąd około 33 μA. Z oczywistych względów nie zajmiemy się więc źródłami opartymi o radioizotopy. Zamiast tego przyjrzyjmy się na początek konwencjonalnym i łatwo dostępnym ogniwom fotowoltaicznym.

Energia ze słońca

Ogniwa fotowoltaiczne jako źródło zasilania są używane od kilku dekad, na początku jednak technologia ta była zarezerwowana dla satelitów i sond kosmicznych. Z czasem ogniwa te zaczęły pojawiać się na rynku konsumenckim i to tam, gdzie energooszczędność była istotna: w zegarkach naręcznych i kieszonkowych kalkulatorach. Pobór prądu tego rodzaju urządzeń mieści się często w zakresie dziesiątek lub setek mikroamperów, więc nawet niewielki zestaw szeregowo połączonych ogniw wystarcza, by nie tylko zapewnić zasilanie na bieżące potrzeby, ale też doładować akumulator, jeśli takowy występuje w danej konstrukcji. Obecnie jednak technologia fotowoltaiczna stanowi ważny element rynku OZE (odnawialnych źródeł energii) – w 2023 roku odpowiadała za 5,5% globalnej produkcji energii, a w 33 krajach jej lokalny udział wynosił ponad 10%. W 2024 roku w Polsce produkcja energii elektrycznej z systemów fotowoltaicznych stanowiła 9% ogólnej produkcji energii. Ta technologia jest na tyle popularna, że koszty ogniw i kompletnych paneli w ostatnich latach znacząco spadły, a dla eksperymentujących hobbystów dostępne są używane panele i inne komponenty systemu PV w cenach stanowiących ułamek kosztów nowych elementów. Typowe, komercyjnie dostępne ogniwa i panele fotowoltaiczne mają sprawność 15...20%, tj. tylko taki procent energii promieniowania Słońca zamieniany jest



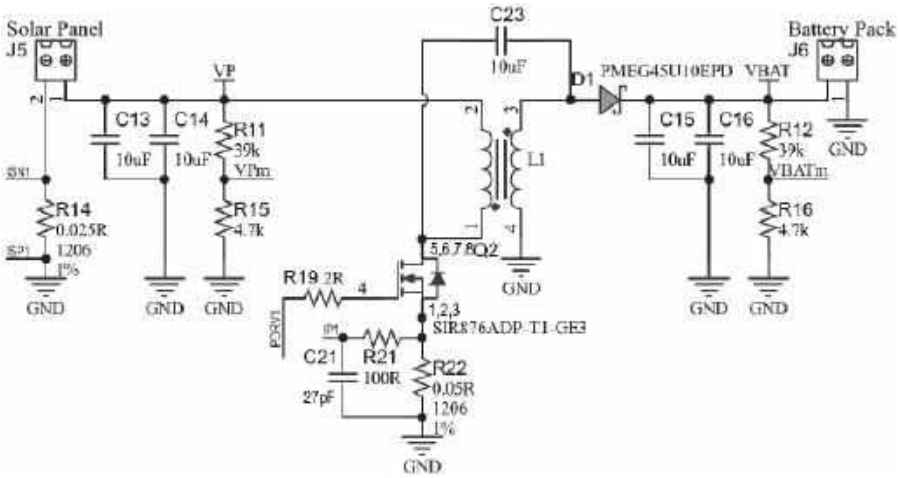
Rysunek 1. Charakterystyka I(U) (a) i P(U) (b) ogniwa fotowoltaicznego, w zależności od poziomu nasłonecznienia (za notą aplikacyjną AN1521)

eprasa.pl ef7662c802

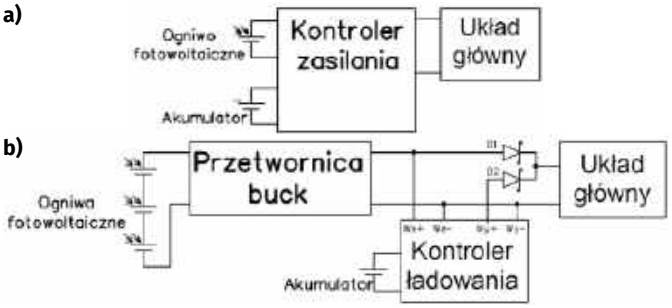
na energię elektryczną. Oznacza to, że z jednego metra kwadratowego ogniw można uzyskać 150...200 W energii elektrycznej. Nas jednak interesować będą ogniwa znacznie mniejsze. Napięcie pojedynczego ogniwa wynosi 0,5...0,6 V bez obciążenia, dlatego poszczególne elementy łączy się szeregowo (w celu uzyskania wyższych napięć) oraz równolegle (dla wyższych prądów).

Rysunek 1 pokazuje charakterystyki I(U) oraz P(U) ogniwa fotowoltaicznego. Na charakterystyce P(U) zaznaczono punkty maksimum mocy dostarczanej przez ogniwo. W celu maksymalizacji sprawności stosuje się technikę o nazwie MPPT (ang. *Maximum Power Point Tracking*), czyli śledzenie punktu mocy maksymalnej. Technika ta bazuje na przetwornicy impulsowej, ale poza stabilizacją napięcia wyjściowego jej kontroler mierzy też napięcie i prąd wejściowy – i tak reguluje pracę przetwornicy, by iloczyn zmierzonych parametrów osiągał maksymalną możliwą wartość. Uproszczony schemat głównego toru zasilania takiej przetwornicy widać na **rysunku 2**. R14 to bocznik do pomiaru prądu ogniwa, zaś dzielnik napięcia na rezystorach R11 i R15 kontroluje napięcie panelu. Dzielnik R12-R16 pozwala na pomiar napięcia wyjściowego przetwornicy, czyli napięcia podanego na pakiet akumulatorów (wyposażony we własny kontroler ładowania). Sama przetwornica w topologii flyback składa się z dławika sprzężonego L1, tranzystora kluczującego dużej mocy Q2 oraz diody D1. R22 i elementy współtowarzyszące pozwalają mierzyć prąd płynący przez dławik, co pośrednio chroni przetwornicę w razie zwarcia na wyjściu. Kontroler na bieżąco reguluje wypełnienie sygnału sterującego tranzystorem Q2 tak, by stabilizować napięcie wyjściowe, jednocześnie maksymalizując moc pobieraną z ogniw fotowoltaicznych. Pomiar prądu płynącego przez Q2 i dławik chroni też układ przed przeciążeniem. Warto pamiętać, że nie jest konieczne stosowanie przetwornicy typu flyback – w tej aplikacji sprawdzi się dowolna inna topologia, od przetwornicy typu buck, po przetwornicę pełnomostkową, zależnie od potrzebnej mocy.

Przetwornice MPPT są szczególnie istotne tam, gdzie zachodzi potrzeba maksymalizacji sprawności instalacji, co ma znaczenie w produkcji energii na dużą skalę. W przypadku małych, energooszczędnych urządzeń takie rozwiązanie może jednak niepotrzebnie zwiększać koszty. Zamiast niego można podłączyć ogniwa bezpośrednio do układu, jak robi się to w przypadku niewielkich urządzeń wspomnianych na początku artykułu, albo pośrednio – przez kontroler zasilania – by móc przełączać się między trybem fotowoltaicznym lub bateryjnym. Do układów wykorzystujących akumulator zamiast baterii istnieją dwa inne rozwiązania stosowane powszechnie i pokazane na **rysunku 3**. W pierwszym z nich (rysunek 3a) ogniwo podłączone jest do kontrolera zasilania, z którym współpracuje też akumulator. Wyjście kontrolera zasila główny układ, a kontroler dba o ładowanie akumulatora i przełącza zasilanie między ogniwem fotowoltaicznym a akumulatorowym, gdy napięcie ogniwa będzie za niskie. Rozwiązanie z rysunku 3b jest wbrew pozorom prostsze w realizacji. Ogniwo o wyższym niż potrzebne napięciu wyjściowym podłączone jest z przetwornicą typu buck, a ta zasila kontroler ładowania akumulatora z zabezpieczeniami, na przykład tani i popularny moduł na układach TP4055 i DW01. Napięcie z przetwornicy trafia przez diodę D1 do głównego układu, podobnie jak napięcie wyjściowe z kontrolera ładowania przez diodę D2. Tak długo, jak napięcie na anodzie D1 jest wyższe od napięcia na anodzie D2, a ogniwo i przetwornica są w stanie dostarczyć więcej prądu niż potrzebują razem układ główny i kontroler ładowania, układ główny będzie zasilany energią słoneczną. Gdy przetwornica nie będzie w stanie dostarczyć wystarczająco dużo energii, dioda D1 przestanie przewodzić, a załączeniu ulegnie dioda D2, czerpiąc energię z akumulatora. Co więcej, gdy napięcie na wejściu kontrolera ładowania spadnie poniżej wymaganej wartości minimalnej, kontroler sam przerwie proces ładowania, i wznowi go, gdy to napięcie będzie znów wystarczająco wysokie. W przypadku układu TP4056 napięcie minimalne wynosi 4,5 V. Jeśli kontroler ładowania akumulatora nie ma układu zabezpieczeń, anodę D2 można podłączyć bezpośrednio do niego, ale w razie na wyjściu może to doprowadzić do uszkodzenia akumulatora, a nawet wywołać pożar. Ten ostatni scenariusz jest szczególnym problemem, jeśli urządzenie służy do prowadzenia telemetrii (na przykład w lesie) lub jest umieszczone na ciele zwierzęcia – jak „plecaki" telemetryczne zakładane niektórym sokołom wędrownym i innym dzikim ptakom (**fotografia 1**).



Rysunek 2. Przetwornica MPPT z transformatorem. Schemat pochodzi z noty AN5846

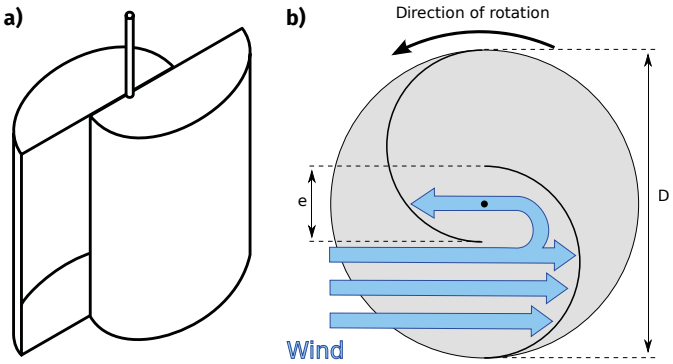


Rysunek 3. Dwa rozwiązania zasilania fotowoltaicznego małej mocy: z kontrolerem zasilania (a) i modułem ładowania akumulatorów z zabezpieczeniem oraz przełącznikiem diodowym (b)

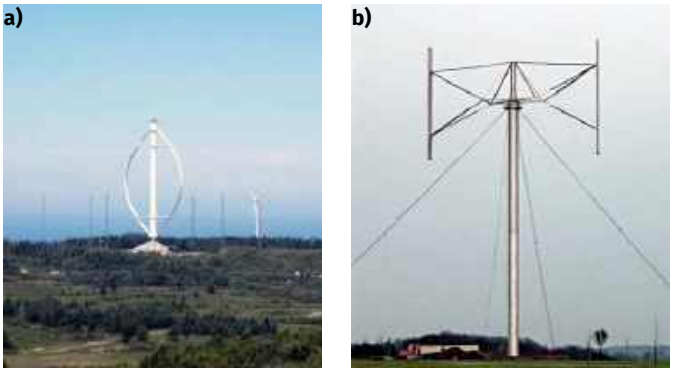
Fotografia 1. Młody sokół z plecakiem telemetrycznym. Lublin, 2024

eprasa.pl ef7662c802

Fotografia 2. Elektrownia słoneczna Gemasolar skupia światło słoneczne na umiejscowionym na szczycie wieży zbiorniku ze stopioną solą, który jest termalnym magazynem energii, wytwarzającym parę wodną pod ciśnieniem dla turbin napędzających generatory



Rysunek 4. Turbina Savoniusa: wygląd ogólny (a) oraz przekrój przez turbinę z uwidocznioną zasadą działania (b)



Fotografia 3. Turbiny Darrieusa: klasyczna „trzepaczka do jaj" (a) oraz turbina z pionowymi łopatami (b)

Na rynku dostępne są gotowe panele w różnych rozmiarach i o różnych napięciach wyjściowych, od ogniw 2 V, przez 6 V, 12 V, nawet do 48 V. Dostępne moce wynoszą od niecałego wata do 240 W (w przypadku dużych paneli, przeznaczonych do systemów PV). Czytelnika jednak zainteresują najpewniej małe panele o mocy od 0,35 W do 1,5 W. Warto pamiętać, że panele fotowoltaiczne uzyskują maksymalną moc dopiero przy ustawieniu prostopadle do Słońca. Teoretycznie można zbudować obrotnicę paneli, by te znajdowały się zawsze w optymalnym nasłonecznieniu, ale takie rozwiązania nie są opłacalne zarówno w przypadku małych paneli, jak i dużych instalacji komercyjnych. Z powodu konieczności zachowania odpowiedniej orientacji względem Słońca, pomysły w rodzaju solarnych dróg, ścieżek rowerowych czy nawet torów kolejowych (sic!) należy rozpatrywać raczej w kategorii „sztuka dla sztuki", a nie jako praktyczne rozwiązanie nieistniejącego problemu – dachy budynków nadają się do fotowoltaiki dużo lepiej, a wykonanie paneli, które nie muszą znosić ciężaru ruchu drogowego czy pieszego oraz wibracji związanych z przejazdem pociągów tuż nad nimi, jest zdecydowanie dużo tańsze, prostsze i praktykowane od kilku dekad.

Ogniwa fotowoltaiczne nie są jedyną metodą wykorzystania energii słonecznej. Można też skupić światło słoneczne za pomocą luster w jednym punkcie lub obszarze w celu wytworzenia wysokiej temperatury. Koncept ten jest wykorzystywany w piecach słonecznych, zdolnych osiągać temperatury wykraczające daleko poza możliwości innych metod. Właśnie na tej zasadzie działa elektrownia Gemasolar w Hiszpanii, która skupia światło słoneczne na zbiorniku zawierającym stopioną sól. Ta zaś następnie ogrzewa wodę wytwarzając przegrzaną parę, która napędza turbiny w typowym cyklu pracy, znanym z innych elektrowni. Znamionowa moc elektrowni Gemasolar wynosi 19,9 MWh, a zbiornik stopionej soli może zgromadzić 299 MWh energii. Elektrownię pokazano na **fotografii 2**. Być może mniejsze rozwiązania, oparte na przykład o silnik Stirlinga, mogłyby posłużyć do wytwarzania energii elektrycznej dla pojedynczych gospodarstw domowych.

Energia wiatru

Drugim popularnym źródłem energii odnawialnej są turbiny wiatrowe. Na rynku dostępne są rozwiązania o mocach od kilkuset watów do dziesiątek megawatów. Turbiny wiatrowe dzielą się na dwa podstawowe rodzaje: HAWT (ang. *Horizontal Axis Wind Turbine*) – turbiny o poziomej osi obrotu, oraz VAWT (ang. *Vertical Axis Wind Turbine*) – turbiny o pionowej osi obrotu. Turbiny HAWT to bardziej tradycyjne rozwiązania, o sporej wydajności, których moc jest proporcjonalna do pola powierzchni śmigła i kwadratu prędkości wiatru. Startują same i same ustawiają się prostopadle do wiatru dzięki aerodynamicznemu kształtowi obudowy, która zachowuje się jak statecznik pionowy samolotu. Duże, komercyjne turbiny wiatrowe mają wbudowany mechanizm hamujący i zmieniający kąt natarcia łopat śmigła, gdyż przy zbyt dużej prędkości wiatru turbina mogłaby zostać rozerwana przez naprężenia wywołane siłą odśrodkową. Turbina tego typu ma też inny problem: turbulencje na końcach śmigła ograniczające wydajność i wytwarzające nieprzyjemny dźwięk. Duże turbiny wiatrowe osiągają typowy poziom głośności u podstawy około 60 dB. 500 metrów od turbiny wartość ta spada do około 38 dB i często znika pośród innych dźwięków otoczenia.

Turbiny VAWT dzielą się na dwa podstawowe typy: turbiny Savoniusa i Darrieusa. Turbina Savoniusa ma niższą sprawność i prędkość obrotową, ale pracuje przy niższych prędkościach wiatru i startuje samodzielnie. **Rysunek 4** pokazuje poglądowy schemat budowy turbiny tego typu i jej zasadę działania. Moc maksymalna takiej turbiny jest wprost proporcjonalna do iloczynu wysokości rotora, jego średnicy oraz trzeciej potęgi prędkości wiatru. Konstrukcja jest na tyle prosta, że małe modele, o mocach liczonych w pojedynczych watach, można bezproblemowo wykonać metodą druku 3D. Turbiny Darrieusa mają wyższą sprawność, ale potrzebują wyższej prędkości wiatru. W ich wypadku łopaty mają profil skrzydła samolotu i wiatr nie naciska na turbinę, jak w przypadku turbin Savoniusa, lecz wytwarza siłę nośną, która jest przekształcana na ruch obrotowy turbiny. Konstrukcje tego typu mają kilka różnych form, od klasycznej „trzepaczki do jaj" (**fotografia 3a**), do rotora z prostymi skrzydłami (**fotografia 3b**). Istnieją też formy pośrednie, w których łopaty są skręcone helikalnie, czasami tworząc kształt z fotografii 3a, a czasem pozostają umocowane jak na fotografii 3b. Turbiny Darrieusa z reguły nie startują samodzielnie, dlatego często łączy się je z niewielką turbiną Savoniusa. Na **fotografii 4** widać turbinę hybrydową Savonius-Darrieus, która pracuje już przy niskich prędkościach wiatru, ale osiąga znacznie lepszą wydajność przy wysokich. Elementy Savoniusa często w takich konstrukcjach są odsprzęgane od osi rotora, gdy prędkość obrotowa elementów Darrieusa jest wyższa, niż prędkość elementów Savoniusa. Dzięki temu dysproporcje w prędkości nie spowalniają całej turbiny.

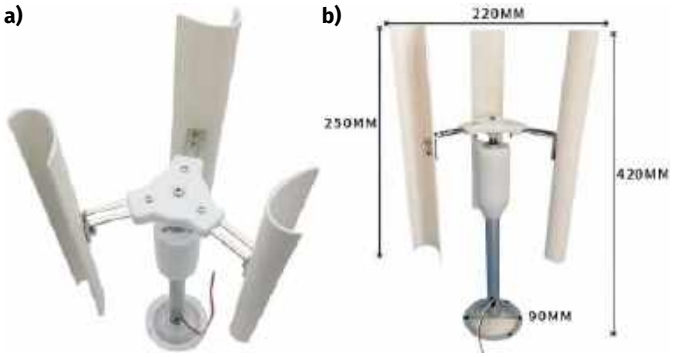
eprasa.pl ef7662c802

Fotografia 4. Hybrydowa turbina Savonius-Darrieus używana na Tajwanie

Turbiny o pionowej osi stawiają mniejsze wymagania konstrukcyjne, gdyż nie dość, że nie wymagają ustawiania prostopadle do kierunku wiatru, to w dodatku generator może znajdować się w podstawie, co znacząco ułatwia serwisowanie. Turbiny te nie wymagają też budowy wysokich wież, generują mniej hałasu i tolerują nieco wyższe prędkości wiatru, choć przy huraganach również wymagają hamowania. Konieczność dodania mechanizmu startowego w turbinach Darrieusa jest ich sporą wadą, podczas gdy turbiny Savoniusa mają prędkość obrotową ograniczoną przez prędkość wiatru i związaną z nią liniowo.

Pewną ciekawostką w branży wytwarzania energii jest instalowanie turbin Savoniusa obok torów kolejowych. Przejazd pociągu wytwarza wystarczający pęd powietrza, by rozkręcić taką turbinę do znacznej prędkości. Z jednej strony odzyskuje się w ten sposób energię, którą pociąg już pobrał z sieci trakcyjnej i która w normalnych okolicznościach uległaby rozproszeniu. Z drugiej strony trudno określić czy opór, jaki stawia taka turbina (lub cały ich szereg wzdłuż torów) nie spowoduje wzrostu oporu powietrza, co z kolei zwiększy pobór energii z sieci trakcyjnej. Innym ciekawym rozwiązaniem jest montowanie turbin Savoniusa poziomo, tuż za krawędzią dachu wieżowca. Wiatr uderzający w ścianę budynku tworzy silny strumień powietrza skierowany do góry, właśnie po tej ścianie. Strumień ten można z powodzeniem przekierować do turbiny. Wadą rozwiązania jest wątpliwa estetyka i konieczność montażu takich turbin czy wiatrołapów na każdej krawędzi dachu wieżowca. Zaletę zaś stanowi dość pewny i intensywny strumień powietrza, który bez użycia turbin pozostałby niewykorzystany.

Używanie nawet małej turbiny do zasilania energooszczędnego układu wymaga nieco innych rozwiązań, niż w przypadku ogniw fotowoltaicznych. Napięcie i prąd wytwarzane przez generator zależą od prędkości wiatru i zmieniają się przez cały czas. W małych turbinach wykorzystuje się prądnice prądu stałego lub przemiennego z magnesami stałymi, w praktyce mogą to być silniki elektryczne pracujące jako prądnice. Oczywiście do pracy



Fotografia 5. Mała turbina Darrieusa o mocy 20 W, zdolna do samodzielnego startu przy słabym wietrze – do kupienia od chińskiego producenta za nieco ponad 100 złotych: widok pod kątem (a) oraz wymiary (b). Źródło: AliExpress.com

potrzebna będzie też przekładnia, by przekształcić niską prędkość obrotową turbiny (i jej duży moment obrotowy na dużą prędkość obrotową rotora, choć z mniejszym momentem. Zależnie od tego, jakie będzie minimalne i maksymalne napięcie wytwarzane przez turbinę, można zastosować przetwornicę buck, boost lub flyback/forward by uzyskać stabilne napięcie wyjściowe. Ponieważ wiatr nie wieje ze stałą prędkością, a niekiedy w ogóle ustaje, kontroler ładowania akumulatora będzie pracował w sposób przerywany. Ponieważ jednak z reguły wiatr wieje przez przynajmniej połowę czasu (na wysokości 50 m nad ziemią nawet 90%) można założyć, że akumulator będzie zwykle bez problemu doładowywany. Wybrać jednak należy typ akumulatora, który dobrze znosi wiele cykli ładowania, jak na przykład ogniwa typu LiFePO4. Żywotność ogniw wydłuży też włączanie ładowania wtedy, gdy poziom energii spadnie poniżej 40% i wyłączanie, gdy wzrośnie powyżej 85...90%. Takie rozwiązanie znacząco wydłuża żywotność akumulatorów litowo-jonowych. Na rynku dostępne są gotowe turbiny o różnej mocy i rozmiarach – **fotografia 5** pokazuje taką turbinę produkcji chińskiej, dostarczająca napięcie do 15 V i moc do 20 W. Urządzenie kosztuje niewiele ponad sto złotych. Niezależnie od tego, jakiej konstrukcji jest turbina i jakie napięcie dostarcza, dalsze elementy systemu pozostają takie same: przetwornica, kontroler ładowania i układ przełączający zasilanie między akumulatorem, a turbiną, analogicznie do rysunku 3b. Czytelnik może się zastanawiać, czy nie miałoby sensu połączenie turbiny wiatrowej i panelu z ogniwami fotowoltaicznymi. Zdaniem Autora jest to niepotrzebne komplikowanie całości i podnoszenie kosztów, gdy nie jest to absolutnie konieczne. Lepiej zdecydować się na jedno rozwiązanie.

Podsumowanie

Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii do zasilania urządzeń w niedostępnych miejscach ma długą i chlubną tradycję, zwłaszcza gdy mowa o eksploracji kosmosu. Obecnie OZE stanowią istotną część produkcji energii na świecie. W krajach rozwijających się, jak na przykład Indie, małe, przydomowe instalacje fotowoltaiczne i turbiny wiatrowe pozwalają na zasilanie oświetlenia i ładowanie urządzeń mobilnych, gdy z jakiegoś powodu zabraknie energii w sieci energetycznej. Starsi Czytelnicy pamiętają „stopnie zasilania" w epoce PRL, mieszkańcy Ukrainy zaś doświadczają na bieżąco podobnych problemów w związku z trwającą tam wojną. Dlatego zapoznanie się z technologiami OZE, zwłaszcza w małej skali, może przydać się nie tylko przy budowie energooszczędnych urządzeń monitorujących, ale także na co dzień – spadające ceny komponentów takich systemów mogą też zachęcić do wykorzystania ich zamiast zwykłych zasilaczy czy ładowarek, także w technologii IoT czy nawet niektórych urządzeniach medycznych.

Paweł Kowalczyk, EP

eprasa.pl ef7662c802

Liniowe regulatory napięcia w wersji... cyfrowej

Na rynku układów analogowych pojawił się nowy rodzaj produktu – cyfrowy, liniowy regulator napięcia LDO. Przymiotnik „cyfrowy" odnosi się do wbudowanych funkcji telemetrii i regulacji parametrów liniowego źródła zasilania – a to wszystko zamknięte jest w bardzo kompaktowej obudowie. Takie rozwiązania znajdują zastosowanie w aplikacjach o ultraniskim poziomie szumów, m.in. w aparaturze RF i urządzeniach pomiarowych.

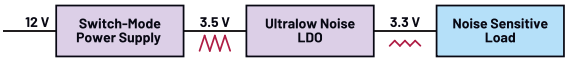
Regulatory liniowe to proste układy analogowe, w których wyższe napięcie wejściowe przekształcane jest na niższe napięcie wyjściowe. Działają one jak dynamiczny rezystor, który zawsze dostosowuje swoją wartość tak, aby utrzymać stałe napięcie wyjściowe przy określonym przepływie prądu.

Ze względu na dostępność wielu różnych, łatwych w użyciu przetwornic impulsowych – które w większości aplikacji oferują znacznie wyższą sprawność w porównaniu do LDO – regulatory liniowe są stosowane coraz rzadziej. Istnieje jednak jeden scenariusz aplikacyjny, w którym stabilizatory liniowe nadal odgrywają kluczową rolę – jest to filtrowanie napięcia generowanego przez przetwornice impulsowe. Przykład pokazano na **rysunku 1**. Zasilacz impulsowy (SMPS) generuje napięcie wyjściowe z charakterystycznymi tętnieniami. Regulator liniowy zazwyczaj oferuje dobry współczynnik tłumienia zakłóceń zasilania (PSRR), który określa zdolność układu do redukcji zakłóceń w różnych pasmach częstotliwości.

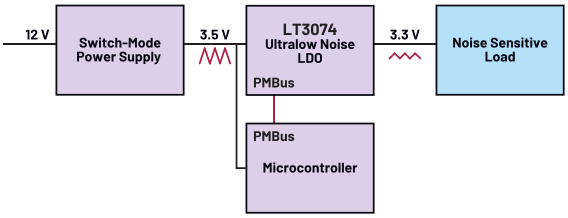
Na potrzeby aplikacji pokazanej na rysunku 1 opracowano specjalny typ regulatora liniowego – ultraniskoszumny regulator liniowy. Oprócz zachowania wysokich wartości PSRR, układy tego typu wprowadzają do układu bardzo niski poziom szumów własnych, szczególnie w paśmie niskich częstotliwości od 1 Hz do 100 kHz.

Typowe zastosowania takich źródeł zasilania o niskim poziomie szumów obejmują precyzyjne układy o dużej, jak i małej szerokości pasma, takie jak pętle synchronizacji fazowej (PLL), oscylatory sterowane napięciem (VCO), miksery, wzmacniacze niskoszumne (LNA), wzmacniacze mocy (PA), a także precyzyjne obwody pomiarowe.

W niektórych z tych implementacji przydatna może być możliwość monitorowania stanu źródła zasilania. System może wykorzystywać informacje o napięciu wejściowym, napięciu wyjściowym, prądzie obciążenia i temperaturze regulatora liniowego do potwierdzenia poprawnej pracy układu. Właśnie do takich zastosowań opracowano nowe rozwiązanie – cyfrowy stabilizator LDO.



Rysunek 1. Typowa aplikacja regulatora liniowego do filtrowania napięcia z przetwornicy impulsowej



Rysunek 2. Cyfrowy regulator liniowy do aplikacji o ultraniskim poziomie szumów

Układ zaprojektowano podobnie jak konwencjonalny, ultraniskoszumny LDO, ale wyposażono go w interfejs cyfrowy PMBus. Na **rysunku 2** pokazano system podobny do tego z rysunku 1, ale zbudowany w oparciu o cyfrowy regulator LDO typu LT3074.

Kategoria tego rodzaju produktów jest nowością. W przeszłości układy z interfejsem cyfrowym, takie jak LTC2972, można było łączyć z ultraniskoszumnym regulatorem liniowym, np. LT3041. Takie rozwiązanie zwiększało jednak powierzchnię układu i komplikowało projekt. Nowy, cyfrowy LDO, taki jak LT3074, integruje wszystkie potrzebne bloki w jednym układzie scalonym: stabilizator liniowy oraz interfejs cyfrowy, umożliwiający ustawienie parametrów regulatora (takich jak ograniczenie prądu czy napięcie wyjściowe) oraz odczyt informacji o stanie układu.

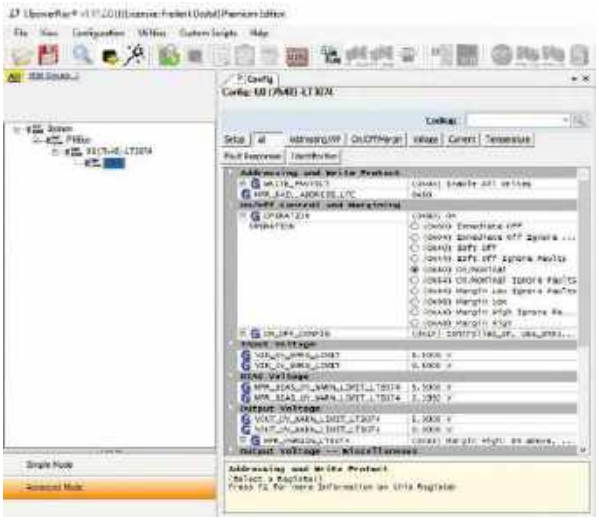
W systemie pokazanym na rysunku 2 mikrokontroler komunikuje się z LDO. Do oceny działania podsystemu zasilania można użyć LTpowerPlay – darmowego oprogramowania dostępnego na stronie analog.com. Jest to graficzny interfejs użytkownika, który komunikuje się z cyfrowym LDO za pośrednictwem interfejsu USB-PMBus.

Na koniec warto zadać pytanie: dlaczego wcześniej nie było dostępne połączenie cyfrowego interfejsu z ultraniskoszumnym LDO? Wynikało to z trudności w integracji cyfrowych układów (taktowanych sygnałem zegarowym) z technologią niskoszumnych regulatorów LDO, bez generowania zakłóceń cyfrowych w części analogowej układu scalonego. W przypadku LT3074, który charakteryzuje się szumem na poziomie 1,2 μV RMS (w zakresie od 10 Hz do 100 kHz), udało się to połączenie z sukcesem zrealizować.

Podsumowanie

Nowe osiągnięcia w dziedzinie regulatorów liniowych doprowadziły do powstania pierwszego na rynku, cyfrowego LDO. Takie układy pomogą tworzyć bardziej zaawansowane systemy w dziedzinie RF, aparatury pomiarowej oraz zastosowań medycznych. Systemy te będą bardziej niezawodne dzięki zintegrowanej funkcji telemetrii, funkcjonalne – dzięki możliwości regulacji parametrów oraz kompaktowe, za sprawą wysokiego poziomu integracji.

Frederik Dostal
Ekspert ds. zarządzania zasilaniem Analog Devices



Rysunek 3. Oprogramowanie LTpowerPlay do komunikacji z cyfrowym LDO LT3074

eprasa.pl ef7662c802

TAWOIA Glass (szkło kwarcowe)

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

BESTSELLERY sklepu AVT – sklep.avt.pl

3 unikalne serie gniazdek i włączników

Rabat dla Czytelników EP
przy zakupie podaj kod **EP2505GW**

-5%

Rabat dla Prenumeratorów EP
przy zakupie podaj numer prenumeraty

-10%

Ceramic Loft (ceramika)

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

Retro PRL (bakelit)

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

eprasa.pl ef7662c802

Internet Rzeczy w pomiarach środowiskowych (20)

Obsługa czujnika BME688 w języku C++ z użyciem rdzenia RISC-V procesora RP2350

Autonomiczne układy wymagają optymalnego zarządzania pobieraną mocą zasilania. Przy typowej organizacji pracy, polegającej na wykonaniu odczytu z czujników i jego przetwarzaniu co pewien czas, optymalnym rozwiązaniem jest wyłączanie (w czasie oczekiwania na następny pomiar) wszystkich nieużywanych elementów, w tym wielu modułów procesora. Bardzo dobrze nadaje się do tego celu procesor RP2350 firmy Raspberry Pi.

Celem projektu było opracowanie autonomicznego i energooszczędnego systemu badania stężenia dymu w celu wykrywania pożaru. Wyniki pomiarów powinny być wyświetlane w sposób czytelny na wyświetlaczu typu e-Paper. Projekt obejmuje opracowanie układu wykrywania dymu bazującego na czujniku BME688, z oprogramowaniem napisanym w języku C/C++ i działającym na rdzeniu RISC-V mikrokontrolera RP2350, umieszczonego na płytce Raspberry Pi Pico 2.

W ramach projektu została zastosowana dwuwarstwowa, sztuczna sieć neuronowa, analizująca na wejściu cztery ostatnie próbki, odczytane z czujnika BME688. Sieć stwierdza, czy w pomieszczeniu wykryto pożar. Model wytrenowany został na danych pozyskanych przez ręczne umieszczenie ognia w pobliżu czujnika dymu i rejestrację jego wpływu na odczyty sensora.

Rdzeń RISC-V Hazard3

Rdzeń RISC-V Hazard3 [13] zawiera trójstopniowy procesor potokowy o architekturze obsługującej listę instrukcji RV32IMAC z dodatkowymi rozszerzeniami: Zba – instrukcje generowania adresów (indeksowania), Zbb, Zbs, Zbkb – operacje bitowe, Zcb – rozszerzony zestaw instrukcji 16-bitowych, Zcmp – push/pop i podwójne przesłania, Zicsr – dostęp do rejestrów sterujących oraz Hh3power, Xh3bextm – własne instrukcje rdzenia Hazard3. Sterownik przerwań użyty w rdzeniu ma funkcjonalność równoważną z ARM NVIC.

Płytka RPi Pico2 firmy Raspberry Pi

Nowe płytki Pico2 i Pico 2W firmy Raspberry Pi z procesorem RP2350 są zgodne pod względem elektrycznym z płytkami Pico pierwszej serii (Pico/Pico W) [7]. Na płytkach zostały zastosowane układy pamięci NOR Flash z serii W25Q (Winbond) o częstotliwości pracy do 133 MHz (przepustowość do 66 MB/s) [15]. Dokładny opis został zamieszczony w artykule „Płytka Raspberry Pi Pico 2/2W z procesorem RP2350" [17].

Płytka Pico 2 zawiera przetwornicę buck-boost, która dostarcza napięcie 3,3 V (do zasilania RP2350 i obwodów zewnętrznych) z szerokiego zakresu napięć wejściowych (od 1,8 do 5,5 V), co zapewnia znaczną elastyczność w zasilaniu urządzenia z różnych źródeł, takich jak pojedyncze ogniwo litowo-jonowe lub 3 ogniwa AA połączone szeregowo. Najprostszym sposobem zasilania Pico 2 jest skorzystanie z umieszczonego na płytce gniazdka Micro USB. W dokumentacji płytki pokazano ponadto, jak poprzez dodanie tranzystora MOS można zrealizować podtrzymanie bateryjne zasilania płytki [13].

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

Podziękowania dla Pana Macieja Michny z Centrum Badań i Rozwoju Nordic Semiconductor w Krakowie za udostępnienie zestawów sprzętowych Power Profiler Kit II (PPK2).

Środowisko uruchomieniowe

Do realizacji projektu użyto środowiska uruchomieniowego bazującego na Microsoft Visual Studio Code. Po jego zainstalowaniu i uruchomieniu należy zainstalować rozszerzenie Raspberry Pi Pico. Po poprawnej instalacji w pasku bocznym pojawi się ikona Raspberry Pi Pico Project.

Wbudowane oprogramowanie płytki Pico umożliwia łatwe ładowanie kodu do pamięci mikrokontrolera. Oprogramowanie do załadowania ma postać pliku w formacie UF2.

Do debugowania oprogramowania niezbędny jest odpowiedni interfejs; można w tym celu użyć drugiej płytki Pico, ładując do niej oprogramowanie interfejsu debugowania, dostępne w postaci gotowego pliku UF2. Użycie RPi Pico do debugowania innego modułu Pico 2 wymaga wykonania połączeń zgodnie ze schematem zamieszczonym w dokumentacji [16]. Zastosowanie na płytce Pico/

eprasa.pl ef7662c802

Pico2 diody pomiędzy szyną VBUS i VSYS umożliwia jednoczesne dołączenie kabli USB do płytki Pico2 oraz płytki pracującej jako debuger.

Mikrokontrolery serii RP235x, używane w Pico 2, umożliwiają wybór jednego z dwóch typów rdzeni procesora podczas inicjalizacji oprogramowania. Aktywacja rdzenia jest wykonywana przez wbudowane oprogramowanie mikrokontrolera, zawarte w jego pamięci stałej, na podstawie informacji odczytanej z zewnętrznej pamięci Flash. Interfejs debugowania komunikuje się wyłącznie z aktywnym rdzeniem procesora.

Aktualnie dostępne oprogramowanie narzędziowe nie umożliwia późniejszej zmiany aktywnego rdzenia w trakcie pracy modułu, np. przy użyciu interfejsu debugowania. Oznacza to, że jedyną aktualnie dostępną metodą zmiany aktywnego rdzenia (ARM Cortex-M33/RISC-V Hazard) jest załadowanie (w trybie bootowania) dowolnego pliku UF2, zawierającego oprogramowanie działające na wybranym rdzeniu. Oprogramowanie to nie musi nawet poprawnie działać, istotny jest jedynie sam fakt załadowania go do pamięci.

Aktualny wybór aktywnego rdzenia może zostać odczytany z płytki w trybie bootowania przy użyciu narzędzia picotool.

SDK (Software Development Kit) to kolekcja narzędzi i kodu źródłowego do interakcji z zasobami sprzętowymi mikrokontrolera. Jest ona instalowana przez rozszerzenie Raspberry Pi Pico. Przy tworzeniu pierwszego projektu na architekturę RISC-V następuje dosyć czasochłonna instalacja oprogramowania narzędziowego do obsługi tego rdzenia.

Po skompilowaniu projektu należy załadować go w trybie bootowania, używając ikony Run w dolnym pasku. Jest to niezbędne, jeśli uprzednio na płytce działało oprogramowanie korzystające z rdzenia Cortex-M. Tylko w ten sposób następuje aktywowanie rdzeni RISC-V, co stanowi warunek konieczny do późniejszego podłączenia debuggera do tych rdzeni. Przy kolejnych poprawkach projektu można używać funkcji debugowania, bez wprowadzania mikrokontrolera w tryb bootowania.

Debugowanie RISC-V uruchamiamy używając konfiguracji Pico Debug (Cortex-Debug).

Debugger używany przez rozszerzenie Raspberry Pi Pico nie umożliwia wyświetlania zawartości rejestrów ani deasemblacji kodu maszynowego procesora RISC-V. Jest możliwe jedynie debugowanie na poziomie kodu źródłowego C. Pełne debugowanie RISC-V wymaga zainstalowania i skonfigurowania debuggera gdb dla RISC-V.

Czujnik BME688

Czujnik BME688 firmy Bosch [9], służący do detekcji temperatury, wilgotności, ciśnienia oraz stężeń VOC i VSC, skalibrowany został w trybie forced, zgodnie z przykładami dostarczonymi przez producenta na stronie biblioteki. Biblioteka ta została użyta w celu komunikacji z czujnikiem.

Wyświetlacz E-Ink

Wyświetlacz Pico-Inky firmy Pimoroni [8] skonfigurowany został z wykorzystaniem SDK dostarczonego przez producenta [3]. Ze względu na skąpą dokumentację, w celu połączenia z mikrokontrolerem konieczne było zapoznanie się z dostarczonym przez producenta kodem źródłowym pakietu picographics [4] w języku MicroPython. Dzięki temu odkryto, że w przypadku wyświetlacza Pico-Inky konieczne jest skorzystanie ze sterownika układu UC8151 oraz interfejsu SPI. Znaleziono również informację o rozmiarze bufora ramki dla tego wyświetlacza. Opracowana metoda obsługi wyświetlacza e-Ink znajduje się w pliku src/fire_detector/logger/pico_inky_logging_resource.cpp.

Podłączenie peryferiów

Czujnik BME688 [1] został dołączony do interfejsu I2C0 mikrokontrolera, dostępnego na liniach portów GPIO4 (SDA) i GPIO5 (SCL). Wyświetlacz Pico-Inky dołączono do interfejsu SPI0 (linie GPIO17 (CS), GPIO18 (SCK), GPIO19 (MOSI) i GPIO20 (DC)) [8]. Do monitorowania działania oprogramowania można użyć interfejsu UART0 na liniach GPIO0 (TX) i GPIO1 (RX), łącząc go z szyną UART na płytce interfejsu debugowania, udostępnianą po stronie komputera PC jako wirtualny port szeregowy [2]. W przypadku niekorzystania z debuggera, w projekcie w pliku src/main.cpp należy zainicjalizować zmienną s_Logger wartością nullptr (15 linijka) oraz usunąć zmienną s_UartResource w celu zmniejszenia nakładu obliczeniowego potrzebnego do formatowania tekstów, wypisywanych przez oprogramowanie debuggera.

Rysunek 1. Organizacja plików źródłowych w projekcie [18]

Struktura projektu

Projekt został podzielony na kilka mniejszych modułów. Na **rysunku 1** pokazano strukturę katalogu plików źródłowych src. Wszystkie te pliki, z wyłączeniem main.cpp, mają własne pliki nagłówkowe, które znajdują się w katalogu include. W projekcie nie ma plików nagłówkowych nieposiadających mapowania na pliki źródłowe.

W następujących plikach zostały zawarte funkcjonalności (rysunek 1):

- BME688 (hpp/cpp) – wrapper biblioteki dostarczonej przez producenta [1], służącej do komunikacji z czujnikiem BME688 [9]. Implementuje w pełni komunikację za pomocą protokołu I²C,
- logger (hpp/cpp) – zawiera interfejs loggera oraz zasobu logującego. Z założenia logger jest uchwytem do zasobu logującego, co pozwala korzystać z różnych loggerów naraz, w różnych miejscach kodu,
- pico_inky_logging_resource (hpp/cpp) – zawiera implementację zasobu logującego, wypisującego informacje na ekranie Pico-Inky,
- uart_logging_resource (hpp/cpp) – zawiera implementację zasobu logującego, wysyłającego dane na wskazany port UART,
- classifier – zawiera implementację bezstanowego klasyfikatora, wskazującego obecność dymu,
- fire_detector_logic (hpp/cpp) – zawiera implementację całego klasyfikatora, łącznie z elementem przechowującym stan klasyfikatora oraz kwantowaniem danych,
- power_manager (hpp/cpp) – zawiera managera pozwalającego na sterowanie domenami poboru mocy mikrokontrolera, umożliwia też planowanie ponownego włączenia mikrokontrolera,
- main (cpp) – punkt wejściowy programu, mający zdefiniowane stałe oraz wykonujący pomiary.

Oprócz tego w projekcie znajduje się katalog cmake, w którym zdefiniowano plik cmake, służący do włączenia biblioteki BME68x [1] do projektu.

Uruchomienie rozwiązania

W opisywanym projekcie zastosowano narzędzie pico tool w wersji 2.1.0. W przypadku nowszych edycji może pojawić się potrzeba modyfikacji tej komendy, a także zainstalowania SDK raspberry

eprasa.pl ef7662c802

pico, programu cmake oraz programu ninja, jeżeli nie były one zainstalowane wcześniej.

W celu uruchomienia projektu należy na początku pobrać projekt zrepozytorium https://ep.com.pl/files/hjw/13746-internet_rzeczy_w_pomiarach_srodowiskowych_20.zip. Następnie należy zdecydować, czy potrzebne jest wysyłanie danych diagnostycznych poprzez port UART0. Jeżeli nie, to należy usunąć definicję UartLoggingResource, znajdującą się w linijce 13 pliku main.cpp oraz zainicjować zmienną s_Logger wartością nullptr.

Następnie należy skonfigurować projekt komendą:

```
cmake -S . -B build -G Ninja
```

Uwaga! Zadeklarowanie zmiennej środowiskowej PICO_SDK_PATH może być konieczne, jeżeli SDK Pico nie zostało zainstalowane w domyślnym katalogu.

Następnie można zbudować projekt za pomocą komendy:

```
ninja -C build -j X
```

gdzie X oznacza przydzieloną liczbę wątków.

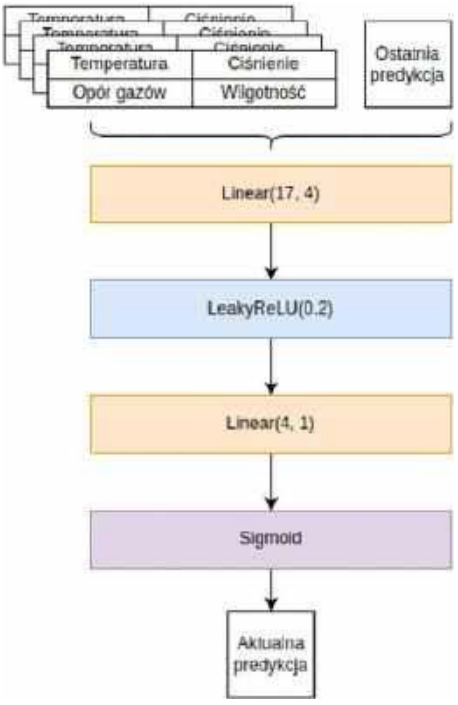
Skompilowany program można wpisać płytkę za pomocą komendy:

```
sudo $PICO_SDK_PATH/picotool/2.1.0/picotool/picotool load
$PWD/build/project_riscv.elf -fx
```

Architektura klasyfikatora dymu

Klasyfikator jest siecią neuronową (**rysunek 2**) złożoną z warstwy wejściowej (17 wejść), warstwy neuronów ukrytych (4 neurony) i jednego neuronu w warstwie wyjściowej. W warstwie ukrytej używana jest funkcja aktywacji LeakyReLU (o nachyleniu dla ujemnych wartości wejściowych równym 0,2). Funkcją aktywacji neuronu wyjściowego jest funkcja sigmoidalna.

Na wejścia podawane są cztery ostatnie wartości pomiarów temperatury, ciśnienia, VOC oraz ostatniej predykcji modelu. Model dokonuje oceny, czy obecnie w pomieszczeniu znajduje się ogień.



Rysunek 2. Struktura sieci neuronowej służącej do wykrywania dymu w pomieszczeniu [18]

Sieć została wytrenowana na wygenerowanych danych (z dodanym szumem w celu uniknięcia przeuczenia), których charakterystyka odpowiada danym zarejestrowanym przez czujnik. Zbiór treningowy zawierał 100 000 próbek. Proces uczenia ograniczono do 5 epok. Trening przeprowadzono za pomocą zestawu skryptów w języku Python, zawartych w pliku fire_detection.ipynb (https://ep.com.pl/files/aww/13747-fire_detection.zip), który można wczytać i uruchomić w środowisku Jupyter Notebook (np. na platformie cocalc.com). Do trenowania modelu skrypty korzystają z bibliotek Pytorch [5] oraz Lightning [6].

Podczas procesu trenowania monitorowano metrykę straty na zbiorze treningowym. Potwierdzono, że model osiągnął zbieżność oraz że jego uczenie nie jest zbyt stabilne, co jest częstym problemem płytkich modeli. Wagi modelu można wyświetlić instrukcją:

```
for param in model.parameters(): print(param.data)
```

Klasyfikacja w programie mikrokontrolera została zaimplementowana w pliku src/fire_detector/logic/classifier.cpp. Wagi obliczone z użyciem skryptów w języku Python zostały umieszczone w tablicach kFirstLayerWeightMatrix, kFirstLayerBiasMatrix, kSecondLayerWeightMatrix, oraz kSecondLayerBias.

Kwantyzacja danych pomiarowych

Dane otrzymane z czujnika zostały skwantowane tak, aby zmieściły się w 256-bitowej strukturze. Jest to ważne ze względu na optymalizację zużycia prądu. Zapisywane są trzy ostatnie pomiary oraz wartość ostatniej predykcji. Poniżej zaprezentowano sposoby kwantowania wartości:

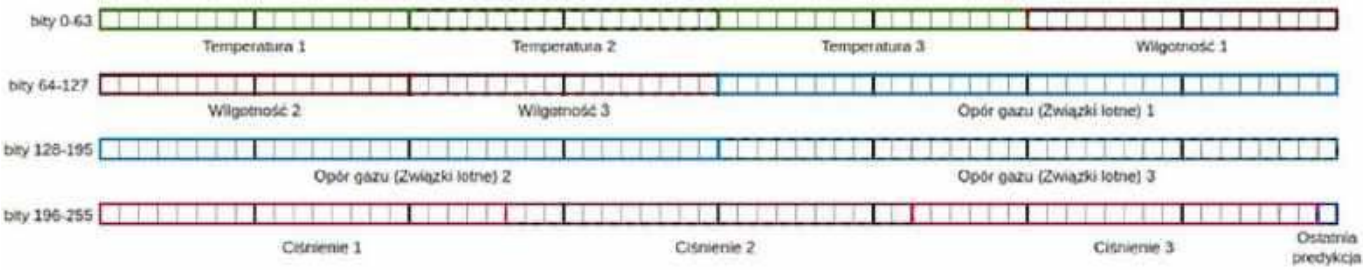
- Temperatura (pomnożona przez 100) zapisywana jest jako wartość typu int16.
- Wilgotność (pomnożona przez 100) zapisywana jest jako wartość typu uint16.
- Wynik pomiaru VOC zapisywany jest jako wartość typu uint32.
- Ciśnienie zapisywane jest jako wartość typu uint32.
- Ostatnia wartość predykcji zapisywana jest jako jeden bit: 1 – wystąpił ogień, 0 – brak ognia.

Skwantowane pomiary trafiają do struktury FireDetectorMemory zadeklarowanej w pliku src/fire_detector/fire_detector_logic.cpp i mają postać pokazaną na **rysunku 3**.

Optymalizacja poboru mocy

W celu minimalizacji poboru mocy wykorzystano najnowszy dodatek SDK RP2350, czyli bibliotekę Powman [11]. Umożliwia ona sterowanie domenami zasilania RP2350, które pokazano na **rysunku 4**. Zawsze aktywna jest domena AON (Always on Power Domain). Zawiera ona zegar o rozdzielczości milisekundowej, pozwalający na zaplanowany powrót do starej domeny. Umożliwia ona również na budzenie urządzenia w przypadku wystąpienia zdarzenia zewnętrznego, np. sygnału na GPIO. Wyższe domeny kontrolują wykorzystanie rdzeni procesora (SWCORE), pamięci SRAM boota (XIP) oraz głównych pamięci SRAM (SRAM0 i SRAM1). Biblioteka Powman pozwala zatem całkowicie wyłączyć urządzenie i zaplanować jego ponowne uruchomienie. Wadą tego rozwiązania jest całkowity restart programu oraz wymazanie wszystkich zmiennych w pamięci (w przypadku wyłączenia pamięci SRAM). Domena AON dostarcza również 256-bitowy rejestr scratch [12], pozwalający na przechowywanie danych ulotnych bez względu na stan zasilania rdzenia. Dzięki kwantyzacji trzy ostatnie pomiary mieszczą się w tym rejestrze, przez co możliwe jest całkowite wyłączenie procesora RP2350 w momencie oczekiwania na kolejny pomiar. Za zarządzanie domenami odpowiada klasa zaimplementowana w pliku źródłowym src/fire_detector/power/power_manager.cpp, gdzie znajduje się ponadto kod wyłączający port USB i obsługujący inne optymalizacje. Domeny zasilania opisane zostały w sekcji 6.2 dokumentacji mikrokontrolera RP2350 [13].

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 3. Alokacja przestrzeni w rejestrze przechowującym dane pomiarowe [18]

Przykładowe użycie biblioteki Powman zostało dokładnie opisane w repozytorium [14].

Badania

W ramach projektu została przetestowana detekcja ognia z użyciem opracowanego programu. Pomiary były wykonywane co sekundę. Układ prawidłowo wykrywał dym (**fotografia tytułowa**). Dzięki zastosowaniu klasyfikatora neuronowego oraz okna historii układ potrafił szybciej wykryć zgaszenie ognia, gdyż brał również pod uwagę zmianę wartości w czasie. Choć po usunięciu źródła dymu poziom oporu gazu nie wzrósł gwałtownie (bez ognia wynosił około 120 000) oraz temperatura nie zdążyła powrócić do normy, model był w stanie wykryć koniec symulowanego pożaru.

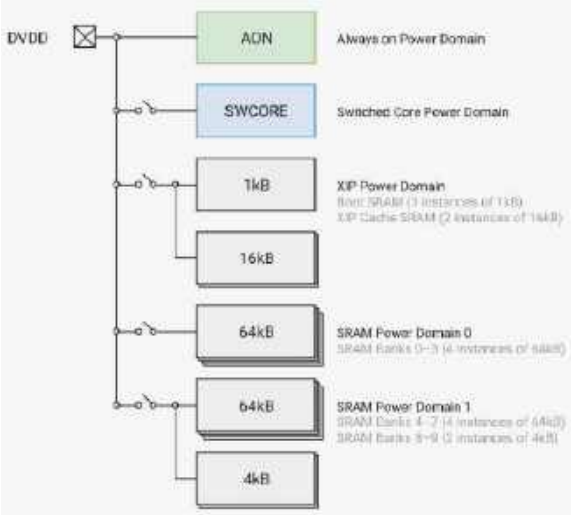
Pobór mocy

Do dynamicznego pomiaru prądu zasilania bardzo dobrze nadaje się zestaw Power Profiler Kit II (PPK2) firmy Nordic Semiconductor. Do badań został zastosowany PPK2 w trybie zasilania, z napięciem 5 V dołączonym do szyny VSYS. System wykonywał pomiar i aktualizację wyświetlania co 1,316 s, prąd średni wynosił 9,62 mA (**rysunek 5**). Na początku ramki wykonywane są obliczenia, a potem realizowany jest pomiar za pomocą czujnika BME688: czas ok. 100 ms, prąd średni 13,79 mA, prąd maksymalny 37,91 mA (szpilka i narastająca rampa).

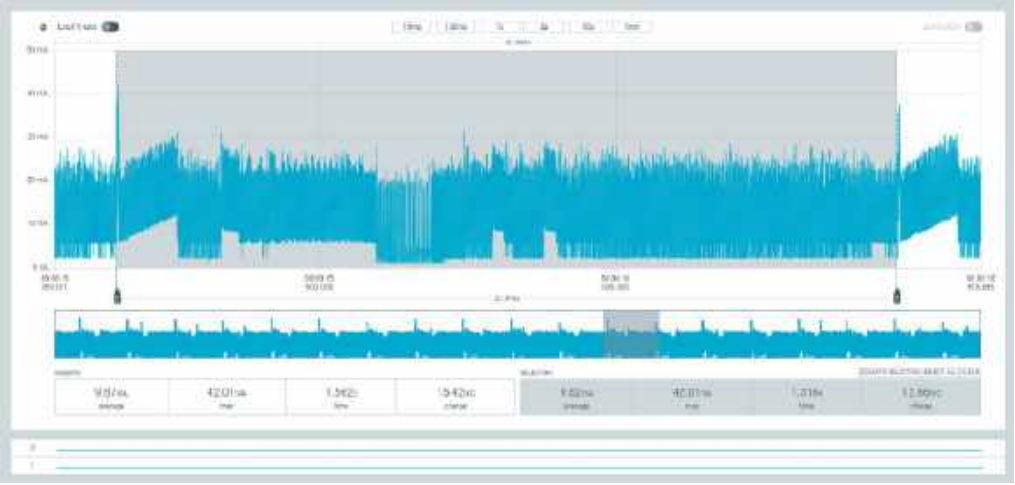
Następnie wykonywane są obliczenia (prąd średni ok. 11,23 mA) i układ RP2350 wchodzi w stan uśpienia: czas ok. 91 ms, prąd średni 3,39 mA, prąd maksymalny 22,38 mA (**rysunek 6**). Przetwornica doładowuje kondensatory wyjściowe rzadko wykonywanymi szpilkami prądowymi. Układ zostaje wyłączony i domena AON ma za zadanie wybudzić układ po upływie określonego czasu.

Dzięki zastosowaniu biblioteki Powman, przy zasilaniu szyny VSYS napięciem 3,3 V, w okresie uśpienia procesora udało się zejść z zużyciem prądu do średnio 107,25 μA, z rzadkimi pikami do ok. 20 mA (**rysunek 7**).

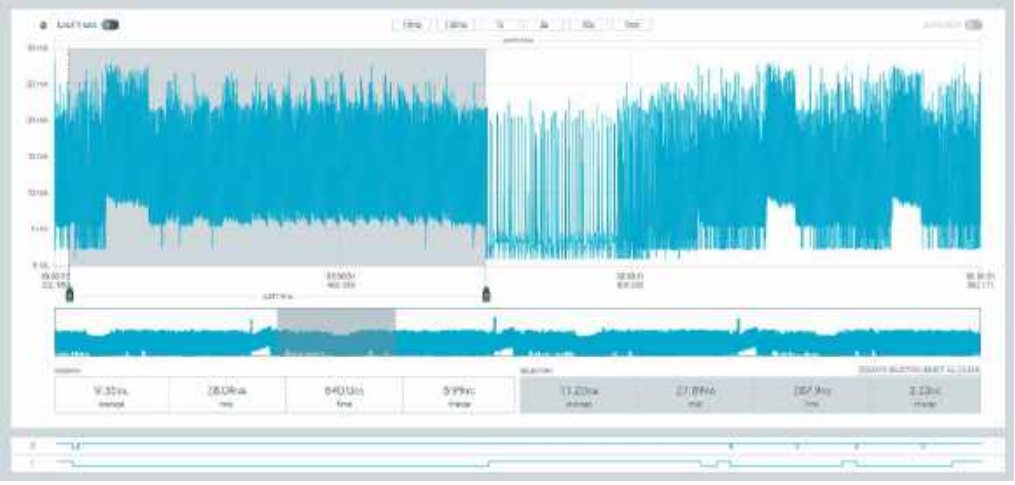
Podczas włączania zasilania płytki Pico 2 występuje – przez 0,88 ms – prąd rozruchowy o maksymalnej wartości



Rysunek 4. Domeny zasilania mikrokontrolera RP2350 [13]



Rysunek 5. Profil poboru prądu



Rysunek 6. Wprowadzanie układu RP2350 w uśpienie

eprasa.pl ef7662c802

0,63 A. Może to stwarzać problemy dla źródeł zasilania małej mocy (np. odnawialnych).

Rysunek 7. Prąd podczas uśpienia procesora [18]

Możliwości kontynuacji

Model do działania potrzebuje często wykonywanych odczytów czujnika, co wymusiło wybór próbkowania co jedną sekundę. Patrząc na zużycie energii można by się pokusić o wydłużenie odstępu między pomiarami, jednakże w tym przypadku niszczyłoby to responsywność modelu. W przypadku nowej implementacji źródło, do którego logika klasyfikatora zapisuje dane, może zostać wyciągnięte do osobnej klasy definiowanej interfejsem, dzięki czemu implementacja klasyfikatora oraz miejsce zapisywania danych zostałyby od siebie oddzielone.

Podsumowanie

Czujnik parametrów środowiska BME688 dobrze nadaje się do wykrywania dymu, szczególnie pojawiającego się w wyniku pożaru. Przy stosunkowo niedużym zapotrzebowaniu na moc zasilania, można go zastosować do budowy układów działających długo z zasilaniem lokalnym. Przy sporych odstępach czasu oczekiwania na następny pomiar, pojawia się konieczność ograniczenia poboru mocy przez procesor. Biblioteka Powman w języku C++ dla procesora RP2350 pozwala na dynamiczne zarządzanie domenami zasilania procesora. Umożliwia to skonfigurowanie stanu uśpienia z niskim poborem prądu.

Opisany projekt spełnił oczekiwania. Udało się zrealizować detekcję dymu i osiągnąć niski poziom mocy zasilania. Dodatkowo został zastosowany rdzeń RISC-V, który nabiera coraz większego znaczenia na rynku systemów wbudowanych i Internetu Rzeczy. Jest to pierwsze podejście do tego zagadnienia, więc wymagane są dalsze badania, szczególnie dotyczące zastosowanej sieci neuronowej.

Opis i realizacja oprogramowania bazuje na projekcie „Praca rdzeni RISC-V płytki Raspberry Pi Pico 2", wykonanego w ramach przedmiotu „Systemy dla Internetu Rzeczy" na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej przez zespół w składzie: Grzegorz Czarnecki, Jakub Sprawka, Kamil Sulkowski.

Autorzy dziękują Panu Zbigniewowi Szymańskiemu za wsparcie w dziedzinie sztucznej inteligencji.

Henryk A. Kowalski
Grzegorz Mazur
Instytut Informatyki
Politechnika Warszawska

Bibliografia:
[1] BME688 breakout board Bosch air quality sensor, Python Library for BME68x on the Raspberry Pi, pi3g, https://pi3g.com/products/bme688-breakout-board/
[2] Pico 2 family, Raspberry Pi Pico 2, https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/pico-series.html#pico-2-family
[3] Pimoroni Pico MicroPython for RP2350/Pico2 boards, https://github.com/pimoroni/pimoroni-pico-rp2350
[4] Pico Graphics, Pimoroni, https://github.com/pimoroni/pimoroni-pico/tree/main/micropython/modules/picographics
[5] Pytorch, https://pytorch.org/
[6] PyTorch Lightning, https://lightning.ai/docs/pytorch/stable/
[7] Raspberry Pi Pico 2, https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico-2/
[8] Pico Inky Pack, PIM634, Pimoroni, https://shop.pimoroni.com/products/pico-inky-pack?variant=40044626051155
[9] Bosch gas sensor BME688, https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme688/#documents
[10] Profilowanie mocy z zastosowaniem Power Profiler Kit II, Henryk A. Kowalski, EP 5/2022, https://ep.com.pl/kursy/15267-systemy-dla-internetu-rzeczy-60-profilowanie-mocy-z-zastosowaniem-power-profiler-kit-ii
[11] Pico C SDK, Power Management API, hardware_powman, RP2350, Raspberry Pi, https://www.raspberrypi.com/documentation/pico-sdk/hardware.html#group_hardware_powman
[12] powman.h, "io_rw_32 scratch[8];", Raspberry Pi, https://github.com/raspberrypi/pico-sdk/blob/95ea6acad131124694cda1c162c52cd30e0aece0/src/rp2350/hardware_structs/include/hardware/structs/powman.h#L293
[13] RP2350 Datasheet, 2024-10-16, Raspberry Pi, https://datasheets.raspberrypi.com/rp2350/rp2350-datasheet.pdf
[14] raspberrypi/pico-examples, https://github.com/raspberrypi/pico-examples/compare/master...peterharperuk:pico-examples:powman
[15] Raspberry Pi Pico 2 Datasheet, 2024-10-15, Raspberry Pi, https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-2-datasheet.pdf
[16] Getting Started with Pico-series Microcontrollers. 2024-10-15, Raspberry Pi, https://datasheets.raspberrypi.com/pico/getting-started-with-pico.pdf
[17] Płytka Raspberry Pi Pico 2/2W z procesorem RP2350, Henryk A. Kowalski, EP 3/2025, https://ep.com.pl/projekty/moduly-w-aplikacjach/16453-internet-rzeczy-w-pomiarach-srodowiskowych-15-plytka-raspberry-pi-pico-2-2w-z-procesorem-rp2350
[18] „Praca rdzeni Risc-V płytki Raspberry Pi Pico 2", Grzegorz Czarnecki, Jakub Sprawka, Kamil Sulkowski, Raport projektu, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej

REKLAMA

KURS Nordic nRF z BT

Zanurzymy się w konfigurację środowiska z nRF Connect SDK i przyjrzymy się, co sprawia, że płyta deweloperska nRF5340 DK jest tak wszechstronna. Przygotuj się na ekscytującą podróż przez konfigurację, programowanie oraz testowanie, które otworzą przed Tobą nowe możliwości w technologii Bluetooth Low Energy i systemie Zephyr.

ulubionykiosk.pl

eprasa.pl ef7662c802

Recenzja mostka RLC typu UT622E – jakość wykonania i testy użyteczności

Potrzeba znajomości rzeczywistych wartości parametrów podstawowych komponentów zdarza się w praktyce współczesnego elektronika dość rzadko. Jednak gdy już pojawi się taka sytuacja, specjalistyczny miernik okaże się niezbędny – warto więc mieć pod ręką narzędzie o dobrej specyfikacji. Czy do takich sprzętów można zaliczyć miernik RLC o oznaczeniu UT622E marki UNI-T? Sprawdźmy.

Zakup i pierwsze wrażenia

W chwili pisania artykułu miernik UT622E kosztuje od 1622 do 1685 złotych, zależnie od wybranej oferty. Urządzenie dostarczane jest w dość prostym, kartonowym pudełku, wewnątrz którego – poza samym instrumentem – znajduje się przystawka do pomiarów w układzie, metalowa zwora do zerowania, kabel do ładowania z wtykiem USB typu mini B (niegdyś popularnego, obecnie już rzadko spotykanego), skrócona instrukcja obsługi oraz certyfikat kalibracji. Wszystkie elementy są zapakowane we wkładkę z pianki, co chroni je w transporcie przed uszkodzeniem. **Fotografia 1** pokazuje zawartość zestawu. Sam miernik wielkością przypomina multimetr i – jak wiele instrumentów przenośnych – pokryty jest gumą. Materiał ten jest dobrej jakości, lekko chropowaty i przyjemny w dotyku. Miernik ma zintegrowaną podpórkę, która nie tylko pozwala postawić go pod wygodnym kątem, ale też zapewnia stabilność w trakcie wciskania przycisków, co nie w każdym instrumencie jest regułą. UT622E ma też zintegrowany akumulator litowo-polimerowy o pojemności 1800 mAh, co jest kolejną zaletą – jedno ładowanie wystarcza na 8 godzin pracy.

Miernik włącza się bardzo szybko, ekran jest czytelny i dość jasny przy ustawieniach domyślnych. Urządzenie pamięta ostatnio wybrane parametry. Sprzęt mierzy indukcyjność, pojemność, impedancję, reaktancję i rezystancję przy pomiarze prądem stałym (DCR). Dla każdego głównego pomiaru (z wyjątkiem DCR) można wybrać pomiar pomocniczy: dobroć, współczynnik tłumienia, reaktancję, przesunięcie fazowe (Θ) w stopniach i w radianach oraz ESR. Poza standardowymi trybami pomiaru urządzenie udostępnia tryb tolerancji, który pozwala na szybkie sortowanie komponentów. Jednakże konfiguracja tego trybu odbywa się w menu ustawień, co okazuje się nieco niewygodne. Lepszym rozwiązaniem byłaby możliwość ustawienia wartości za pomocą przycisków strzałek na głównym ekranie. Zakres tolerancji można ustawić od ±1% do ±20%, a rezultat pomiaru jest sygnalizowany na ekranie, a także dźwiękiem i świeceniem diody LED nad ekranem. Dokładność samego miernika wynosi ±0,1% we wszystkich zakresach pomiarowych. Przydatną funkcjonalnością jest licznik elementów, które spełniają kryterium tolerancji oraz tych, które go nie spełniają. Miernik RLC oferuje też tryb automatycznego rozpoznawania komponentów i automatyczny wybór zakresów, choć nie dotyczy to właściwej częstotliwości sygnału testowego. Ten parametr, jak i amplitudę sygnału testowego oraz częstotliwość próbkowania, należy wybrać ręcznie. Urządzenie oferuje też tryb zapisu pomiarów, który podaje wartość średnią, minimalną, maksymalną oraz liczbę odczytów – jest to przydatne przy sprawdzaniu, czy partia komponentów spełnia określone wymagania.

Pełna instrukcja obsługi dostępna jest na stronie producenta, ale nie podaje wszystkich informacji, które mogłyby pomóc mniej doświadczonym użytkownikom mostków RLC. Nie dowiemy się z niej, dla jakich zakresów wartości rekomendowana jest określona częstotliwość testowa ani kiedy stosuje się model równoległy komponentu, a kiedy szeregowy. Zdaniem autora te informacje powinny być podane, nawet jeśli nie są one tak bardzo potrzebne bardziej doświadczonym użytkownikom. Za to nie zabrakło szczegółowych informacji na temat dokładności miernika – na tyle szczegółowych, że użytkownik może obliczyć rzeczywistą dokładność każdego pomiaru. Producent zaleca odczekać 10 minut w celu uzyskania maksymalnej dokładności. Z instrukcji można się też

eprasa.pl ef7662c802

dowiedzieć o przystawce Kelvina do sprawdzania komponentów SMD (UTR-L 100kS-H), która kosztuje w Polsce około 200 złotych.

Pierwsze wrażenia są jak najbardziej pozytywne – miernik oferuje wiele użytecznych pomiarów przy wysokiej dokładności, a możliwość ustawienia częstotliwości testowej 100 kHz zapewnia lepszą rozdzielczość i dokładność w przypadku małych reaktancji, co jest przydatne podczas testowania komponentów do obwodów w.cz. Solidna, gruba guma o przyjemnej fakturze dobrze chroni miernik, także przed upadkiem z wysokości blatu.

Fotografia 1. Zawartość zestawu wraz z akumulatorem zasilającym miernik

Testy i pomiary

Autor nie dysponuje niestety komponentami przeznaczonymi do kalibracji mierników tego typu. Zamiast tego przeprowadzono serię pomiarów różnych komponentów celem sprawdzenia wygody używania urządzenia i zbieżności wyników z parametrami nominalnymi przykładowych komponentów. Zbadano także sygnał testowy generowany przez miernik.

Do testu pomiarów indukcyjności wykorzystanych zostało kilka prostych cewek – część z nich jest nawinięta na karkasie z tworzywa, a pozostałe na rdzeniach ferrytowych i proszkowych. Na początek użyta została prosta cewka powietrzna, zawierająca trzy zwoje drutu nawinięte na średnicy około 3 cm. Zmierzona indukcyjność wyniosła 0,401 μH i współczynnik dobroci ~14,8. Cewka 30 zwojów na karkasie 8 mm miała zmierzoną wartość 2,172 μH i współczynnik dobroci ~8,55. Trzecia cewka powietrzna, składająca się z 5 zwojów drutu nawiniętych na wiertle 5 mm, a następnie delikatnie rozciągnięta, miała wg miernika indukcyjność 0,96 μH, po ściśnięciu zaś wartość ta spadła do 0,113 μH. Po ściśnięciu dobroć zmniejszyła się z około 6,5 do około 2,1. Cewki o tak małej indukcyjności spotyka się głównie w obwodach w.cz., a strojenie obwodów czasem wymaga zmiany ich geometrii.

Następnie wybrano dławiki ferrytowe, pochodzące z przetwornic napięcia uszkodzonej karty graficznej. Dławik o oznaczeniu R80, czyli 0,8 μH, ma rzeczywistą wartość 1,1 μH i dobroć 49. Jest to jak najbardziej spodziewana wartość indukcyjności, biorąc pod uwagę tolerancję dławików mocy na poziomie przeważnie ±10...20%. Dławik o oznaczeniu 2R0 okazał się być bliższy wartości nominalnej, mając 2,165 μH i dobroć około 66. Do kolejnego pomiaru wybrano dławik osiowy 100 μH, wlutowany w płytkę drukowaną z mikrokontrolerem, gdzie pełnił funkcję filtru zasilania części analogowej mikrokontrolera. W tym wypadku jednak pomiar dał wynik dalece odbiegający od spodziewanego, czyli zaledwie 0,2 μH. Dlaczego tak się stało? Filtr składa się z dwóch równoległych dławików – jednego na biegunie dodatnim, a drugiego na masie. Po stronie cyfrowej układ zawiera szereg kondensatorów różnej pojemności, po stronie wtórnej zaś – kondensator 100 nF. Całość tworzy dość złożony układ impedancji, a dwa sąsiadujące ze sobą dławiki pracują też jak dławik sprzężony. Z tego też powodu miernik nie podaje miarodajnych rezultatów. W takich sytuacjach najlepiej by było odlutować jedno wyprowadzenie dławika, i dopiero wtedy dokonać jego pomiaru, do pomiaru komponentów w układzie trzeba więc jak zawsze podchodzić z dużą dozą uważności.

Na koniec pomiarów indukcyjności weźmy kilka losowych dławików i cewek. I tak: nieduży dławik na nieznanym toroidalnym rdzeniu proszkowym, w którym uzwojenie bifilarne zostało połączone w układ szeregowy, uzyskał wynik 174,1 μH i dobroć około 13. Częstotliwość pomiaru została zmniejszona do 1 kHz. Pomiar połowy uzwojenia (dzięki odczepowi) dał wartość 43 μH i dobroć 12. Łącząc skrajne końce dławika do jednego wejścia pomiarowego, a odczep środkowy do drugiego, uzyskano wartość 0,133 μH i dobroć ~2,2 przy częstotliwości 100 kHz. W teorii wartość powinna wynosić 0, gdyż w tym układzie połączeń działanie obu połówek dławika powinno się znosić, ale w praktyce występują nieznaczne różnice w długościach cewek, nawet nawijanych bifilarnie. Takie uzwojenia mają też dużą pojemność pasożytniczą między sobą i równie duże sprzężenie magnetyczne.

Do kolejnego pomiaru został wybrany mały dławik toroidalny, zawierający ledwo kilka zwojów nawiniętych na rdzeniu w formie długiej wstęgi ze stali. Dławik taki ma indukcyjność 815 μH i dobroć 0,7. Podobny dławik z innego zasilacza uzyskał już wartość 475 μH i dobroć 0,74.

W ramach testów pomiaru pojemności na początek wybrana została bateria 20 kondensatorów elektrolitycznych 2200 μF/50 V połączonych równolegle. Miernik podał wypadkową pojemność ~42,5 mF i ESR ~201 mΩ. Typowa wartość ESR takiego pakietu powinna być liczona maksymalnie w pojedynczych miliomach, jednak w tym wypadku przyczyna odmiennego wyniku jest dość prosta: te kondensatory nigdy nie pracowały pod napięciem i ostatnie 10 lat przeleżały w pudełku niedokończonych projektów. W następnym kroku pakiet został podłączony do zasilacza 30 V/5 A i naładowany niskim prądem. Przy drugim pomiarze, po kilkunastu minutach pracy pod napięciem i pozostawieniu pakietu do rozładowania przez rezystor 100 kΩ, pojemność utrzymywała się na poziomie 42,5 mF, a ESR spadła poniżej 135 mΩ. Przy okazji warto dodać, że gdy miernik ustawiony był w trybie równoległym, pomiar pojemności wskazał około 1,8 mF. Mniejszy kondensator, 100 μF/50 V, w pomiarach miał wartość 91,8 μF, a ESR 211 mΩ. Ten kondensator też był nieużywany, stąd wysoka wartość ESR. Jako ciekawostka został też zmierzony kondensator osiowy, pochodzący z zestawu edukacyjnego z lat 80. ubiegłego wieku, o wartości 10 μF/25 V. Pojemność – po ponad trzech dekadach – wynosiła 11,37 μF, ale wartość ESR okazała się znaczna: 1,227 Ω.

eprasa.pl ef7662c802

Kondensator foliowy MKT 2,2 μF wykazał w pomiarach wartość 2,2172 μF, współczynnik tłumienia 0,0029 i ESR 251 mΩ. Sprawdzone zostały dwa inne kondensatory tego samego typu i o tej samej pojemności, tyle że pochodzące z demontażu. Oba wykazały wartość poniżej 2,1 μF i ESR o wartości 270...280 mΩ. Kondensator foliowy X 0,22 μF miał wartość 211 nF i ESR ~350 mΩ. Również pomiary innych, losowych kondensatorów, podawały wartości zbliżone do nominalnych, co było do przewidzenia.

Do testu pomiaru małych pojemności wykorzystano „kondensator" drutowy – dwa odcinki drutu nawojowego, skręcone ze sobą i tworzące małą pojemność z użyciem powłoki ochronnej jako dielektryka. Tak przygotowany element miał długość około 7 cm i pojemność między 7, a 12 pF, zależnie od naprężeń drutów, co wpływało na dystans między nimi. Wartość ESR okazała się niemierzalna, a współczynnik tłumienia wynosił 0,070...0,078.

Na koniec zmierzmy kilka rezystorów. Miernik oferuje pomiar napięciem przemiennym i stałym i są to oddzielne tryby pomiaru. Pierwszy zbadany element to osiowy rezystor mocy o wartości nominalnej 6,8 Ω. Wartość zmierzona to 6,7155 Ω, ale warto zwrócić uwagę na wartość reaktancji X: przy 100 Hz jest to 0,0010 Ω, przy 10 kHz spada ona do –0,032 Ω, przy 100 kHz rośnie do 0,0302 Ω. Drugi rezystor miał wartość nominalną 1,8 Ω i zmierzoną 1,7529 Ω. Wartość reaktancji to 0,0003 Ω przy 100 Hz, –0,033 Ω przy 10 kHz i 0,0165 Ω przy 100 kHz. Oba rezystory miały moc 2 W.

Jako trzeci wybrano rezystor cermetowy 1 Ω/5 W, który używany był jako prosty bocznik. Wartość rzeczywista: 0,9963 Ω, reaktancja przy 100 Hz wynosiła 0,0007 Ω, przy 1 kHz 0,0022 Ω. Przy 100 kHz rezystancja wróciła do 0,9995 Ω, reaktancja zaś wzrosła do 0,22 Ω. Rezystor ten nie nadaje się zatem na bocznik do precyzyjnego pomiaru prądów szybkozmiennych. Przełączając się na tryb DCR uzyskano wartość 998,7 mΩ. Wcześniej sprawdzane rezystory wykazały wartości, odpowiednio, 6,7153 Ω oraz 1,7543 Ω.

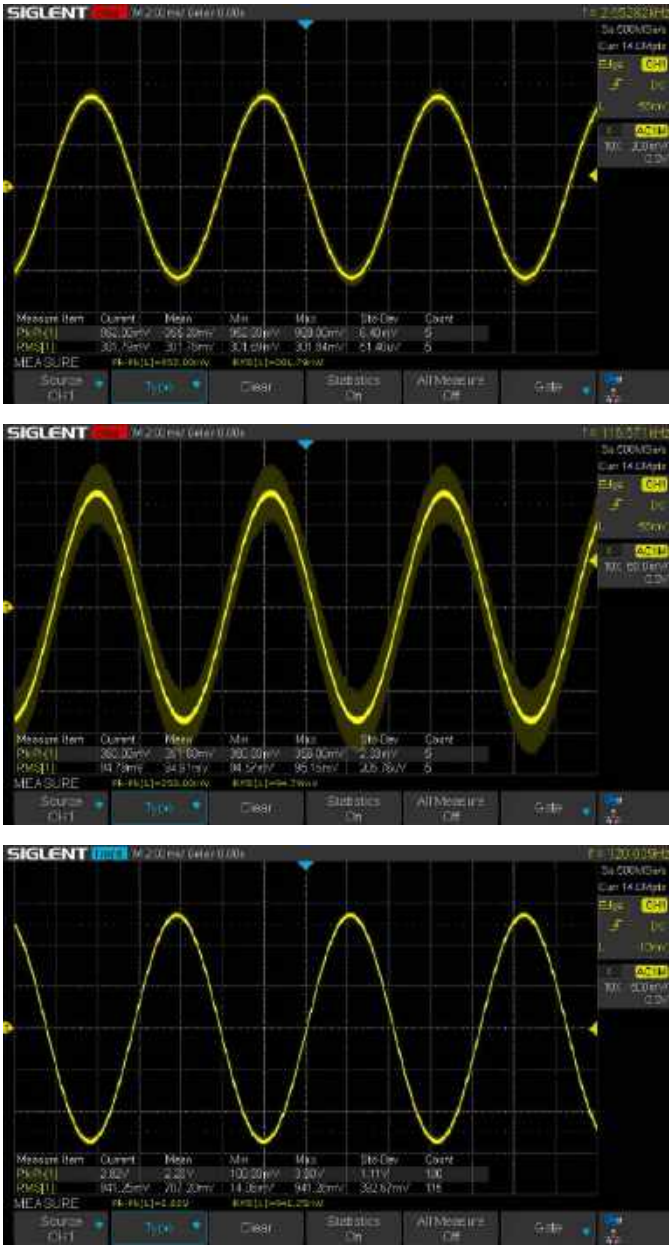
Na koniec zmierzona została rezystancja bocznika w prototypie. Bocznik ów składa się z pięciu połączonych równolegle rezystorów SMD o rezystancji 1 Ω. W normalnym trybie pomiarów wartość rzeczywista wynosiła 0,3594 Ω, a reaktancja przy 100 kHz: 0,3234 Ω. Przy 100 Hz reaktancja spada do 0,0003 Ω. W pomiarze DCR wartość zmierzona wynosiła 351,6 mΩ. Tak duża różnica wartości rzeczywistej względem oczekiwanej, zwłaszcza biorąc pod uwagę klasę użytych rezystorów, może wskazywać np. na zimne luty lub uszkodzenie rezystorów. Warto zaznaczyć, iż znaczne zmiany w reaktancji tego bocznika miałyby znaczenie, gdyby układ służył do pomiaru szybkich zmian prądu z dużą dokładnością – w takich układach stosuje się specjalizowane rezystory bezindukcyjne. Ten układ mierzy jednak prąd z częstotliwością próbkowania poniżej 10 sps, a i sama wartość rezystancji bocznika musi być blisko nominalnej wartości 0,2 Ω, niewielkie różnice mogą więc zostać skompensowane w układzie i w oprogramowaniu. Nie zmienia to faktu, że dokładny pomiar wartości za pomocą miernika RLC jest przydatny, choćby do kontroli po lutowaniu – tak, jak w tym przypadku.

Na koniec spójrzmy na sygnał generowany przez ten miernik, ale skupmy się tylko na częstotliwości 100 kHz. Sprawdzone zostały wszystkie poziomy sygnału: 1 V, 0,3 V i 0,1 V. Wyniki pomiaru pokazuje **rysunek 1**. Wartości nie są idealne, gdyż oscyloskop i jego sonda dodają złożoną impedancję na wyjściu miernika RLC. Same sygnały nie są też perfekcyjnie czyste i trudno stwierdzić, czy zakłócenia pochodzą z otoczenia (prawdopodobnie), czy powstają w samym mierniku. Należy jednak pamiętać, że sam miernik wykorzystuje uśrednianie mierzonego napięcia i prądu przed przeliczeniem tych wartości na faktyczne wyniki pomiaru.

a)

b)

c)



Rysunek 1. Sygnał pomiarowy miernika: 1 V RMS (a), 0,3 V RMS (b), 0,1 V RMS (c)

Podsumowanie

Używanie miernika okazało się nadzwyczaj intuicyjne i wygodne i żaden pomiar nie nastręczał większych problemów. Niektóre z nich wymagały użycia przystawki z klipsami, gdyż uchwyty w obudowie umiejscowione są dość głęboko. Jedyny problem wystąpił przy pomiarze pojemności baterii kondensatorów – czasami przy zmianie typu pomiaru wartość mierzona wynosiła ponad 57 mF zamiast 42,5 mF, co wymagało restartu miernika. Dlatego też producent nakazuje najpierw wybranie pożądanego pomiaru, potem zaś podłączenie mierzonego komponentu. Przy okazji pomiarów na potrzeby niniejszej recenzji miernik przydał się w praktyce, wykrywając problem montażowy.

Uni-T UT622E może i jest dość kosztownym miernikiem, ale w tej cenie – zdaniem autora – i tak nie do pobicia. Jest wygodny, czytelny, nawet z większej odległości, łatwy w obsłudze. Pozostaje kilka drobiazgów, które można by poprawić, ale w zwykłym użytkowaniu nie stanowią one problemu. Mimo wszystko jednak nie jest to miernik dla hobbystów – i choć przydaje się w wielu sytuacjach, to raczej jest to zakup drugorzędny, dla zaawansowanych elektroników, ze szczególnym uwzględnieniem prototypowania i naprawy urządzeń, gdzie sprawdza się i wymienia się pojedyncze komponenty.

Paweł Kowalczyk, EP

eprasa.pl ef7662c802

Stopnie wejściowe wzmacniaczy operacyjnych

O tym, jak działa wzmacniacz operacyjny, wie każdy elektronik poważniej związany z układami analogowymi. Dobierając układy do konkretnych zastosowań, zbyt rzadko jednak zadajemy sobie pytanie: w jaki sposób topologia tego układu wpłynie na parametry całego urządzenia? W tym artykule nieco przybliżam ten temat.

Wnętrze „magicznego trójkąta", jak czasem bywa nazywany wzmacniacz operacyjny przez początkujących studentów, składa się z trzech podstawowych bloków – szczegóły na **rysunku 1**. Na samym wejściu mamy wzmacniacz różnicowy, którego głównym zadaniem jest obsługa sygnału różnicowego, czyli zredukowanie wpływu składowej sumacyjnej przy jednoczesnym uwypukleniu składowej różnicowej. Następnym blokiem jest wzmacniacz o wysokim wzmocnieniu z (najczęściej) sztucznie dodanym jednym biegunem transmitancji – dla zachowania stabilności wzmacniacza operacyjnego. Ostatnim blokiem jest stopień wyjściowy, który redukuje impedancję wyjściową do możliwie niskiej lub… konkretnie określonej wartości, na przykład w celu uzyskania dopasowania.

Wszystkie te trzy bloki są istotne do zapewnienia prawidłowej pracy wzmacniacza operacyjnego i jego uniwersalności, jaką znamy z obecnie produkowanych modeli, lecz każdy z nich ma inny wpływ na parametry wzmacniacza. Okazuje się jednak, że – zgodnie z zasadą wzmacniania szumów w układach elektronicznych – to pierwszy stopień ma decydujący wpływ na całkowity poziom szumów układu. Poza tym producenci stosują różne rodzaje stopni wejściowych po to, by uzyskać dywersyfikację parametrów swoich wyrobów. Jeżeli chodzi o pozostałe dwa stopnie, zróżnicowanie ich konstrukcji nie jest już tak znaczące, a ogólna idea pozostała niezmieniona od dekad.

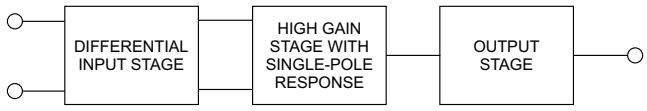
Najprostszym przykładem jest wzmacniacz różnicowy na pojedynczej parze tranzystorów bipolarnych – **rysunek 2**. Takie stopnie wejściowe były spotykane przede wszystkim w archaicznych wzmacniaczach operacyjnych, jak µA709, ale okazuje się, że sama idea nie została porzucona. Oprócz tranzystorów NPN, pokazanych na rysunku, stosuje się również PNP – potencjały wejść mogą wówczas osiągać wartości niższe niż potencjał ujemnej gałęzi zasilającej. Tym, co wyróżnia tę konstrukcję, jest możliwość uzyskania bardzo niskiego offsetu napięciowego (nawet 10 µA!), wysokich częstotliwości pracy oraz – co istotne z naszego punktu widzenia – bardzo niskiego napięcia szumów, rzędu nawet 1 nV/√Hz.

Nie ma się co dziwić, wszak jest to po prostu najprostszy układ ze wszystkich możliwych. Ma jednak dwie wady: pobiera stosunkowo wysoki prąd wejściowy (50 nA…10 µA) oraz jest bardzo wrażliwy na rozbieżność rezystancji sterujących wejściami, właśnie ze względu na wysoką wartość prądu polaryzacji. Niemniej jednak doświadczony projektant poradzi sobie z takim wyzwaniem. Dobra informacją jest fakt, że prądy pobierane przez bazy tranzystorów stopnia wejściowego z reguły są dobrze wyrównane. Z mojego doświadczenia wynika jeszcze, że takie wzmacniacze operacyjne bywają niemożliwe do utrzymania w stanie stabilnym przy konfiguracji w roli wtórnika napięciowego (tj. przy jednostkowym wzmocnieniu), co z reguły jest opatrywane dopiskiem w karcie katalogowej *unity gain unstable*.

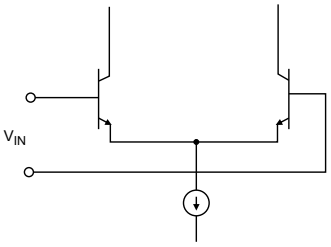
Modyfikacja tego stopnia wejściowego polega na dodaniu dwóch źródeł prądowych jak na **rysunku 3**. Taki układ charakteryzuje się mniejszym prądem pobieranym przez wejścia (nie więcej niż 10 nA), za to… nie da się jednoznacznie ustalić kierunku jego przepływu! Dobrze to widać w nocie katalogowej, która podaje prąd wejściowy opatrzony znakiem „±". Po prostu, w zależności od temperatury, prąd bazy tranzystora układu różnicowego może pobierać prąd większy lub mniejszy niż ten, który wypływa z jego źródła prądowego. Tak jest zbudowany chociażby popularny wzmacniacz OP07 o bardzo niskim offsecie napięciowym – by jednak taki efekt uzyskać, rezystancje sterujące jego wejściami muszą być dobrze dobrane (to jest relatywnie niskie), gdyż dokładna wartość prądu płynąca przez wejście nie jest możliwa do ustalenia. Większa również może być pojemność wejściowa.

Takie rozwiązanie także pozwala uzyskać niskie napięcie szumów, ponieważ różnicowy sygnał wejściowy nadal „widzi" tylko dwa złącza baza-emiter połączone szeregowo. Wzrasta jednak wartość szumu prądowego, a to z racji wstawienia dodatkowych źródeł prądowych, które wnoszą swoje szumy do układu. To jest kolejny powód, by stosować możliwie niskie impedancje w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego.

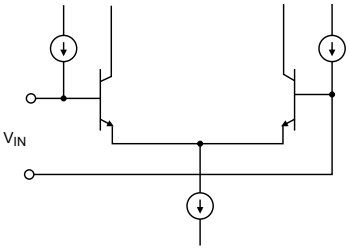
Część wzmacniaczy operacyjnych ma rozwiązany problem wysokiego natężenia prądu wejściowego w inny sposób – **rysunek 4** to fragment schematu wewnętrznego popularnego układu LM324.



Rysunek 1. Uproszczony schemat blokowy typowego wzmacniacza operacyjnego [1]

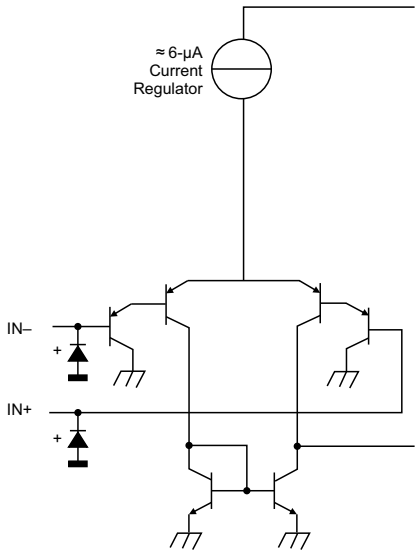


Rysunek 2. Najprostszy stopień wejściowy z tranzystorami bipolarnymi [1]

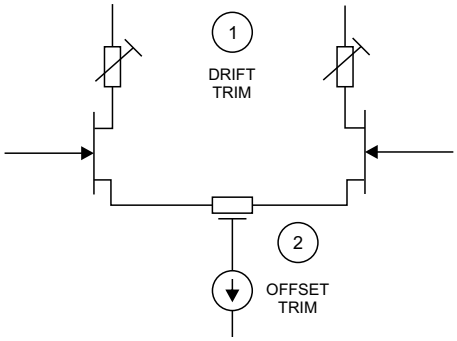


Rysunek 3. Stopień wejściowy z kompensacją prądów polaryzujących wejścia [1]

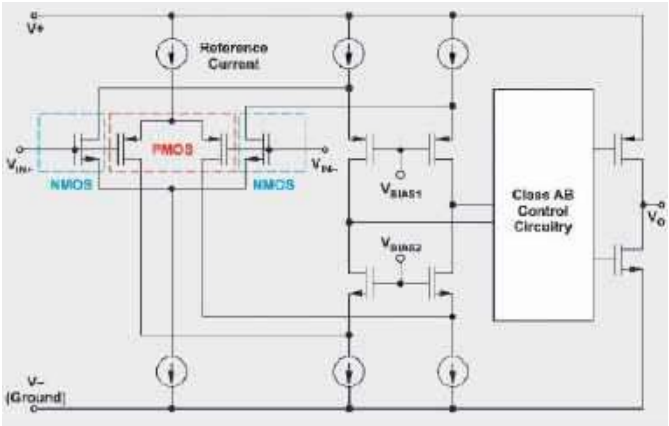
eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 4. Stopień wejściowy z wtórnikami napięciowymi [2]



Rysunek 5. Wejściowy układ różnicowy z tranzystorami JFET [1]



Rysunek 6. Uproszczony schemat wzmacniacza w technologii CMOS [3]

Tranzystory układu różnicowego są opatrzone wtórnikami napięciowymi, które zwiększają impedancję wejściową poprzez zmniejszenie prądów wejściowych. Zalety: mniejsze natężenie prądu wejściowego oraz ustalony kierunek jego przepływu. Wady: większy offset napięciowy (wszak trzeba „upilnować" cztery złącza baza-emiter pod względem napięcia przewodzenia), wyższe napięcie szumów oraz, co szczególnie dotkliwe, bardzo… bardzo… wąskie pasmo przenoszenia. Powodem jest praca tranzystorów wejściowych ze szczególnie małym prądem. Z tego powodu takie wzmacniacze operacyjne potrafią „obcinać" słyszalnie składowe z pasma akustycznego. Nie tego oczekujemy po układach wzmacniających w XXI wieku.

Odrębnym tematem są wzmacniacze operacyjne z tranzystorami polowymi, na przykład JFET – **rysunek 5**. Ich niewątpliwą zaletą jest bardzo niski prąd wejściowy, mierzony w femtoamperach. Wiąże się z tym również niska wartość szumu prądowego. Z tego względu wzmacniacze tego typu są „wdzięczne" w aplikacjach wymagających dostosowania do wysokich impedancji, na przykład w przedwzmacniaczach gramofonowych lub mikrofonowych. Nieco gorzej wypada sprawa pasma pracy, a jeszcze trudniej o niską wartość napięcia szumów. Jak to zwykle bywa, trzeba szukać kompromisów. Utrudnienie stanowi też węższy zakres dopuszczalnych napięć wejściowych, ponieważ napięcie progowe tranzystora polowego jest wyższe niż napięcie przewodzenia złącza PN w tranzystorze bipolarnym. Układy JFET potrafią mieć wysoki slew-rate, jak popularny TL082 – co jest pożądane z punktu widzenia odpowiedzi impulsowej układu.

Często spotykanym sposobem realizacji wzmacniaczy operacyjnych jest technologia CMOS, jak na **rysunku 6**. Pokazany na nim układ ma dwa komplementarne układy różnicowe, co umożliwia obsługę pełnego zakresu napięć wejściowych – jest to wejście typu rail-to-rail. Efektem ich działania są cztery sygnały, które zostają połączone do dwóch przy użyciu podwójnej (również komplementarnej) kaskody. Wejścia pobierają prąd o niemal zerowym natężeniu, więc nie trzeba dbać o wyrównanie rezystancji sterujących nimi.

Takie wzmacniacze są z reguły energooszczędne i pracują z niskimi napięciami zasilania, jednak jest to okupione trzema koszmarnymi wadami, przynajmniej z punktu widzenia audio. Po pierwsze, ich pasmo rzadko przekracza 1 MHz, więc po skonfigurowaniu do pracy ze wzmocnieniem większym niż kilka V/V daje o sobie znać ograniczenie pasma pracy. Ich slew-rate również jest bardzo niski, co wynika z pracy tranzystorów z niskimi prądami. Ale najgorsze jest napięcie szumów. Ojej, jak ten wynalazek szumi! Zatem, pomimo zachęcających parametrów, warto przy tych układach przyjrzeć się ich dokumentacji, bo można srogo się zdziwić…

Michał Kurzela, EP

Źródła:
[1] https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/op-amp-applications/section1.pdf
[2] https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm324.pdf
[3] https://www.ti.com/lit/an/slyt759/slyt759.pdf?ts=1751865976192

REKLAMA
AUDIO
Miesięcznik audiofilski
polski przedstawiciel European Imaging and Sound Association
przeglądaj, czytaj i kup na **www.ulubionykiosk.pl**

eprasa.pl ef7662c802

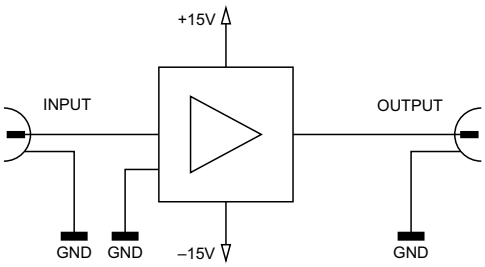
Sztuczna masa w układach audio

Sztuczną masę wprowadza się w miejscach, w których nie jest ona związana wprost z zasilaczem. Jakie to sytuacje i o czym warto pamiętać podczas projektowania tego obwodu?

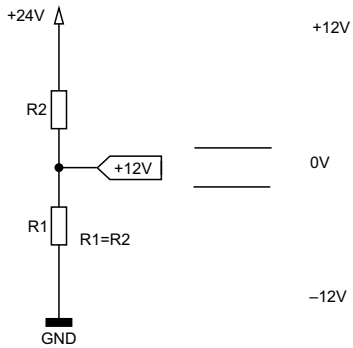
Każdy, kto jakkolwiek jest związany z elektroniką analogową, kojarzy takie stworzenia jak wzmacniacze operacyjne. Lepsze, gorsze, szybsze, wolniejsze etc. W zdecydowanej większości przypadków wzmacniacze w elektronice audio powinny być zasilane napięciem symetrycznym po to, by prawidłowo pracowały z sygnałami mającymi zmienną polaryzację względem masy. Właśnie, tylko której?

Jeżeli mamy do dyspozycji zasilacz symetryczny, który może dawać jednocześnie napięcia o wartościach, przyjmijmy, +15 V oraz –15 V, wówczas wszyscy są szczęśliwi. Masę sygnału wejściowego, sygnału wyjściowego oraz zasilacza łączymy razem (pamiętając o regułach prowadzenia masy), niemniej jednak są to punkty mające ten sam potencjał, czyli bezpośrednio połączone ze sobą. Taka sytuacja jest możliwa w wielu urządzeniach zasilanych z sieci. Ilustracja takiego układu znajduje się na **rysunku 1**.

Sprawa jednak staje się trudniejsza, gdy do dyspozycji mamy zasilacz niesymetryczny, na przykład o pojedynczym napięciu 24 V. Wtedy trzeba „zrobić" sobie z niego zarówno +12 V, jak i –12 V. Sztuczki na to są powszechnie znane, a najpopularniejsza polega na użyciu dzielnika oporowego, jak na **rysunku 2**. Dzielnik rezystancyjny ma tę przewagę, że zawsze dzieli podane napięcie na dwie równe części, z dokładnością do tolerancji użytych rezystorów, niezależnie od aktualnej wartości napięcia nań podanego. Wiąże się to jednak z koniecznością zmiany węzła odniesienia, bowiem teraz za 0 V trzeba przyjmować wyjście owego dzielnika, zaś zaciski zasilacza – za bieguny zasilacza symetrycznego.



Rysunek 1. Połączenie mas przy zastosowaniu zasilacza symetrycznego



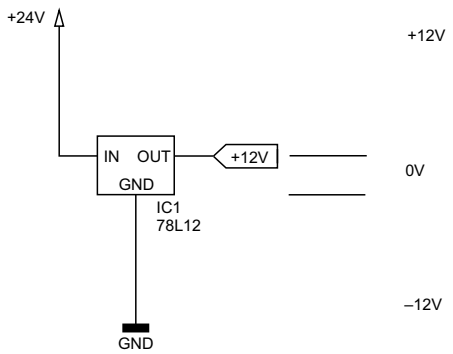
Rysunek 2. Dzielnik rezystancyjny wytwarzający napięcie symetryczne

Teraz zaczynają się schody. Wiele osób radośnie uznaje, że przecież potencjał to potencjał i nie ma się co przejmować rezystorami tego dzielnika. Umieszczają więc tam rezystory o absurdalnie wysokich wartościach, typu 470 kΩ, argumentując to chęcią redukcji mocy pobieranej przez układ. Wszystko dobrze, tylko co się stanie, kiedy w tę sztuczną masę jakiś obwód wpuści prąd o natężeniu, załóżmy, jedynie 20 μA? Odpowiem: potencjał tejże „masy" podniesie się o 4,7 V. Zatem trudno mówić o stabilności tego potencjału w sytuacji, kiedy pobranie (lub dodanie) do węzła jakiegokolwiek prądu będzie miało na niego wpływ tak drastyczny, że może przesunąć punkty pracy podzespołów – prowadząc w skrajnym przypadku do obcinania fragmentów przenoszonego sygnału.

Można tak zrobić, ale pod dwoma warunkami. Po pierwsze, musimy mieć pewność, że sztuczną masą są polaryzowane jedynie obwody pobierające naprawdę znikomy prąd, na przykład wejścia wzmacniaczy operacyjnych z tranzystorami polowymi. Wówczas te pikoampery pobieranego przez nie prądu faktycznie można zaniedbać. Za drugi warunek uważam zbocznikowanie jednego z rezystorów dzielnika (najczęściej jest to dolny, od strony masy zasilacza) kondensatorem lub zespołem kondensatorów. Ma to na celu zmniejszenie impedancji wewnętrznej tak utworzonej „sztucznej masy" oraz zawężenie pasma szumowego – wszak rezystory są doskonałym źródłem szumu termicznego.

Nieco inaczej sprawa wygląda w sytuacji, gdy korzystamy z bardziej prądożernych wzmacniaczy operacyjnych, jest ich więcej bądź zasilane układy analogowe są zbudowane w jeszcze inny sposób, na przykład z elementów dyskretnych. Wtedy trzeba się liczyć z przepływem prądu o naprawdę niemałej wartości, co gorsza – nie wiadomo, w którą stronę. W zamierzchłych czasach, kiedy każdy element półprzewodnikowy był na wagę złota, stosowano najczęściej rezystory o mniejszych wartościach. Wiąże się to jednak ze zwiększonym poborem prądu przez układ, co jednak nie w każdej sytuacji może być tolerowane. Zwłaszcza kiedy zależy nam na stabilności tego potencjału, a prądy płynące przez rezystory mogą być znaczące.

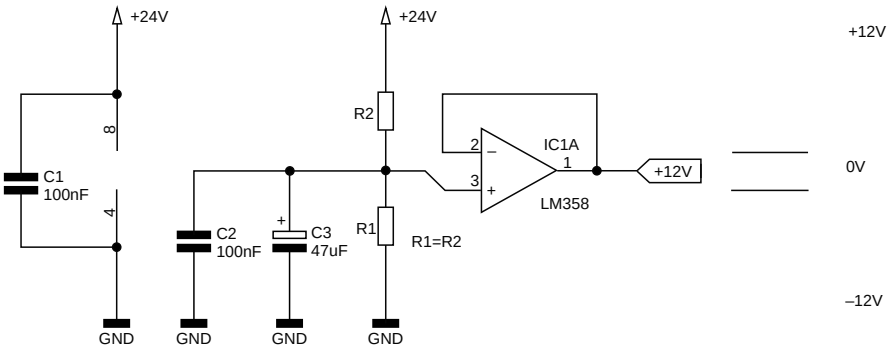
Niektórzy proponują stosowanie stabilizatora liniowego do wytworzenia tego potencjału – jak na **rysunku 3**. Na pierwszy rzut oka może mieć to sens, bowiem mając stabilizowane napięcie z zasilacza (np. wspomniane 24 V), użycie niewielkiego stabilizatora liniowego, pokroju 78L12, może dać potencjał równy połowie napięcia wejściowego. Wszystko fajnie, tylko jest w tym pewien



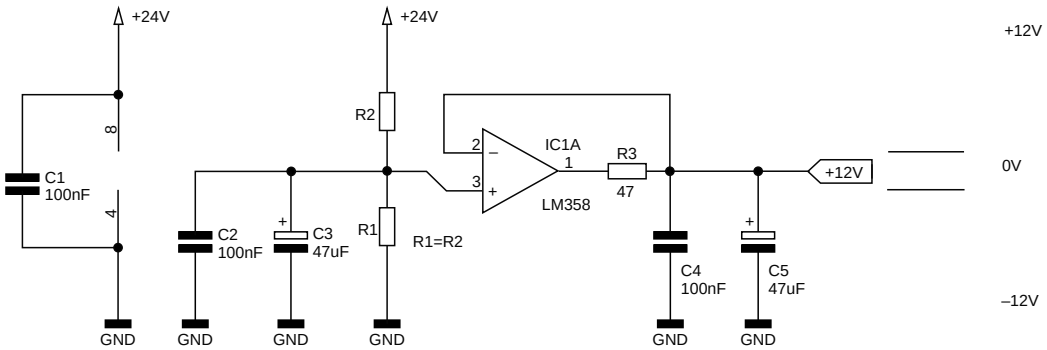
Rysunek 3. Stabilizator liniowy jako „źródło" sztucznej masy

eprasa.pl ef7662c802

szkopuł. Otóż stabilizatory liniowe napięcia dodatniego potrafią jedynie „wyrzucać” z siebie prąd, nie są w ogóle przystosowane do jego „wciągania”, gdyż to one są źródłami napięcia w danym układzie. Ponieważ jest to „sztuczna masa”, musimy mieć na uwadze, że prąd będzie mógł tam zarówno wpływać, jak i wypływać, co więcej – ten kierunek będzie mógł się co chwilę zmieniać. Więc o ile z obniżaniem potencjału tego węzła taki stabilizator sobie poradzi (po prostu „doleje” nieco prądu z zasilacza), o tyle to wobec jego podnoszenia będzie on już zupełnie bezradny, prąd ten nie będzie miał żadnego ujścia. Zatem nie polecam takiego rozwiązania. Użycie stabilizatora napięcia ujemnego również nic nie zmieni, odwróci jedynie sytuację: układ będzie mógł zareagować na wzrost potencjału węzła „sztucznej masy”, na jego spadek już nie.



Rysunek 4. Wzmacniacz operacyjny redukuje impedancję zasilającą sztuczną masę



Rysunek 5. Dodatkowa filtracja potencjału sztucznej masy

To, co się widuje najczęściej, to wzmacniacz operacyjny użyty w roli wtórnika napięciowego, jak na **rysunku 4**. W dzisiejszych czasach to rozwiązanie można uznać za najbardziej uzasadnione – wzmacniacze operacyjne są tanie i mają wystarczające parametry, nawet pospolity LM358 da sobie radę. Wyjście takiego wzmacniacza potrafi zarówno „wciągać”, jak i „wyrzucać” prąd, więc jego kierunek nie ma znaczenia. Trzeba jednak pamiętać o tym, by możliwie zminimalizować poziom szumu na wejściu takiego wtórnika, czyli odfiltrować go kondensatorem, a lepiej – zespołem kondensatorów.

Pożądane jest, kiedy można zawęzić okno szumowe również na wyjściu, dodając dolnoprzeupustowy filtr RC o niewygórowanych parametrach – rezystor o wartości kilkudziesięciu omów i kondensator o pojemności kilkudziesięciu mikrofaradów, zbocznikowany chociażby zwykłym „ceramikiem” 100 nF – szczegóły na **rysunku 5**. Nie spowoduje to znacznego zwiększenia impedancji wewnętrznej tak utworzonej sztucznej masy, zwłaszcza że i tak nadzoruje ją wzmacniacz operacyjny. Z mojego doświadczenia wynika, że takie działanie ma pozytywny wpływ na finalny poziom szumów w układzie. Warto zauważyć, że nie trzeba się aż tak przejmować wyrównaniem rezystancji sterującej wejściami wzmacniacza operacyjnego, ponieważ dodatkowy offset napięciowy, który wywoła ta nierówność, nie ma w tym układzie żadnego znaczenia.

Michał Kurzela, EP

REKLAMA

eprasa.pl ef7662c802

Konwersja cyfrowo-analogowa w technice audio (2)

W pierwszej części artykułu opublikowanej w EP05/2025, zaprezentowaliśmy zarys teoretycznych podstaw konwersji cyfrowo-analogowej. Teraz natomiast zajmiemy się praktycznymi realizacjami przetworników D/A. Jak już wiemy, przetworniki cyfrowo-analogowe konwertują liczby binarne na sygnał analogowy (napięcie lub prąd), przy czym wielkość wyjściowa jest proporcjonalna do wejściowej wartości cyfrowej. Klasyczne, wielobitowe przetworniki audio opierają się na co najmniej trzech różnych topologiach i – tym samym – różnych zasadach działania.

Omawianie konwerterów cyfrowo-analogowych zazwyczaj rozpoczyna się od najbardziej intuicyjnego przetwornika binarnie ważonego. Przykład 4-bitowej realizacji takiego układu pokazano na **rysunku 1**.

Przetwornik binarnie ważony to układ wzmacniacza sumującego napięcia na wejściu odwracającym. Można wykazać, że napięcie wyjściowe V_{OUT} jest równe:

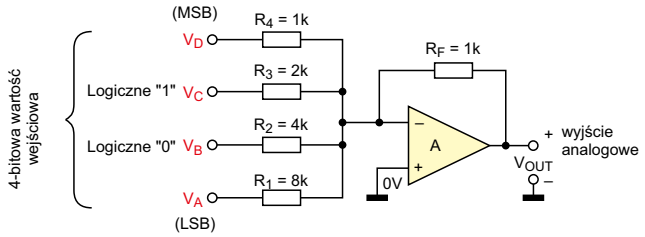
$$V_{out} = -\left[\frac{R_F}{R_4}V_D + \frac{R_F}{R_3}V_C + \frac{R_F}{R_2}V_B + \frac{R_F}{R_1}V_A\right]$$

A podstawiając za RF, R1, R2, R3 i R4 wartości z rysunku 1, otrzymamy:

$$V_{out} = -\left[V_D + \frac{1}{2}V_C + \frac{1}{4}V_B + \frac{1}{8}V_A\right]$$

Jeżeli teraz przyjmiemy, że napięcia na wejściach VA…VD przyjmują tylko dwie wartości: 0 V (logiczne zero) lub na przykład +5 V (logiczna jedynka), to otrzymamy na wyjściu analogowym napięcie proporcjonalne do cyfrowego kodu wejściowego.

Opisana topologia może dobrze się sprawdzić w bardzo prostych przetwornikach o kilkubitowej rozdzielczości, natomiast jest zupełnie bezużyteczna w przypadku wielobitowych konstrukcji, koniecznych w wysokiej jakości przetwornikach sygnału audio. W przypadku układu z rysunku 1 rezystancja R1, odpowiadająca najmniej znaczącemu bitowi (LSB), ma wartość 1 kΩ, a R4 – odpowiadająca najbardziej znaczącemu bitowi – ma wartość 8 kΩ, czyli R4=(2^4)·R1. Przyjmijmy, że mamy taki przetwornik o rozdzielczości 16 bitów, potrzebujemy zatem układu z szesnastoma opornikami. Jeżeli – tak jak na rysunku 1 – oporność R1 będzie równa 1 kΩ, to wartość R16 wyniesie:



Rysunek 1. 4-bitowy, ważony binarny przetwornik analogowo cyfrowy

Pierwsza część artykułu znajduje się pod adresem: **https://ulubionykiosk.pl/media**

R16=(2^{16})·R1

czyli:

1 kΩ·65536=65,536 MΩ

Bardzo trudne jest wykonanie układu dokładnych rezystorów o tak dużej rozpiętości wartości rezystancji, szczególnie w układzie scalonym, który – dla rynku konsumenckiego – musi być stosunkowo tani. Dodatkowo taki układ rezystorów nie będzie stabilny temperaturowo i wraz ze zmianami warunków otoczenia będzie następowała zmiana funkcji przetwarzania, powodująca wprowadzanie błędów do charakterystyki konwertera. Topologia ważonego przetwornika cyfrowo-analogowego, pokazanego na rysunku 1, jest zatem bezużyteczna w wielobitowych układach audio.

Przetwornik o topologii R2-R

Wspomnianej wady układu binarnego ważonego pozbawiona jest topologia drabinki rezystorowej typu R2-R, pokazana na **rysunku 2**.

Sieć drabinki rezystancyjnej R-2R to długi ciąg równolegle i szeregowo połączonych rezystorów o wartościach R i 2·R. Taki układ jest dużo łatwiej wykonać w technologii scalonej. Sieć działa jako połączone ze sobą, kolejne dzielniki napięcia. Napięcie wyjściowe V_{OUT} zależy wyłącznie od oddziaływania ze sobą napięć wejściowych VA, VB. VC...Vn, a nie bezpośrednio od wartości rezystancji rezystorów drabinki. Napięcia wejściowe mogą zatem przybierać wartości 0 V dla stanu logicznego niskiego lub V_{IN} – dla stanu wysokiego. V_{IN} jest napięciem referencyjnym, nazywanym najczęściej V_{REF}. Analizując sieć rezystorów można wykazać, że napięcie wyjściowe jest równe:

$$V_{out} = \frac{V_A + 2V_B + 8V_D + 16V_E + 32V_F + \ldots nV_N}{2^n}$$

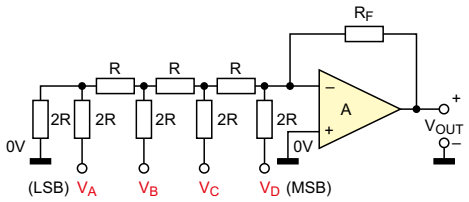
gdzie: n oznacza liczbę wejść cyfrowych przetwornika, czyli jego rozdzielczość bitowa

Rozdzielczość napięciowa przetwornika, czyli zmiana napięcia na wyjściu spowodowana zmianą kodu wejściowego na pozycji najmniej znaczącego bitu, wynosi:

$$Rozdzielczość = V_{(LSB)} = \frac{V_{IN}}{2^n}$$

gdzie VIN jest tożsame z napięciem odniesienia VREF.

Przykładowo: dla przetwornika 16-bitowego z napięciem odniesienia równym 5 V rozdzielczość jest równa 5/(2^{16})=5/65536=92 μV.



Rysunek 2. 4-bitowy przetwornik R2-R

eprasa.pl ef7662c802

Tabela 1. Zestawienie wybranych przetworników o topologii R-2R

Typ przetwornika	Rozdzielczość bitowa	Producent
PCM56	16	Burr-Brown (obecnie TI)
PCM61	18	Burr-Brown (obecnie TI)
PCM1702	20	Burr-Brown (obecnie TI)
PCM1704	24	Burr-Brown (obecnie TI)
AD1851	16	Analog Devices
AD1861	18	Analog Devices
AD1865	18	Analog Devices

To pokazuje, że nawet przy 16-bitowej rozdzielczości mamy do czynienia z bardzo małymi poziomami, które łatwo jest zdegradować szumem i innymi zakłóceniami toru audio, a tym samym... ograniczyć jego rzeczywistą rozdzielczość.

Topologia R-2R jest szeroko stosowana w scalonych przetwornikach audio przeznaczonych dla rynku konsumenckiego. W **tabeli 1** pokazano zestawienie wybranych, wielobitowych przetworników audio, opartych na topologii R-2R.

Wszystkie te przetworniki (za wyjątkiem AD1865) mogą konwertować jeden kanał audio, zatem do budowy przetwornika stereofonicznego potrzebne są 2 układy.

Na **rysunku 3** pokazano schemat blokowy przetwornika PCM56 firmy Burr Brown. Dane audio, przesyłane szeregowo przez wejścia Clock, LE i Data, są zatrzaskiwane w 16-bitowym rejestrze wejściowym. Po skompletowaniu całego, 16-bitowego słowa dane są przekazywane na przetwornik DAC typu R-2R. Blok Reference dostarcza dokładne i stabilne napięcie referencyjne.

Jak już wspomniałem, możliwe jest wykonanie scalonego przetwornika R-2R wysokiej klasy, jednak wymaga to zaawansowanej technologii łączącej krzemową strukturę układu z rezystorami cienkowarstwowymi. Aby uzyskać dużą dokładność rezystancji, poszczególne elementy w sieci R-2R układu są w procesie produkcyjnym dodatkowo kalibrowane (trymowane) za pomocą lasera. Przykładem zastosowania bardzo wyrafinowanej technologii jest układ PCM1704, który według danych katalogowych uzyskuje rozdzielczość 24-bitową, może próbkować dane z maksymalną częstotliwością f_S=96 kHz i charakteryzuje się parametrem THD na poziomie 0,0008%. Zdecydowana większość przetworników wielobitowych cieszy się bardzo dobrą opinią wśród osób ceniących dźwięk na najwyższym poziomie. Jednak mimo tych bardzo dobrych parametrów i opinii, w większości przypadków nie są one produkowane i stosowane w nowych konstrukcjach, a ceny ze starych zapasów osiągają zawrotne wartości. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest zapewne bardzo kłopotliwy i – co za tym idzie – kosztowny proces produkcyjny. Ograniczenie stanowi rozdzielczość bitowa, która – za wyjątkiem układów PCM1704 i PCM1702 – wynosi 16 lub 18 bitów, a dodatkowym problemem jest niższa częstotliwość próbkowania. Nie bez znaczenia jest także fakt, że do układów stereofonicznych potrzebujemy 2 przetworników. Ale i to nie wszystko. Kompletne przetworniki potrzebują do pracy trzeciego układu: filtra cyfrowego. Realizuje on proces nadpróbkowania w interpolatorze cyfrowym i cyfrowej filtracji dolnoprzepustowej. Gwoli ścisłości należy wspomnieć, że wśród amatorów DIY na całym świecie istnieje cała rzesza entuzjastów rozwiązania nazywanego NOS DAC, czyli No OverSampling DAC. Przetworniki budowane według tej idei nie mają filtra cyfrowego realizującego nadpróbkowanie, a sygnał PCM jest podawany bezpośrednio na wejście przetworników DAC. Nie stosuje się też dolnoprzepustowych filtrów rekonstruujących. Brak filtra cyfrowego w strukturze przetwornika powoduje, że konieczne są dodatkowe układy logiczne, które dostosowują format I²S do formatu wejściowego przetworników (wymagającego podanie sygnałów Clock, LE i Data).

Brak nadpróbkowania i analogowej rekonstrukcji sygnału wyjściowego ma powodować, że dźwięk po konwersji będzie inny, niż w klasycznych rozwiązaniach – a wg opinii wielu lepszy lub nawet dużo lepszy. Ponieważ jest to artykuł techniczny, nie będziemy nad tym dyskutować – skutki tak wykonanej konwersji możemy zobaczyć, analizując pierwszą część niniejszego opracowania.

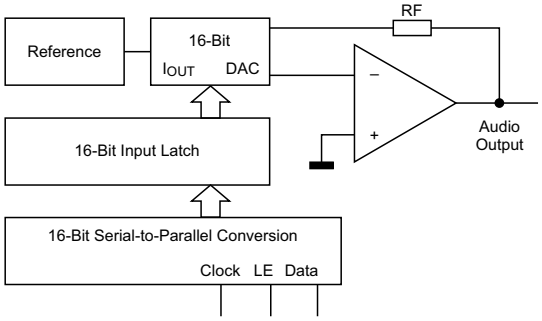
Przetwornik DEM (Dynamic Element Matching)

Jak już wspomniałem, choć sieci drabinkowe R2-R pozwalają na zbudowanie konwertera DAC o wysokiej jakości, to ich dobre parametry są okupione trudnościami technologicznymi i – w konsekwencji – relatywnie wysoka ceną. Dlatego szukano przed laty tańszych alternatyw, pozwalających na uzyskanie równie dobrych parametrów, ale mniejszym kosztem.

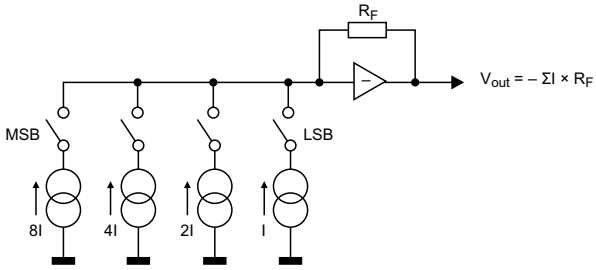
W 1976 roku Rudy van de Plassche, młody inżynier ds. badań i rozwoju pracujący w Laboratoriach Badawczych Philipsa, publikuje pracę zatytułowaną „Dynamic Element Matching for High-Accuracy Monolithic D/A Converters", w której proponuje nowatorski, prosty i dokładny konwerter cyfrowo-analogowy o nazwie „Dynamic Element Matching" w skrócie DEM. Ta metoda ta nie wymagała trymowania laserowego rezystorów w trakcie produkcji i mogła być produkowana masowo przy użyciu ówcześnie dostępnej, standardowej technologii bipolarnej.

Idea działania jest podobna do ważonego przetwornika binarnego, pokazanego na rysunku 1. Zamiast rezystorów stosuje się jednak źródła prądowe (**rysunek 4**). Jeżeli bitowi MSB (najstarszemu) przypiszemy źródło w wydajności prądowej I, to kolejnej wadze odpowiadać będzie źródło o wydajności 2/I – i tak dalej, aż do najmłodszego bitu. Oczywiście otrzymamy tu również bardzo dużą rozpiętość wartości prądu, który musi być bardzo precyzyjnie podzielony.

Jeżeli najstarszemu bitowi przetwornika 16-bitowego przypiszemy prąd 2 mA, to w przypadku najmłodszego bitu będzie to natężenie

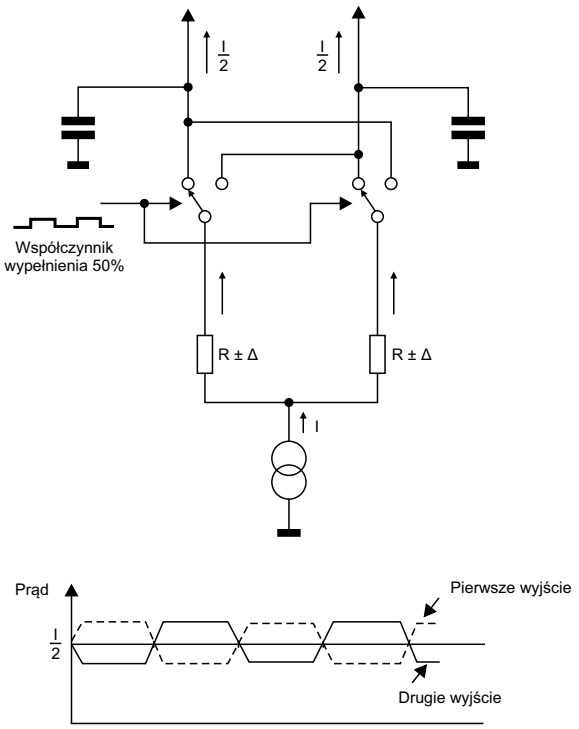


Rysunek 3. Schemat blokowy przetwornika PCM56



Rysunek 4. Sterowanie prądami ważonymi i ich sumowanie

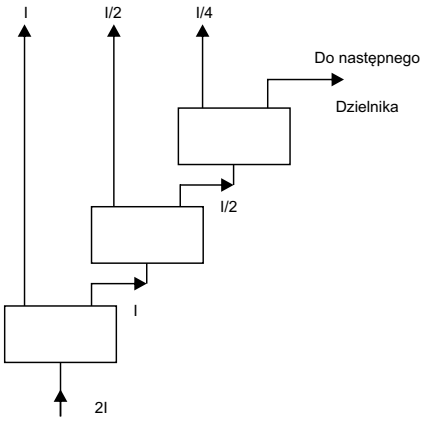
eprasa.pl ef7662c802



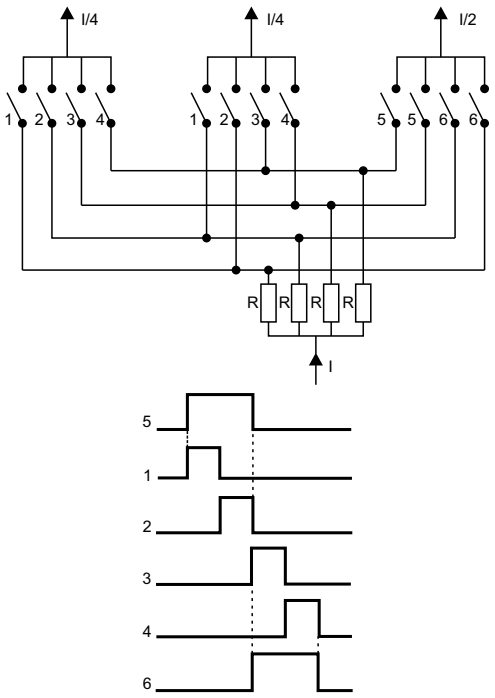
Rysunek 5. Koncepcja podziału prądu przez 2

zaledwie 61 nA! Tu musi się pojawić pytanie: jak wygenerować *dokładne* prądy binarnie ważone (malejące w stosunku 1:2) dla wszystkich naszych bitów danych? Najlepiej dzieląc każdy następny prąd dokładnie na pół. No dobrze, ale jak to zrobić, skoro wiemy, że każdy realny element aktywny lub pasywny wprowadzi jakiś błąd i ten błąd będzie się sumować w każdym kolejnym stopniu podziału?

Rudy van de Plassche zaproponował sprytne rozwiązanie problemu. **Rysunek 5** pokazuje źródło prądowe zasilające parę nominalnie równych rezystorów. Jednak ich rezystancje nie będą idealnie równe ze względu na tolerancje produkcyjne i dryft temperaturowy. Dlatego prąd jest tylko w przybliżeniu dzielony po połowie. Para przełączników umieszcza każdy rezystor szeregowo z każdym wyjściem. Średni prąd na każdym wyjściu będzie wtedy identyczny – pod warunkiem, że współczynnik wypełnienia sygnału sterującego przełącznikami wyniesie dokładnie 50%. A to jest już łatwo osiągalne w układzie dzielenia częstotliwości przez dwa. Kryterium dokładności zostało przeniesione z wartości rezystancji do dziedziny czasu, w której wysoka dokładność łatwa do osiągnięcia. Uśrednianie prądu jest wykonywane przez parę kondensatorów, które nie muszą być wysokiej jakości.



Rysunek 6. Dzielenie prądów ważonych



Rysunek 7. Bardziej złożony, dynamiczny system dopasowywania elementów. Cztery sygnały sterujące (1, 2, 3, 4) o współczynniku wypełnienia 25% zamykają przełączniki odpowiadające danej liczbie. Dwa sygnały (5, 6) mają współczynnik wypełnienia 50%, co powoduje, że dwa prądy trafiają do prawego wyjścia. Całość pozwala zatem na uzyskanie podziału 1:1:2

Przyjmijmy, że prąd I na rysunku 5 ma wartość 4 mA. Na wyjściach dzielnika mamy 2 prądy po 2 mA. Jeżeli teraz jedno z wyjść będzie źródłem prądu dla kolejnego układu dzielnika, to otrzymamy w konsekwencji prądy o dokładnych wartościach: 4 mA, 2 mA i 1 mA. Łącząc kaskadowo szereg dzielników otrzymujemy ciąg dokładnych prądów binarnie ważonych – patrz **rysunek 6**.

Ważną cechą układu DEM jest fakt, że dokładność dzielenia prądów nie zależy od częstotliwości, a tylko od dokładności (czasowej) współczynnika wypełnienia. W praktyce wybór częstotliwości DEM ma jednak pewne znaczenie. Panuje pogląd, że powinna ona być większa od częstotliwości próbkowania i stanowić jej wielokrotność. W literaturze można znaleźć dokładne analizy wpływu częstotliwości taktującej DEM na zniekształcenia THD i szumy konwersji. Wynika z nich, że nie ma idealnego rozwiązania i potrzebny okazuje się wyważony kompromis.

W praktyce można uzyskać redukcję liczby etapów dzielenia, stosując bardziej złożony układ przełączania. Generuje on prądy o stosunku 1:1:2, dzieląc prąd na cztery ścieżki, a następnie dwie z nich trafiają do jednego wyjścia, jak pokazano na **rysunku 7**.

Topologia DEM jest używana w 14-bitowym przetworniku TDA1540 i kultowych już, 16-bitowych, stereofonicznych przetwornikach TDA1541 i TDA1541A, produkowanych przez Philipsa w czasach, gdy firma ta zajmowała się jeszcze przemysłem półprzewodnikowym. TDA1541A o najlepszej gradacji produkcyjnej osiąga dzisiaj zawrotne ceny i jest przez wielu postrzegany jako najlepszy przetwornik w historii. My skupimy się jednak na parametrach technicznych, pomijając jego legendę i niemierzalne, subiektywne właściwości brzmieniowe. Ten stary układ ma – z dzisiejszego punktu widzenia – dość przeciętne parametry. Zniekształcenia harmoniczne to typowe 0,0018%, THD+N wynosi 0,79%, a nieliniowość przetwarzania to ±1 LSB. Schemat blokowy układu został pokazany na **rysunku 8**.

Na schemacie uwzględniono zewnętrzny konwerter prąd/napięcie, zrealizowany na bazie wzmacniacza operacyjnego NE5534.

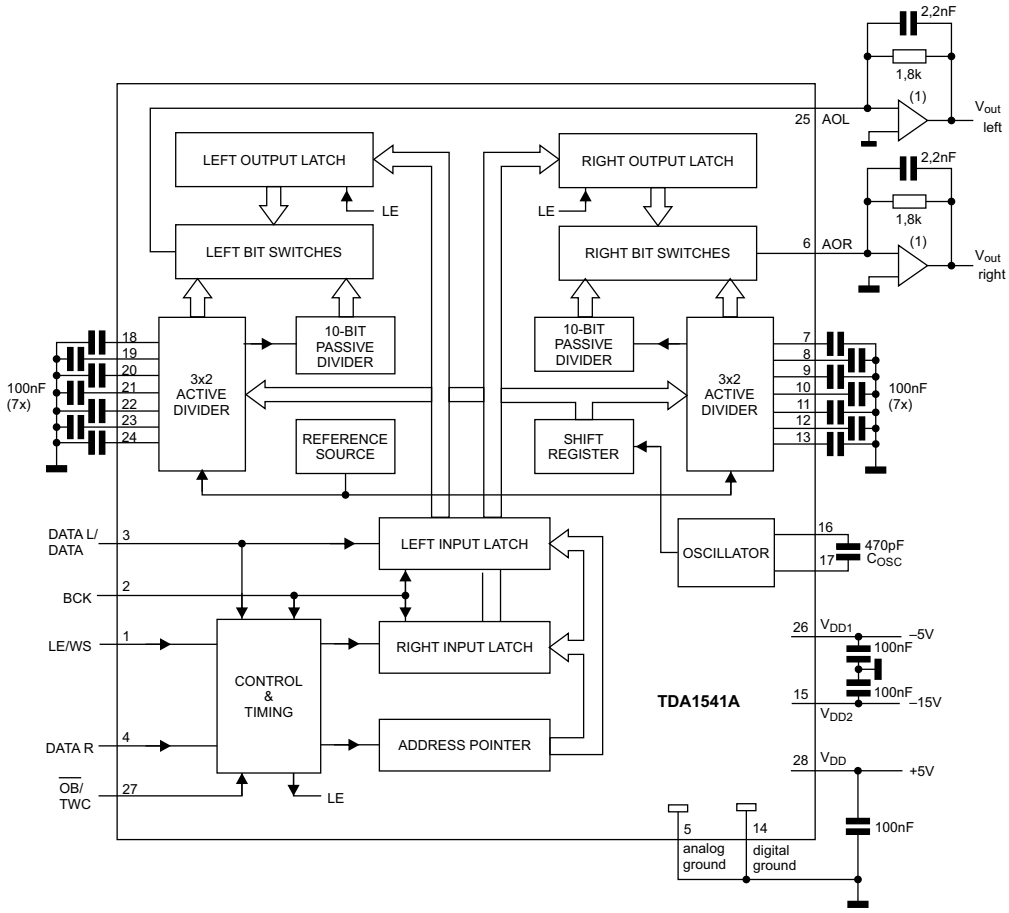
eprasa.pl ef7662c802

Układ dzielnika w każdym kanale podzielony jest na 6-bitowy, aktywny dzielnik (dzielący prądy od największego, czyli od bitu MSB) i 10-bitowy, pasywny dzielnik, obsługujący 10 najmłodszych bitów.

Rudy van de Plassche dokładnie opisał działanie zarówno dzielnika aktywnego, jak i pasywnego. Działanie filtra aktywnego jest oparte na zasadzie dzielenia prądów w stosunku 1:1:2 (rysunek 7).

Rysunek 9 prezentuje podstawową koncepcję pasywnego dzielnika prądu, opartą na skalowaniu emitera tranzystorów. Ta koncepcja jest używana do generowania pozostałych dziesięciu, najmniej znaczących bitów. Układ składa się tylko z 1024 tranzystorów Darlingtona i nie wymaga żadnej procedury trymowania lub regulacji, działa ponadto w szerokim zakresie temperatur pracy. Ponieważ wszystkie tranzystory znajdują się na wspólnym podłożu krzemowym układu scalonego, to mają takie samo napięcie baza-emiter i równe prądy kolektora. W ten sposób prąd wejściowy jest dzielony na 1024 równe prądy o wartości jednego LSB każdy. Prąd wyjściowy bitu MSB tego pasywnego dzielnika jest konstruowany przez kombinację 512 prądów kolektora.

Działanie przetwornik Philips TDA1543 opiera się na podziale prądów tylko za pomocą dzielników pasywnych, dla wszystkich bitów (tj. bez użycia DEM). Ma on istotnie słabsze parametry i w założeniu był przeznaczony dla popularnych odtwarzaczy CD. Prądy z dzielników są włączane i wyłączane zależnie od wartości słowa wejściowego przez analogowe klucze. Ich rezystancja w stanie załączenia może wpływać na wartość prądu, szczególnie w przypadku większych prądów odpowiadających starszym bitom. Aby temu zapobiec, stosuje się klucze o większej szerokości ścieżki półprzewodnikowej w torach obsługujących prądy o wyższych natężeniach.

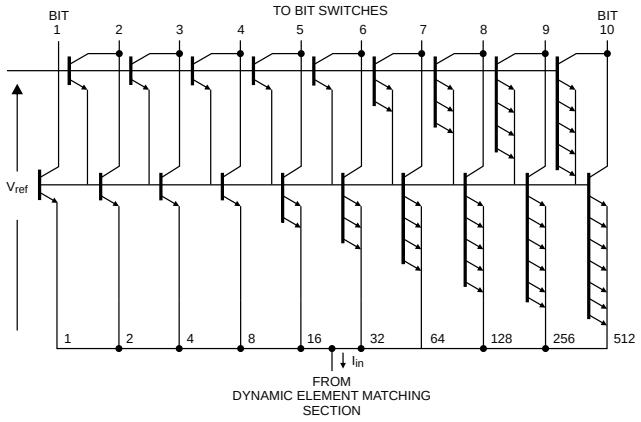


Rysunek 8. Schemat blokowy układu TDA1541A

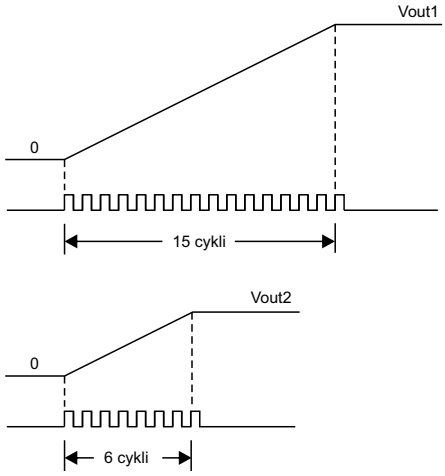
Przetwornik z integratorem

Ogólna koncepcja działania takiego przetwornika jest stosunkowo prosta. Napięcie na wyjściu jest w istocie napięciem na kondensatorze ładowanym przez źródło prądowe od zera, przez czas proporcjonalny do wartości danej wejściowej (próbki). Jeżeli dana wejściowa ma małą wartość, to czas ładowania jest krótki i kondensator naładuje się do niskiego napięcia, natomiast jeśli wartość wejściowa jest większa, to czas ładowania jest dłuższy, zaś cały proces prowadzi do zgromadzenia wyższego ładunku.

Załóżmy, że mamy przetwornik czterobitowy. Na jego wejściu mogą się pojawiać wartości od 0 do 15. Na **rysunku 10** pokazano

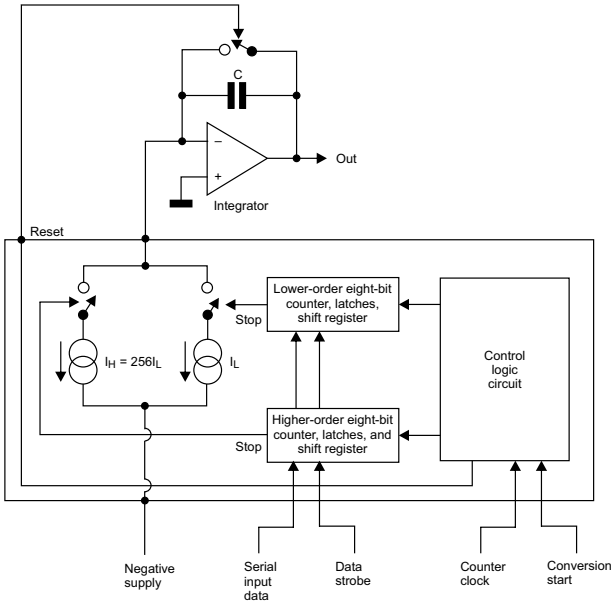


Rysunek 9. Koncepcja pasywnego, 10-bitowego dzielnika prądu

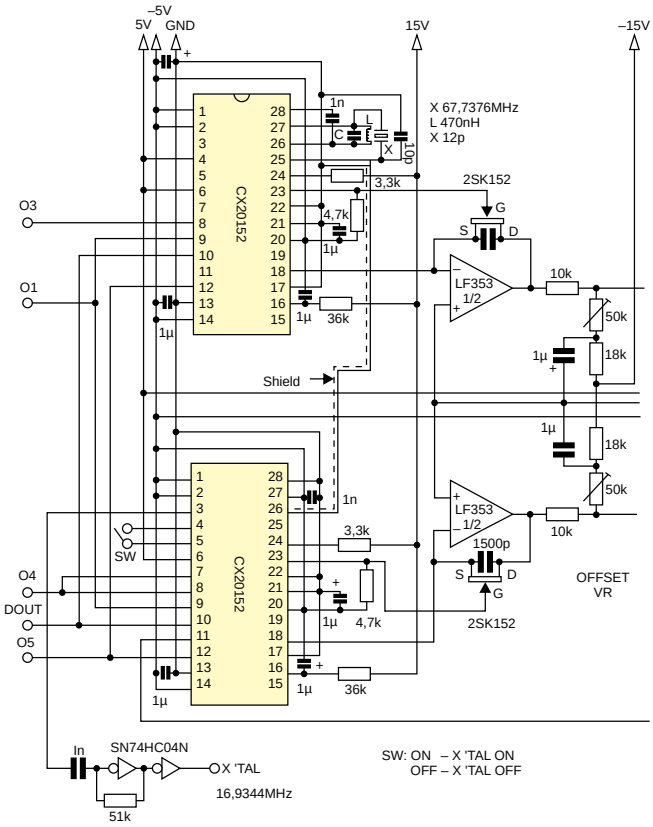


Rysunek 10. Zależność napięcia wyjściowego od czasu ładowania w przetworniku z integratorem

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 11. Uproszczony schemat przetwornika Sony CX-20017



Rysunek 12. Fragment implementacji przetwornika CX 20152 firmy Sony. W układzie integratora zastosowano wzmacniacz LF353 z wejściami na tranzystorach JFET o prądzie upływu ok. 50 pA

dwa przypadki. W pierwszym z nich kondensator jest ładowany przez 15 cykli (dla danej wejściowej równej 15). Pojemność naładuje się do napięcia V_{out1}. Drugi przypadek pokazuje ładowanie w czasie tylko sześciu cykli, przez co kondensator naładuje się do wyraźnie niższego napięcia, odpowiadającego wartości wejściowej równej 6.

Niestety, w praktyce nie jest to takie proste. Załóżmy, że chcemy zbudować wysokiej jakości przetwornik 16-bitowy. Nasze źródło prądowe musi mieć bardzo małą wydajność prądową, a liczba cykli zliczania musi być duża, żeby uzyskać wymaganą rozdzielczość. Dla dużych wartości wejściowych naładowanie kondensatora może trwać zbyt długo – a powinno przecież nastąpić w czasie krótszym niż okres przebiegu określającego częstotliwość próbkowania. Dlatego zegar taktujący konwersję musiałby mieć częstotliwość 65536 razy większą od częstotliwości próbkowania, czyli… około 3 GHz. To oczywiście powodowałoby bardzo duże problemy technologiczne i w praktyce taka implementacja nie była możliwa.

I znów – tak jak w poprzednich implementacjach konwerterów R2R i DEM – trzeba było wymyślić jakiś sposób na pokonanie problemu. Podzielono więc 16-bitowe słowo wejściowe na osiem młodszych bitów i 8 starszych bitów. Pierwsze w z nich określają czas ładowania kondensatora małym prądem IL, a osiem starszych bitów – dużym prądem IH. Należy przy tym pamiętać, że wartość IH musi być dokładnie 256 razy większa od IL. Dokładność wielokrotności tych prądów wpływa znacząco na dokładność konwersji, ale – jak już wiemy – istnieją sposoby, by to zrobić naprawdę dokładnie. Na **rysunku 11** pokazano uproszczony schemat blokowy przetwornika Sony CX-20017. Widoczne są źródła prądu wyższego i niższego rzędu (IH i IL) oraz powiązane z nimi obwody czasowe. Niezbędny integrator jest w tej implementacji układem zewnętrznym.

Przy takim rozwiązaniu zegar taktujący czas zliczania może mieć częstotliwość ok. 20 MHz w przypadku przetwornika o rozdzielczości 16 bitów i częstotliwości próbkowania 48 kHz. Maksymalny czas ładowania kondensatora wyniesie wtedy 12,8 µ – pozostaje zatem jeszcze 8 µs na pobranie kolejnej próbki i resetowanie układu, które polega głównie na rozładowaniu kondensatora.

Kondensator C zewnętrznego integratora musi mieć niski prąd upływu, a wzmacniacz operacyjny – możliwie najmniejszy prąd polaryzacji wejść. Najlepiej, gdyby był to wzmacniacz z wejściami JFET.

Z tych względów układ integratora jest montowany z zewnętrznych elementów, a nie wbudowany w strukturę przetwornika. Na **rysunku 12** pokazano przykład fragmentu implementacji przetwornika CX 20152 firmy Sony z zewnętrznymi układami integratora.

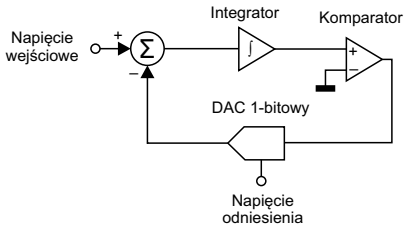
Obecnie przetworniki wielobitowe nie są już produkowane, ale – co najważniejsze – nie są nawet dalej rozwijane. Układy te okazały się bowiem trudne do scalenia i drogie w produkcji. Wraz z rozwojem cyfrowej techniki audio przestały spełniać oczekiwania producentów sprzętu. Maksymalna użyteczna rozdzielczość do 20 bitów i częstotliwość próbkowania do 48 kHz okazały się niewystarczające. Do zbudowania kompletnego przetwornika potrzebny był ponadto dodatkowy układ filtra realizującego funkcje nadpróbkowania, co również zwiększało koszty i komplikowało układ. Trzeba pamiętać, że przetworniki DAC są obecnie stosowane na bardzo dużą skalę w wielu urządzeniach konsumenckich: w telefonach komórkowych, laptopach, telewizorach itp. Tam liczą się dobre parametry, ale też małe rozmiary, niskie napięcie zasilania, niewielki pobór mocy itd. Przetworniki wielobitowe są bardzo cenione przez część środowiska audiofilskiego, jednak to chyba za mało, żeby ktoś podjął się produkcji i być może nawet rozwijania skomplikowanego technologicznie układu. Przetworniki wielobitowe DAC zostały bezpowrotnie zastąpione przez konstrukcje z modulatorami delta-sigma.

Przetworniki z modulatorami delta-sigma

Modulator delta-sigma może pracować zarówno w przetwornikach analogowo-cyfrowych, jak i cyfrowo-analogowych. Topologia i koncepcja działania są takie same, ale trochę inaczej pracują pewne bloki modulatora. Najłatwiej będzie wyjaśnić działanie modulatora w konwersji analogowo-cyfrowej.

Na **rysunku 13** pokazano modulator delta sigma pierwszego rzędu. W praktyce stosuje się bardziej rozbudowane modulatory wyższych

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 13. Modulator delta-sigma w konwerterze A/C

rzędów, ale najłatwiej jest wytłumaczyć działanie na najprostszym przykładzie.

Modulator jest zbudowany z:

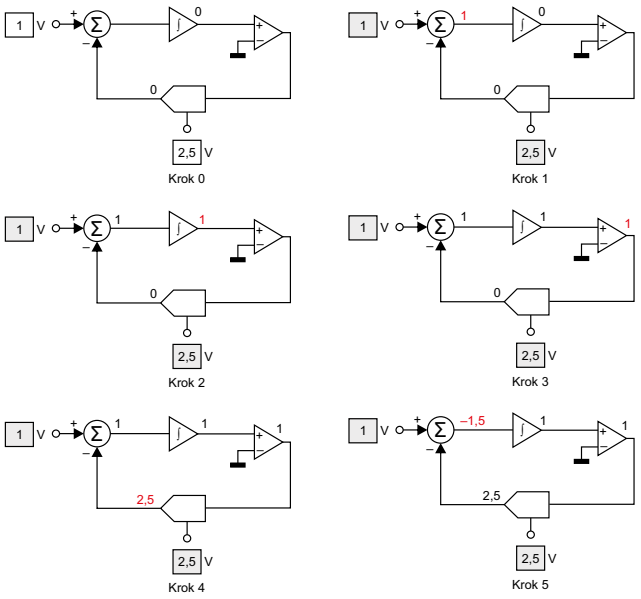
- sumatora,
- integratora,
- komparatora sterującego wejściem 1-bitowego przetwornika DAC,
- 1-bitowego konwertera DAC.

Modulator jest taktowany zegarem, który wyznacza kolejne etapy pracy. Sumator sumuje napięcie wejściowe z napięciem sprzężenia zwrotnego, które trafia na sumator z wyjścia 1-bitowego przetwornika DAC.

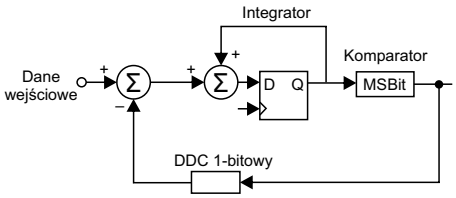
Integrator dodaje napięcie z wyjścia sumatora do napięcia z poprzedniego kroku integracji. Tak wytworzone napięcie jest pamiętane w integratorze. Jeżeli aktualny potencjał na wyjściu integratora jest większy lub równy zero, to na wyjściu komparatora panuje stan wysoki, który następnie trafia na wejście 1-bitowego przetwornika DAC. Jeżeli na wejściu tego ostatniego także panuje stan wysoki, to na wyjściu DAC pojawia się napięcie odniesienia VREF – w przeciwnym przypadku na wyjściu DAC panuje napięcie zerowe.

Jak już wiemy, napięcie z wyjścia DAC jest napięciem sprzężenia zwrotnego. Modulator nie konwertuje zatem bezwzględnej wartości napięcia na wejściu, ale jego zmiany względem poprzedniego cyklu konwersji.

Na **rysunku 14** pokazano kolejne działania modulatora delta-sigma, pracującego jako przetwornik analogowo-cyfrowy. W stanie początkowym (krok „0") na wejście trafia napięcie +1 V, napięcie na wyjściu DAC jest równe zeru, podobnie jak wartość napięcia z poprzedniej integracji. Napięcie odniesienia wynosi +2,5 V. W pierwszym kroku napięcie wejściowe jest sumowane z zerowym napięciem sprzężenia zwrotnego i na wyjściu sumatora pojawia się



Rysunek 14. Działanie modulatora delta-sigma w konwersji ADC



Rysunek 15. Modulator delta-sigma w konwersji A/C

napięcie +1 V. W drugim kroku przechodzi ono na wyjście integratora. Komparator wykrywa napięcie +1 V na wejściu i wystawia stan wysoki na wyjściu (krok „3"). Ten zaś, trafiając na wejście 1-bitowego DAC powoduje, że na wyjściu przetwornika pojawi się napięcie odniesienia +2,5 V (krok „4"). W kroku „5" od napięcia wejściowego +1 V zostanie w sumatorze odjęte +2,5 V napięcia odniesienia, zatem na wejściu integratora pojawi się napięcie –1,5 V. W kolejnym kroku – niepokazanym już na rysunku – integrator doda napięcie +1 V (z poprzedniej integracji) do napięcia –1,5 V (z wyjścia sumatora) i na wyjściu integratora pojawi się stan niski.

Na wyjściu modulatora pojawiają się zatem wartości opisujące zmianę wartości wejściowej, a nie sama wartość wejściowa jako taka.

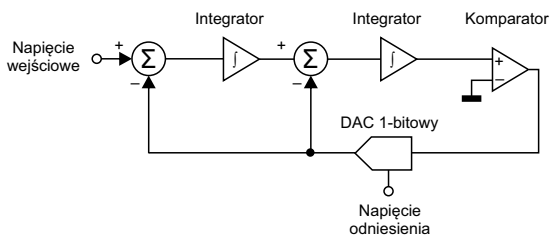
Konwerter cyfrowo-analogowy typu delta-sigma został schematycznie pokazany na **rysunku 15**. Równoległe dane wejściowe są podawane na sumator, gdzie od ich wartości odejmowana jest wartość z pętli sprzężenia zwrotnego. Następnie są one sumowane w integratorze z danymi z poprzedniej konwersji. Wyjście integratora trafia na komparator MSB. Jeżeli najstarszy bit danych jest jedynką, to na wyjściu komparatora (i jednocześnie modulatora) panuje stan wysoki, zaś w przypadku bitu zerowego – stan niski. Dalej dane z wyjścia komparatora są podawane na przetwornik DDC, który kompletuje z nadchodzących bitów wyjścia komparatora słowo wielobitowe – odejmowane następnie w sumatorze. W ten sposób cały cykl powtarza się przez cały czas pracy przetwornika.

Dane wejściowe mają zazwyczaj długość kilku bitów i są wydzielane ze słowa o długości próbki (na przykład 16-bitowego) przez układ filtrów.

Pokazane na rysunkach 13 i 15 układy są modulatorami pierwszego rzędu. Można uzyskać lepsze parametry konwersji stosując modulatory wyższych rzędów. Przykład idei modulatora drugiego rzędu pokazano na **rysunku 16**.

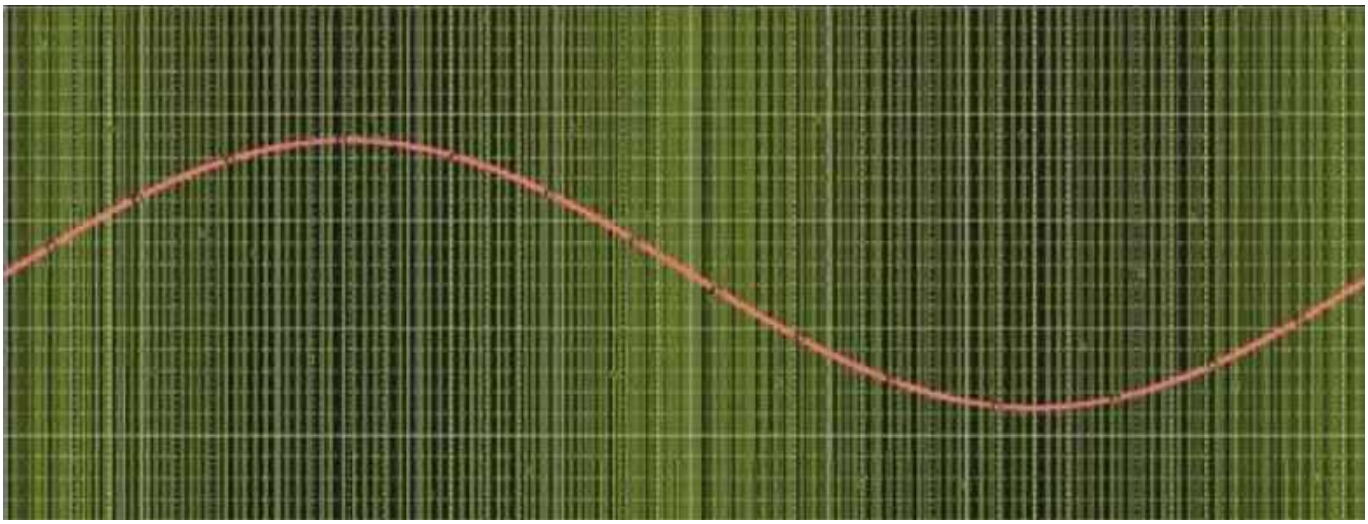
Modulatory wyższych rzędów, z powodu problemów z fazą sygnałów, mogą być niestabilne i potrzebują dodatkowych układów korekcji fazy.

Jak już wiemy, konwersja cyfrowo-analogowa charakteryzuje się błędem (szumem) kwantyzacji, zależnym od długości słowa konwersji. W modulatorach delta-sigma mamy konwertery o małej długości słowa (od jednego do kilku bitów). Taka konwersja charakteryzuje się dużym poziomem błędu kwantyzacji. Dodatkowo sama modulacja delta-sigma niesie ze sobą błąd modulacji, bo strumień wyjściowy jest zawsze pewnym przybliżeniem sygnału wejściowego. Ten błąd ogranicza się przez stosowanie modulatorów wyższego rzędu



Rysunek 16. Modulator delta-sigma drugiego rzędu

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 17. Przykładowy przebieg na wyjściu modulatora delta-sigma

i większej długości słowa wejściowego (w przypadku DAC). Aby uzyskać dobre parametry sygnału wyjściowego, przetworniki cyfrowo-analogowe z modulatorami delta-sigma muszą mieć wbudowane filtry interpolatora, wielokrotnie nadpróbkujące dane wejściowe, a sygnał wyjściowy musi podlegać kształtowaniu szumu (noise shaping). Jak wspomniano we wcześniejszym artykule z tej serii, kształtowanie szumu nie usuwa szumów konwersji z sygnału, tylko przesuwa ich energię poza pasmo użyteczne (słyszalne). Potem taki sygnał jest poddawany filtrowaniu dolnoprzepustowemu i szum jest usuwany z sygnału użytecznego.

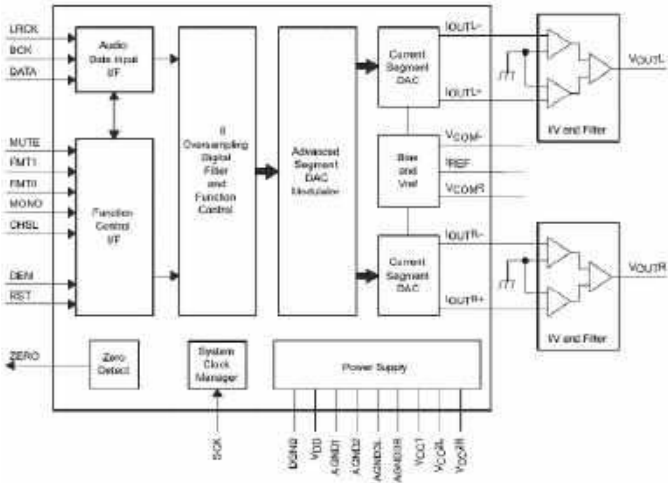
Na wyjściu modulatora delta-sigma dostajemy zmodulowany przebieg o zmiennej gęstości zer i jedynek, reprezentujący analogowy sygnał – doskonale widać to na **rysunku 17**.

Przebieg ten przypomina modulację PWM, ale modulator delta-sigma daje lepszą jakość konwersji w porównaniu do klasycznego sygnału PWM. Aby z takiego ciągu impulsów uzyskać analogowy sygnał, należy go odfiltrować dolnoprzepustowo.

Przetworniki z modulatorami delta-sigma prawie całkowicie wyparły rozwiązania wielobitowe. Swój sukces zawdzięczają dużej łatwości implementacji w strukturach scalonych. Mimo że praktyczne układy modulatorów są o wiele bardziej skomplikowane, to mają one charakter układów cyfrowych, a niezbędne bloki analogowe są dzięki temu stosunkowo proste. Okazało się, że nawet konieczność wbudowania w układ kompletnych, zaawansowanych filtrów decymatora (nadpróbkujących dane wejściowe) jest tańsze i łatwiejsze, niż na przykład stosowanie trymowanych laserowo drabinek R-2R.

Dzisiejsze konwertery DAC typu delta-sigma potrafią osiągać parametry lepsze od przetworników wielobitowych. Jako przykład weźmiemy bardzo dobry i stosunkowo tani przetwornik PCM1794A firmy Burr Brown (obecnie Texas Instruments).

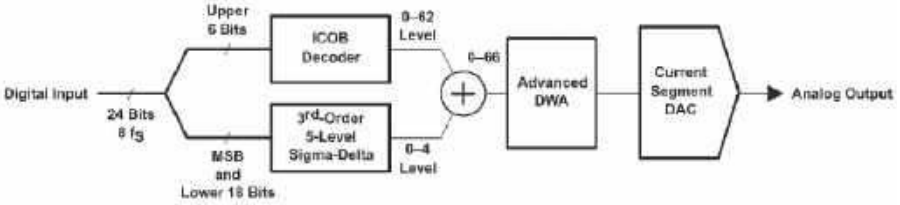
Producent chwali się imponującymi parametrami układu: zakres dynamiki to 132 dB dla najlepszych warunków pomiarowych: sygnału wyjściowego 9 Vrms i konfiguracji mono (DAC konwertuje tylko jeden kanał). W gorszych warunkach dynamika wynosi 129 dB w konfiguracji stereo i przy sygnale 4,5 V (RMS). Zniekształcenia harmoniczne z szumem (THD+N) wynoszą 0,0004%. Przetwornik ma rozdzielczość 24 bitów i może pracować z częstotliwościami próbkowania od 10 kHz do 200 kHz. PCM1794A zapewnia zbalansowane wyjścia prądowe. Różnicowy sygnał wyjściowy ma wartość 7,8 mA (pk-pk).



Rysunek 18. Schemat blokowy przetwornika PCM1794A

Na **rysunku 18** pokazano schemat blokowy przetwornika. Przed konwerterem DAC umieszczono blok filtra 8-krotnego nadpróbkowania. Nadpróbkowanie jest elementem niezbędnym dla prawidłowego działania funkcji kształtowania szumów kwantyzacji modulacji delta-sigma. Widoczny na schemacie blok o nazwie Advanced Segment DAC Modulator został pokazany na **rysunku 19**.

Cyfrowe dane wejściowe o długości 24 bitów i częstotliwości próbkowania 8·fS z wyjścia filtra oversamplingu są – za pomocą filtra cyfrowego – rozdzielane na sześć najbardziej znaczących bitów (MSB) i 18 bitów pozostałych. MSB są konwertowane na odwrócony, komplementarny kod binarny offsetowy (ICOB). 18 mniej znaczących bitów, łącznie z najstarszym bitem MSB, jest przetwarzanych przez pięciopoziomowy modulator delta-sigma trzeciego rzędu, domyślnie działający z częstotliwością 64·fs. Grupy danych przetwarzane w konwerterze ICOB i modulatorze delta-sigma trzeciego rzędu są sumowane (w celu utworzenia kodu cyfrowego) do 66 poziomów,



Rysunek 19. Schemat blokowy Advanced Segment DAC Modulator

eprasa.pl ef7662c802

a następnie przetwarzane przez uśrednianie ważone danymi (DWA) w celu zmniejszenia szumu wytwarzanego przez niedopasowanie elementów. Dane do 66 poziomów z DWA są konwertowane na wyjście analogowe w sekcji przetwornika różnicowo-prądowego.

Tyle – dość ogólnych – informacji podaje producent w danych technicznych. Niestety informacje na temat szczegółów działania przetworników z modulatorami delta-sigma jest bardzo mało – na przykład w przypadku TDA1541 można sobie tylko pomarzyć o szerszym opisie. Jest to trend widoczny nie tylko w dokumentacjach przetworników DAC, ale ogólnie większości współczesnych elementów i układów elektronicznych. Brak szczegółów działania, niekompletne dokumentacje czy niedostępne instrukcje serwisowe (w przypadku gotowych urządzeń) to już norma. W konsekwencji często nie wiemy czy i jakiego modulatora użyto w przetworniku.

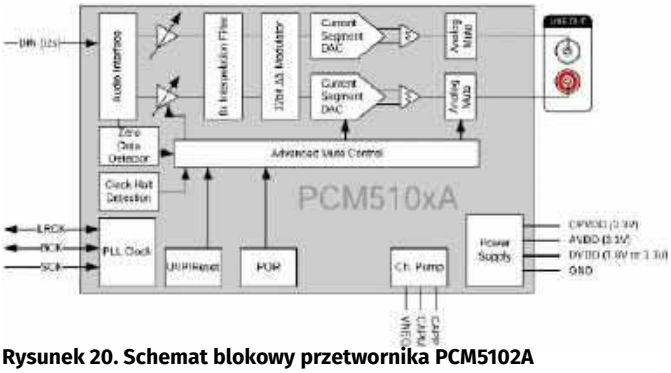
PCM1794A to oczywiście jeden z przykładów bardzo dobrego przetwornika z modulatorem delta-sigma. Na rynku jest kilku producentów oferujących konwertery o podobnych lub nawet lepszych parametrach.

Układy ESS Sabre DAC są wysoko cenione wśród audiofilów ze względu na wyjątkową jakość dźwięku i możliwości reprodukcji audio o wysokiej rozdzielczości. Na przykład układy ES9038PRO są jednymi z liderów rynku przetworników o najwyższych parametrach technicznych i odsłuchowych. Charakteryzują się imponującym zakresem dynamiki rzędu 138 dB (tryb MONO) i bardzo niskimi całkowitymi zniekształceniami harmonicznymi (THD+N=–122 dB), co pozycjonuje je jako silnych graczy w dziedzinie konwersji cyfrowo-analogowej. Układy te nie tylko obsługują wysokie częstotliwości próbkowania, ale także zapewniają zaawansowane opcje filtrowania cyfrowego, dając użytkownikom elastyczność w dostosowywaniu wrażeń słuchowych.

Układ firmy AKM (Asahi Kasei Microdevices) AK4499EQ również słynie z bardzo dobrych parametrów (zakres dynamiki: 138 dB, THD+N: –124 dB) i wysokiej jakości dźwięku, stając się dobrą opcją dla audiofilów poszukujących dźwięku o wysokiej wierności. Układ DAC obsługuje szeroką gamę formatów danych i rozdzielczości, zapewniając kompatybilność z różnymi, wysokiej klasy systemami audio. Układ został zaprojektowany tak, aby obsługiwać wysokie częstotliwości próbkowania (do 768 kHz) oraz formaty danych wejściowych PCM i DSD. AK4499EQ nie jest jednak samodzielnym przetwornikiem – do działania potrzebuje układu AK4199, który zawiera modulator delta-sigma.

Nieistniejąca już firma Wolfson (przejęta przez Cirrus Logic) oferowała swego czasu przetworniki WM8740, WM8741 i WM8742. Miały one trochę gorsze parametry (zakres dynamiki: 128 dB, THD+N: –104 dB), ale były cenione za subiektywnie bardzo dobrą jakość dźwięku. Autor sam używa przetwornika z dwoma układami WM8741 i może te opinie tylko potwierdzić.

Tych kilka konstrukcji to tylko mała próbka możliwości nowoczesnych przetworników cyfrowo-analogowych. Na rynku można znaleźć wiele układów o zróżnicowanych parametrach i cenach, co pozwala dostosować wybrany układ do wymagań technicznych i posiadanego budżetu. Jednym z przykładów może być przetwornik PCM5102A (Texas Instruments) – patrz **rysunek 20**. Układ ten wyznacza nowy trend w układach DAC charakteryzujących się świetnymi parametrami i bardzo prostą implementacją. Rozbudowane przetworniki wymagają wielonapięciowego zasilania (w tym zasilania ujemnego dla wzmacniaczy operacyjnych filtrów analogowych). W niektórych urządzeniach, na przykład zasilanych bateryjnie, taki wymóg będzie zawsze problemem. Układ PCM5102A jest natomiast bardzo prosty w aplikacji – może być zasilany pojedynczym napięciem +3,3 V (zaś jego sekcja cyfrowa akceptuje napięcia z zakresu +1,8...3,3 V). Nadpróbkowanie umożliwia zastosowanie bardzo prostego filtra dolnoprzepustowego,



Rysunek 20. Schemat blokowy przetwornika PCM5102A

zbudowanego z dwóch elementów: rezystora i kondensatora. Nacisk na elastyczność aplikacyjną widać chociażby po budowie interfejsu wejściowego I²S. Przetworniki delta-sigma potrzebują – oprócz standardowych trzech sygnałów (danych, zegara taktującego przesył bitów BCK oraz identyfikacji kanałów PRCK) również sygnału master clock o wielokrotności częstotliwości próbkowania (standardowo od 128·fS do 512·fS). Jeżeli źródło danych audio nie dostarcza przebiegu master clock, to PCM5102A potrafi go sobie wewnętrznie wygenerować w układzie PLL, na podstawie zegara BCK. Można to wykorzystać np. przy budowie przetwornika DAC połączonego interfejsem I²S z Raspberry Pi.

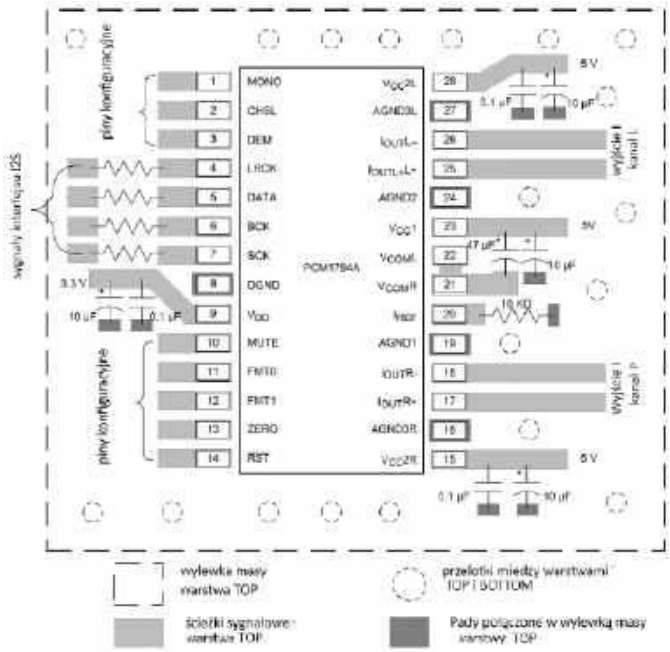
Jak już wspomniałem, przetworniki DAC są obecne we wszystkich nowoczesnych układach audio. Z wyjątkiem transmisji analogowego radia FM wszystkie współczesne media są cyfrowe i konwersja cyfrowo-analogowa okazuje się nieodzowna. Oprócz klasycznych płyt CD także radio DAB, telewizja naziemna DVB-T2, streaming, odtwarzanie plików z nośników wymiennych (np. pamięci USB), czy wreszcie połączenia Bluetooth (na przykład ze słuchawkami) korzystają z cyfrowej reprezentacji materiału audio, który musi zostać przekonwertowany na postać analogową przez przetwornik cyfrowo-analogowy. Dlatego niezbędne są rozwiązania łatwe w produkcji, a w konsekwencji – tanie. Ten warunek spełnia topologia oparta na konwerterach z modulatorem delta-sigma. Przetworniki najwyższej klasy, używane w konstrukcjach audiofilskich, to zapewne ważna, ale niezbyt duża część rynku.

Budowa przetwornika o doskonałych parametrach przez amatora – entuzjastę dobrego brzmienia – nie jest zadaniem szczególnie trudnym. Trzeba jednak znać kilka zasad i konsekwentnie ich przestrzegać. Dwie chyba najważniejsze, to zastosowanie odpowiedniego projektu płytki oraz wybór właściwego układu zasilania. Można próbować różnych rozwiązań – od wspominanych już NOS DAC, aż po klasyczne przetworniki z filtrem cyfrowym interpolatora i analogowym filtrem rekonstruującym.

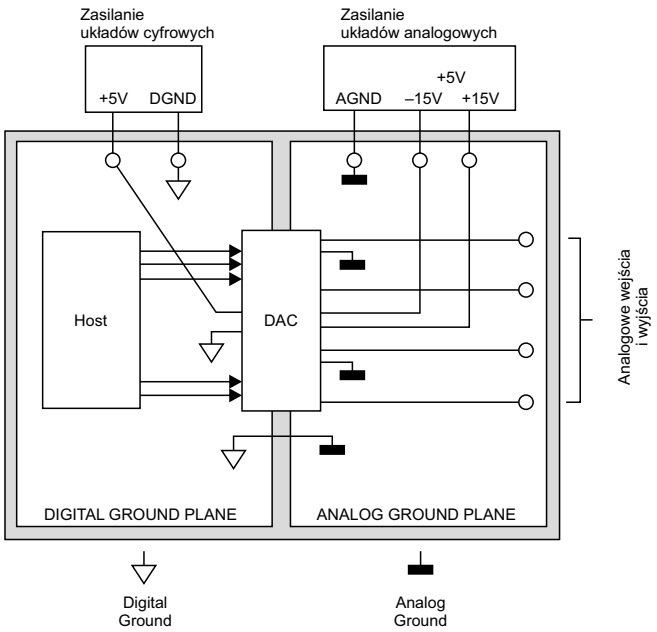
Ważną cechą wpływającą na prawidłową aplikację przetworników jest ich specyficzna budowa. Są to układy typu mixed-signal, czyli zawierające w swojej strukturze zarówno obwody cyfrowe, jak i analogowe. Niestety komplikuje to konstrukcję urządzenia, bo układy cyfrowe mogą wprowadzać do części analogowej zakłócenia, przenoszone głównie przez obwody zasilania i masy. Trzeba bowiem pamiętać, że układy cyfrowe – w trakcie przełączania wewnętrznych obwodów z jednego stanu logicznego na przeciwny – pobierają z obwodów zasilania impulsy prądowe, które generują zakłócenia napięciowe na zasilaniu czułych obwodów analogowych. Aby ten efekt maksymalnie zneutralizować, stosuje się rozdzielanie mas: cyfrowej (DGND) i analogowej (AGND), a także osobne ich wyprowadzenie w układzie scalonym. Podobnie ma się sprawa z liniami zasilającymi obwody cyfrowe oraz analogowe przetwornika.

Niestety i tak obie masy – cyfrowa i analogowa – muszą być ze sobą galwanicznie połączone, żeby układ konwertera mógł

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 21. Sugerowane przez producenta prowadzenie masy i ścieżek w układzie na bazie przetwornika PCM1794A

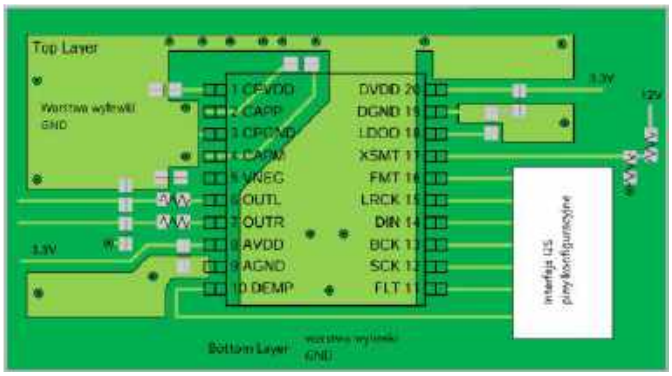


Rysunek 23. Rozdzielenie mas układów cyfrowych i analogowych

działać prawidłowo. Jedną z metod radzenia sobie z tym problemem jest stosowanie jednej wylewki masy, połączonej w wyprowadzeniami DGND i AGND. Takie podejście sugeruje producent układu PCM1794A – **rysunek 21**. Wylewka masy jest położona na warstwie wierzchniej (TOP), żeby wyprowadzenia układu mogły być do niej bezpośrednio przylutowane. Na warstwie spodniej (pod układem) również znajduje się wylewka masy. Obie płaszczyzny miedzi są połączone ze sobą szeregiem przelotek.

Bardzo podobne rozwiązanie jest sugerowane także w przypadku układu PCM5102A. Użyto wspólnej masy dla całego urządzenia. Masę GND można uznać za połączone AGND i DGND. Podobnie jak w przypadku PCM1794A, kluczowe jest takie ułożenie elementów, żeby zakłócenia z układów cyfrowych nie przenikały do części analogowej (**rysunek 22**).

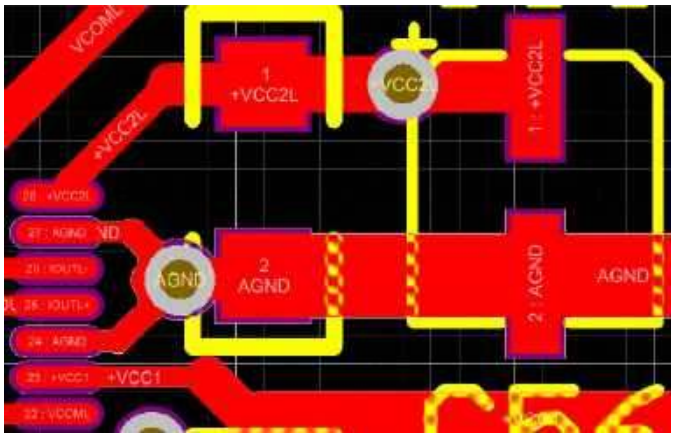
Nie jest to oczywiście jedyne rozwiązanie. Inną możliwością jest stosowanie na płytce dwóch oddzielnych mas: analogowej i cyfrowej (na przykład w formie oddzielnych wylewek połączonych w jednym wybranym miejscu tak, by ewentualne prądy masy obwodów cyfrowych nie płynęły przez obwody analogowe). Projektant musi się tu zdać na własne doświadczenie. Idea takiego rozwiązania została pokazana na **rysunku 23**. Rozdzielenie mas pozwala na stosowanie układów zasilania, które również mają swoje „własne" masy (analogową i cyfrową) niepołączone ze sobą poza wspomnianym punktem wspólnym.



Rysunek 22. Sugerowane przez producenta prowadzenie masy i ścieżek w układzie na bazie przetwornika PCM5102A

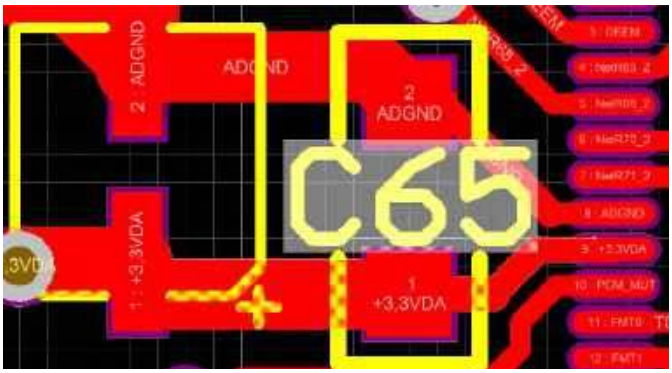
Bardzo ważnym aspektem prawidłowego działania przetworników DAC jest zasilanie. O masach już co nieco powiedzieliśmy. W przetwornikach wyższej klasy sekcje cyfrowa i analogowa powinny być zasilane z osobnych stabilizatorów, nawet jeżeli pracują one z tym samym napięciem (np. +5 V). Przykładem może być nakładka przetwornika DAC przeznaczona do komputerów Raspberry Pi. Mamy tu do dyspozycji jedno napięcie +5 V, które w dodatku zaśmiecone jest zakłóceniami z układów cyfrowych Raspberry Pi. Można sobie częściowo poradzić z tym problemem stosując szeregowe dławiki na liniach zasilania, ale bardzo dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie dwóch stabilizatorów dla sekcji cyfrowej i analogowej, jeżeli przetwornik jest zasilany niższym napięciem np. +3,3 V. Tak jest np. w przypadku PCM5102A. W bardziej rozbudowanych konstrukcjach stosuje się nawet oddzielne uzwojenia transformatorów, mostki prostownicze i filtry.

Bardzo ważnymi aspektami w projekcie układu zasilania są kondensatory blokujące i doprowadzenie ścieżek do wyprowadzeń układu przetwornika. Najczęściej spotykana jest para kondensatorów: ceramiczny 100 nF (tłumiący zakłócenia o wyższych częstotliwościach) i elektrolityczny (aluminiowy lub tantalowy) 1...10 µF, pełniący rolę lokalnego magazynu energii dla współpracującego układu. Kondensatory blokujące powinny być umieszczone jak najbliżej



Rysunek 24. Doprowadzenie zasilania analogowego 5 V (+VCC2L) względem masy AGND do układu PCM1794A

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 25. Doprowadzenie zasilania +3,3 V względem masy DGND do układu PCM1794A

wyprowadzeń układu scalonego, a ścieżki łączące kondensatory i wyprowadzenia zasilania układu – jak najgrubsze. Nowoczesne obudowy mają gęsty raster i stosunkowo cienkie wyprowadzenia, dlatego często jest to zadanie nietrywialne. Na **rysunku 24** pokazano ścieżki zasilania napięcia analogowego 5 V (+VCC2L) wraz z kondensatorami blokującymi w układzie z przetwornikiem PCM1794A. Najbliżej wyprowadzeń znajduje się kondensator ceramiczny SMD w obudowie 1206, a równolegle do niego – kondensator elektrolityczny 10 μF, również w obudowie do montażu powierzchniowego.

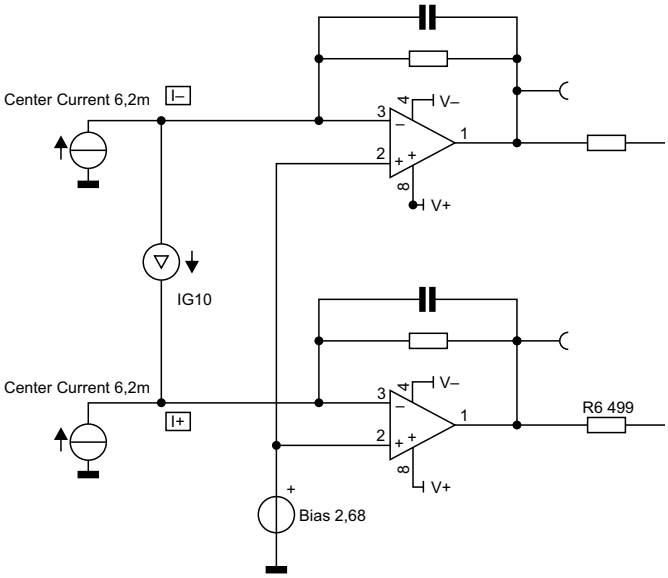
Na **rysunku 25** widać podłączenie napięcia +3,3 V sekcji cyfrowej układu PCM1794A. Tu zasada jest bardzo podobna. Kondensator SMD 100 nF znajduje się jak najbliżej wyprowadzeń zasilania układu. Równolegle do niego dołączono kondensator elektrolityczny SMD 10 μF.

Co jakiś czas w Internecie pojawiają się dyskusje na temat wartości pojemności kondensatorów blokujących. Niektórzy twierdzą, że standardowa para 100 nF – 10 μF nie jest odpowiednia i trzeba stosować inne wartości, a najlepiej trzy lub więcej kondensatorów o równych wartościach, połączonych równolegle. Żeby rozstrzygnąć kto ma rację, trzeba byłoby eksperymentować z różnymi wartościami i mierzyć na przykład szumy na wyjściu przetwornika. Często pojawia się argument: „tak brzmi lepiej", którego niestety nie można przyjąć w praktyce inżynierskiej. Ja nie zaobserwowałem mierzalnej poprawy parametrów przy eksperymentowaniu z wartościami kondensatorów, podanymi w jednym z wpisów internetowych – mimo że jego autor opisywał wyraźny wpływ na brzmienie. Tego również nie zarejestrowałem.

Para kondensatorów 100 nF około 10 μF to bezpieczny wybór w zdecydowanej większości przypadków. W obwodach analogowych można zwiększyć pojemność do 22 μF czy nawet do 47 μF, a w obwodach cyfrowych zastosować kondensator tantalowy. A jeżeli ktoś z Czytelników dysponuje odpowiednimi możliwościami pomiarowymi, to może również eksperymentować z innymi wartościami elementów.

Oprócz prawidłowego odsprzęgania zasilania powinniśmy dysponować także dobrze stabilizowanym źródłem napięcia. Najlepiej do tego celu zastosować stabilizatory niskoszumne. Na rynku jest ich bardzo dużo i można je dobrać zależnie od potrzebnego napięcia wyjściowego, dopuszczalnego prądu i poziomu szumów. Ja stosuję na przykład układy LT1763 o bardzo przyzwoitych parametrach. Można je stosować zarówno w układach cyfrowych, jak i analogowych.

Co ciekawe, w sieci krążą schematy układów zasilającyc przetworniki o topologiach rodem z początku lat 70., oparte na diodach Zenera w roli źródeł napięcia odniesienia. Czasami są to nawet stabilizatory parametryczne bez pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego.



Rysunek 26. Przykład konwertera I/U ze wzmacniaczami transimpedancyjnymi

Takie układy mają kiepskie parametry stabilizacyjne i równie słabo wypadają pod względem szumów. Zasilanie nowoczesnych przetworników (a nawet tych starszych) za pomocą takich prymitywnych stabilizatorów zupełnie mija się z celem. I znów – za ich stosowaniem stoi argument, że podobno... poprawiają brzmienie.

Zasilacz przetwornika często musi dostarczać napięcia symetryczne (na przykład ±15 V czy ±12 V) do zasilania wzmacniaczy operacyjnych konwertera prąd-napięcie. To napięcie powinno być również dobrze stabilizowane, pozbawione tętnień sieciowych i szumów szerokopasmowych. Niezłym pomysłem jest zastosowanie układów LM317 i LM337. To już leciwe konstrukcje, ale do zasilania układów analogowych nadają się zaskakująco dobrze. Trzeba pamiętać, by układy nabywać ze sprawdzonego źródła, gdyż na rynku można znaleźć mnóstwo słabej jakości podróbek.

Niezależnie od zastosowanego rozwiązania, jako absolutne minimum należy przyjąć przestrzeganie zaleceń producenta układu stabilizatora. Zawsze aktualne są zasady dotyczące prowadzenia mas na obwodach drukowanych tak, by nie tworzyć pętli masy. Dobrym pomysłem jest stosowanie wylewek miedzi i jak najszerszych ścieżek prądowych. Trzeba stosować dobre elementy ze sprawdzonego źródła. Dotyczy to szczególnie stabilizatorów i kondensatorów elektrolitycznych.

W większości dobrych przetworników analogowy sygnał wyjściowy ma postać prądową. W takich przypadkach będzie potrzebny zewnętrzny konwerter prąd-napięcie. Klasycznie do tego celu stosowany jest układ wzmacniacza transimpedancyjnego – **rysunek 26**.

Ten układ można bardzo łatwo zrealizować za pomocą wzmacniaczy operacyjnych. Z reguły wymaga się, żeby były to układy miały z tranzystorami polowymi, o jak najmniejszym prądzie polaryzacji wejść. Klasykiem jest wzmacniacz OPA627 z wejściami JFET, stosowany w najlepszych konstrukcjach przetworników. Dzisiaj jest to wybór bardzo drogi i niestety często podrabiany. Ale można zastosować wzmacniacz OPA828, wskazywany przez producenta jako następca OPA627. OPA828 jest bieżąco produkowany i dostępny u sprawdzonych dystrybutorów elementów elektronicznych. Co ciekawe, firma Texas Instruments poleca też do pracy w konwerterach bardzo dobre wzmacniacze z wejściami bipolarnymi typu OPA6211 lub OPA1612. Mają one typowy prąd polaryzacji wejścia na poziomie ±60 nA, zaś w przypadku OPA828 parametr ten plasuje się na poziomie 1 pA.

eprasa.pl ef7662c802

Mimo że rozwiązanie z rysunku 26 ma bardzo dobre parametry, to i tutaj nie brakuje opinii, że lepiej jest zastosować zwykły rezystor o określonej rezystancji, włączony w prądowy obwód wyjścia przetwornika. Spadek napięcia na tym rezystorze stanowi napięciowy sygnał wyjściowy. Stosowane są też rozbudowane układy tranzystorowe, mające podobno doskonałe walory brzmieniowe. Oczywiście eksperymentowanie nie jest niczym złym – tym bardziej, jeżeli efekt końcowy zadowala konstruktora. Jednak klasyczny układ z rysunku 26 jest zawsze godny polecenia i powinien dawać bardzo dobre rezultaty, oczywiście pod warunkiem zastosowania dobrego wzmacniacza i dobrej jakości pozostałych elementów (szczególnie kondensatora).

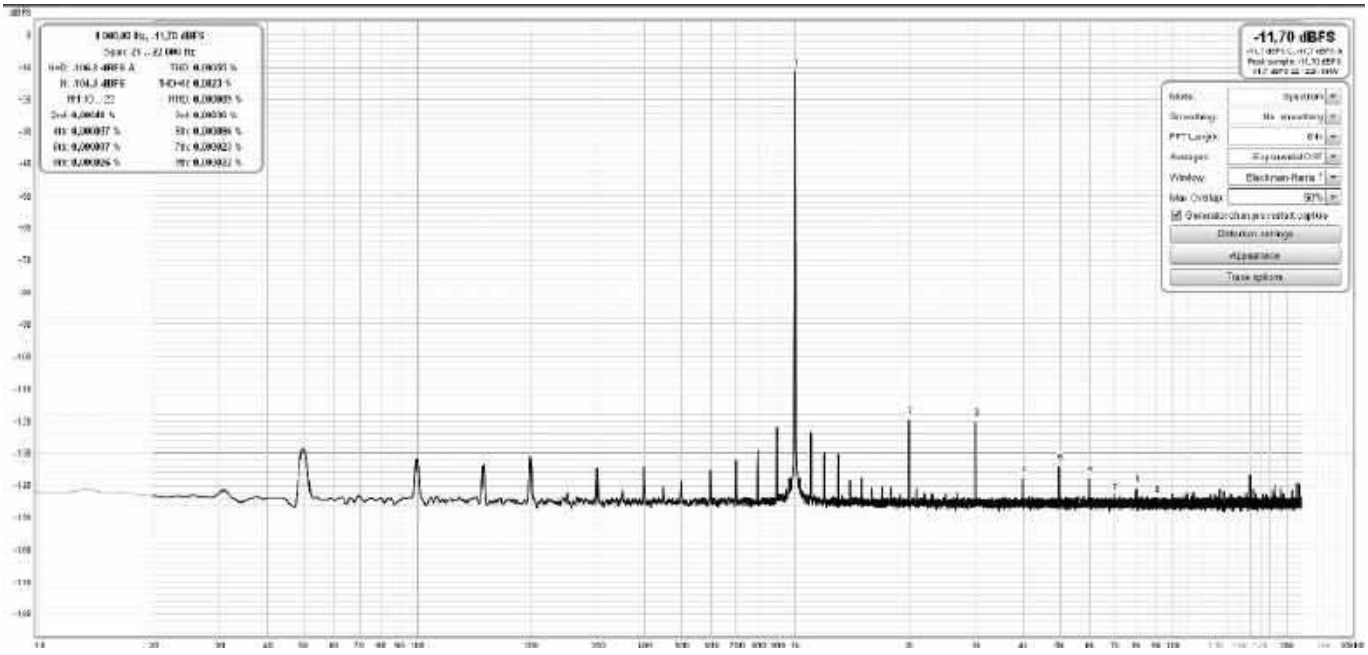
Jedną z popularnych metod „poprawiania" dźwięku przetwornika jest stosowanie na wyjściu układów lampowych (buforów, SRPP itp.) które w założeniu mają dawać „lampowe brzmienie". Jednak według mnie lepszym sposobem jest zbudowanie przetwornika pracującego zgodnie z teorią i zaleceniami producenta, a następnie podanie sygnału z jego wyjścia na dobry wzmacniacz lampowy. Ja stosuję opisywany na łamach EP wzmacniacz Sansuix i jeden z przetworników mojej konstrukcji z układem PCM1794A. Efekty są znakomite.

Należy też pamiętać, że nie zawsze są nam potrzebne najlepsze dostępne na rynku układy DAC. Na początek nie musimy sięgać po topowe, bardzo drogie konstrukcje. Żeby w pełni wykorzystać ich potencjał, trzeba mieć naprawdę duże doświadczenie w konstruowaniu tego typu układów. Warto zacząć np. od wspominanego już układu PCM5102A. Jest on zasilany napięciem +3,3 V (sekcja cyfrowa i sekcja analogowa). Wbudowany układ przetwornicy napięcia (pompa ładunkowa) umożliwia – przy pojedynczym napięciu zasilania +3,3 V – uzyskanie na wyjściu układu sygnału o napięciu 2,1 V (RMS). Nadpróbkowanie powoduje znaczące uproszczenie wyjściowego, dolnoprzepustowego filtra rekonstruującego. Może to być chociażby zwykły, pasywny filtr RC. Obecnie używam przetwornika DAC zbudowanego na bazie tego układu i pracującego jako nakładka HAT do komputera Raspberry Pi 4B (połączenie przez interfejs I²S). Układ ten, mimo swojej prostoty aplikacyjnej, generuje zaskakująco dobry dźwięk, co potwierdzają również pomiary.

Bardziej zaawansowani użytkownicy mogą się pokusić o zmierzenie parametrów budowanego przetwornika. Trzeba jednak pamiętać, że katalogowe parametry większości popularnych konwerterów wyższej klasy są na takim poziomie, że amatorski tor pomiarowy oparty na karcie muzycznej może nadmiernie degradować pomiar. Wobec tego – czy warto mierzyć? Oczywiście, że warto. Jeżeli otrzymamy parametry bliskie parametrom karty pomiarowej, to jest duże prawdopodobieństwo, że nasz przetwornik pracuje poprawnie. Poza tym w pomiarach – oprócz parametrów THD, THD+N i IMD – można ocenić poziom składowych częstotliwości sieciowej 50 Hz i jej wyższych harmonicznych. To może nam dać odpowiedź na pytanie, czy dobrze zaprojektowaliśmy układ pod względem zasilania sieciowego. Zbyt duży poziom szumów może być wynikiem złego prowadzenia mas, a zniekształcenia IMD zwiastują problemy z filtrowaniem dolnoprzepustowym. Ja staram się mierzyć swoje konstrukcje. Używam programu REW i karty Scarlett 2i2. Do pomiarów niezbędny jest konwerter USB-I²C, na przykład typu Amanero – po to, by na wejście przetwornika można było podać strumień danych reprezentujący sygnał sinusoidalny o częstotliwości 1 kHz. Wyjście audio przetwornika łączymy z wejściem karty – i już można wykonać pomiar. Na **rysunkach 27** i **28** zostały pokazane wyniki pomiarów przetworników z układami PCM1794A i PCM5102.

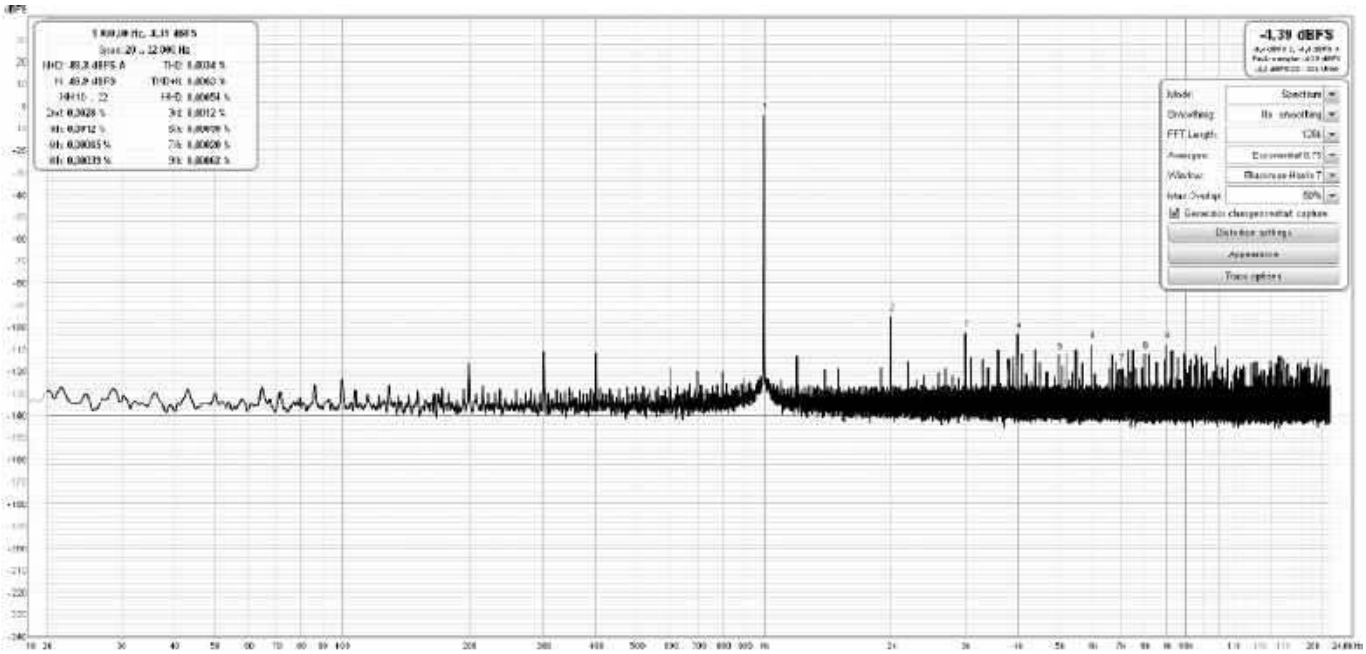
Pierwszy to dość rozbudowany przetwornik z wielosekcyjnym zasilaczem, konwerterem i filtrem dolnoprzepustowym na wzmacniaczach operacyjnych. THD+N jest równe 0,0023%. Katalogowo układ powinien mieć THD+N równe 0,0004%. Różnica jest wyraźna, jednak – jak już powiedziałem – ograniczeniem może być układ pomiarowy z kartą muzyczną. W danych technicznych karty producent podaje THD+N na poziomie 0,002%, więc za pomocą tego zestawu nie da się wiarygodnie zmierzyć THD+N = 0,0004%. Poza tym podawane przez producenta parametry potrafią być wyśrubowane w firmowym laboratorium i w rzeczywistości trudno je powtórzyć. W naszej sytuacji nie sposób zatem rozstrzygnąć tej kwestii.

Drugi przetwornik jest o wiele prostszy, w trakcie pomiaru zasilany za pomocą zasilacza impulsowego – bo taki był cel tego pomiaru. THD jest na poziomie 0,0034% co odpowiada wartości –89 dB. Katalogowo THD tego przetwornika wynosi –92 dB, więc jak na tę prostą konstrukcję i zasilanie uzyskany wynik jest dość bliski parametrów nominalnych.



Rysunek 27. Wynik pomiaru THD+N przetwornika PCM1794A

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 28. Wynik pomiaru THD+N przetwornika PCM5102A

Podsumowanie

Temat konstrukcji przetworników cyfrowo-analogowych jest bardzo szeroki. W niniejszym artykule zaprezentowałem kilka bardzo ogólnych zaleceń dotyczących zasilania, projektu płytki PCB czy układów wyjściowych. Nic jednak nie zastąpi doświadczenia konstruktora, które każdy musi nabyć sam tworząc własne konstrukcje. Mamy do wyboru wiele nowoczesnych przetworników o rewelacyjnych parametrach, a do tego dochodzi łatwa dostępność bardzo dobrych elementów pasywnych, wzmacniaczy operacyjnych, stabilizatorów itp. Możemy – za naprawdę niewielkie kwoty – zamówić profesjonalnie wykonane płytki drukowane dwuwarstwowe, a w uzasadnionych przypadkach czterowarstwowe. Nawet amatorzy mogą sobie pozwolić na zakup przyrządów pomiarowych, o których kilkanaście lat temu można było tylko pomarzyć. I wreszcie – można konstruować własne przetworniki, czerpiąc z tego niemałą satysfakcję.

Tomasz Jabłoński, EP

REKLAMA

eprasa.pl

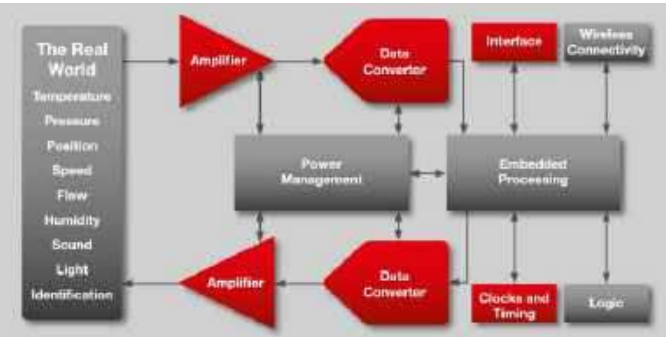
Układy analogowe w erze cyfrowej

Dobrych kilkanaście lat temu elektronicy na całym świecie mogliby śmiało skandować: śmierć analogowi! Tylko cyfra! Precz z „analogówką", układy cyfrowe to jest przyszłość! Minęły lata i… nic się nie zmieniło. Obie te gałęzie elektroniki mają się dobrze, a symbioza między nimi zdaje się widoczna w coraz szerszej liczbie zastosowań. Czemu tak się stało, dlaczego nie możemy się pozbyć analogowej części elektroniki z naszego życia, co ciekawego oferuje nam rynek i… dlaczego jajka nie są kwadratowe? Zapraszam do lektury!

Kiedy byłem studentem Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej, dla zdecydowanej większości przyszłych inżynierów przedmioty traktujące o elektronice analogowej były znacznie trudniejsze od tych „cyfrowych". Napięcia, prądy, zakłócenia, szumy i trzaski, wzmocnienia różnicowe... Rany, niech ktoś to wreszcie zastąpi jakimś porządnym układem cyfrowym, po co tak się męczyć?! Mielibyśmy tylko dwa stany, zero i jeden, łatwą i przyjemną algebrę Boole'a, wszystko zdeterminowane i określone, czyż życie nie byłoby piękniejsze? Jak by to ująć – naukowcy od wielu lat próbują uczynić nasze życie coraz bardziej cyfrowym, wplatając przetwarzanie cyfrowe do coraz większej liczby zastosowań. A na drodze staje nam rzeczywistość – piękna i frustrująca zarazem.

Weźmy na przykład takie jajko, uważane za przyrodniczy cud inżynieryjny. Lekkie, a zarazem wytrzymałe. Czy jego gładką, acz lekko chropowatą powierzchnię da się całkowicie odwzorować przy użyciu równań matematycznych bazujących na liczbach całkowitych? Gdyby jajko dostało ostre krawędzie, nadal jego skorupka tak dobrze pełniłaby swoją funkcję? Przecież nadtłukujemy ją właśnie po to, by łatwiej było je całkowicie rozbić. Albo odgłos spadającego liścia podczas lekkiego wiatru – przecież widmo amplitudowo-fazowe (a w zasadzie cały spektrogram) takiego dźwięku to jakiś kosmos. Możemy go przybliżać znanymi nam metodami matematycznymi, lecz to nadal będzie tylko przybliżenie, nieoddające pierwowzoru idealnie, a jedynie z jakimś akceptowalnym dla nas przybliżeniem.

Do czego dążę? Możemy mieć najdoskonalsze filtry cyfrowe, najszybsze jednostki obliczeniowe oraz najwydajniejsze układy mnożące i pamiętające, a na początku i końcu tego łańcucha zawsze stoi przyroda z całą swoją niedoskonałością. Dlatego, aby móc wprowadzić sygnał do naszego cyfrowego, idealnego świata, potrzebny jest przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC). Zaś na końcu musimy ten sygnał uczynić zrozumiałym dla naszych zmysłów, posługując się przetwornikami cyfrowo-analogowymi (DAC) – **rysunek 1**. Same przetworniki to temat z pogranicza „cyfry" i „analogu", bowiem stanowią one pomost między tymi dwoma światami, lecz nawet przy ich użyciu należy ten sygnał analogowy odpowiednio przygotować. Może on pochodzić z różnych źródeł, chociażby z czujników: natężenia światła, temperatury czy położenia.



Rysunek 1. Uproszczony schemat blokowy toru sygnałowego w nowoczesnym urządzeniu analogowo-cyfrowym [1]

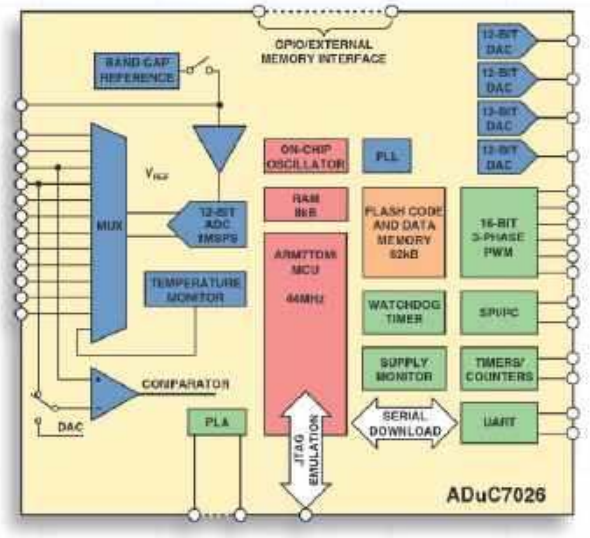
Czyli co, układy analogowe wiecznie żywe? Na to wygląda. Nadal potrzebujemy multiplekserów, zdolnych do przełączania wejścia między różnymi źródłami, wzmacniaczy, którymi ten sygnał przygotujemy do obróbki lub po obróbce, a także filtry, których zadaniem jest „wygładzenie" odtworzonego po przetwarzaniu sygnału lub – wręcz przeciwnie – obrobienie go tak, by w toku przetwarzania na postać cyfrową nie wystąpiły jakieś niepożądane zjawiska. Niekiedy nawet nie opłaca się przekształcać sygnału na postać cyfrową, bo wymagana obróbka jest na tyle prosta, że wystarczy sam układ analogowy. Przykład? Przedwzmacniacz gramofonowy. Choć reszta toru audio może zawierać już przetwarzanie cyfrowe.

Coraz częściej mamy również do czynienia z integracją bloków analogowych w strukturach układów cyfrowych. Sztandarowym przykładem mogą być mikrokontrolery, mające na pokładzie z reguły ADC, DAC, jakiś multiplekser i niekiedy prosty wzmacniacz operacyjny. W tym wypadku widać wyraźną przewagę części cyfrowej nad analogową. Lecz stosunek ten bywa odwrócony: do układu stricte analogowego (na przykład wzmacniacza napięciowego) został dodany niewielki moduł cyfrowy, komunikujący się za pośrednictwem I²C (lub innego interfejsu), który umożliwia łatwą zmianę jego wzmocnienia lub wyłączenie wyjścia. Mamy układ analogowy? Mamy. Czy łatwo można nim sterować z poziomu aplikacji? Owszem.

„Analogowe" mikrokontrolery

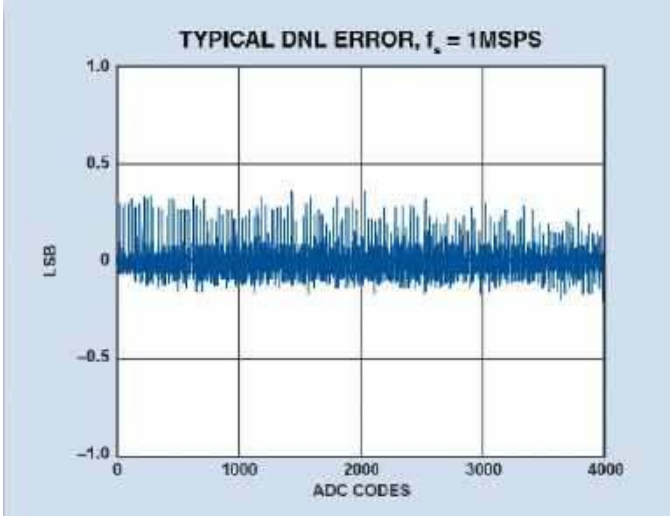
Niemal każdy szanujący się, współczesny mikrokontroler ma w sobie coś analogowego. Różnice widać w podejściu – producent układu mógł potraktować tę część po macoszemu, a mógł też otoczyć ją szczególną opieką. To drugie podejście oferuje chociażby Analog Devices – firma wszak słynąca ze swoich cudeniek w świecie „analogu" – w postaci rodziny mikrokontrolerów określanych jako precision analog.

Na **rysunku 2** znajduje się schemat blokowy mikrokontrolera ADuC7026. Od strony cyfrowej nie ma się czego przyczepić: wydajny



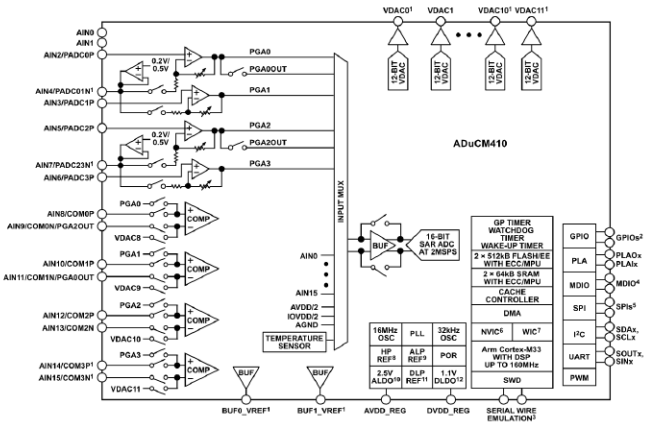
Rysunek 2. Schemat blokowy mikrokontrolera ADuC7026 [2]

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 3. Wartość błędu nieliniowości ADC w układzie ADuC70xx [2]

rdzeń ARM, sporo pamięci, interfejsy sprzętowe SPI i I²C, a także timery wspierające realizację sterowników silnika. Użytkownik ma do dyspozycji nawet kawałek programowalnego układu logicznego w postaci tzw. PLA. Zaś od strony analogowej mamy wszystko, czego potrzeba do niezbyt szybkich zastosowań: przetwornik analogowo-cyfrowy z multiplekserem, stabilne źródło napięcia odniesienia (nie to, co w układach serii ATtiny…) i aż cztery (!) przetworniki cyfrowo-analogowe z wbudowanymi filtrami rekonstrukcyjnymi. Żyć, nie umierać! Ale najlepszy w tym jest błąd nieliniowości wbudowanego przetwornika analogowo-cyfrowego, szczegółowo pokazany na **rysunku 3**. Niemal równomiernie rozłożony na wszystkich 4096 osiągalnych przez wyjście przetwornika poziomach napięcia to coś, co niezwykle upraszcza konstruowanie układów korzystających z analogowych czujników.



Rysunek 4. Schemat blokowy układu ADuCM410 [3]

Fotografia 1. Płytka ewaluacyjna z układem ADuCM410 [4]

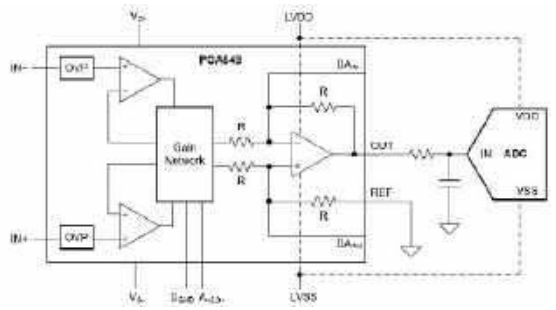
W porządku, ale na tym oferta „analogowych" mikrokontrolerów wcale się nie kończy. Przykładowo ADuCM410 to prawdziwy kombajn zawierający mnóstwo analogowych cudeniek – **rysunek 4**. Prościej byłoby chyba wymienić, czego tam nie ma, bo zasoby są znaczące: dwanaście (!) przetworników cyfrowo/analogowych, wzmacniacze o programowalnym wzmocnieniu (PGA), wzmacniacze transimpedancyjne (TIA) do pomiaru natężenia prądu, szybkie komparatory… I to wszystko może zostać tak skonfigurowane, by działało nawet podczas zerowania rdzenia mikrokontrolera – tak przynajmniej zapewnia producent. Na **fotografii 1** można zobaczyć płytkę ewaluacyjną z tym zacnym mikrokontrolerem, która umożliwia wypróbowanie jego możliwości. Co ważne, ten układ jest dostępny w magazynach znanych dystrybutorów, nie jest więc tylko nigdy niewidzianym w sprzedaży „wyrobem pokazowym".

Analogowe otoczenie

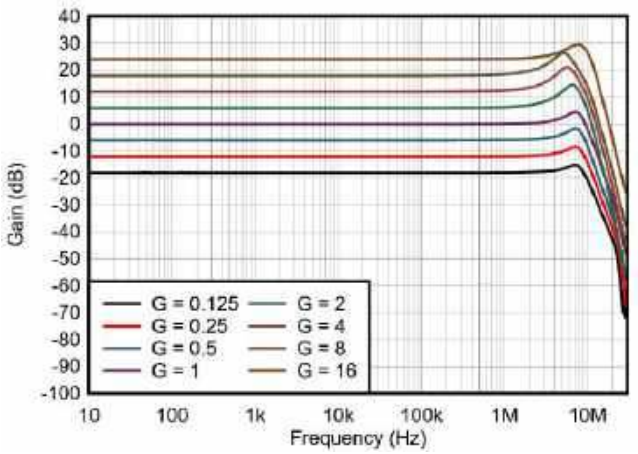
Nie samymi mikrokontrolerami współczesna elektronika żyje, bowiem przetwarzanie sygnału niejednokrotnie musi odbywać się poza strukturami tych układów scalonych, nawet jeśli są mocno zaawansowane. Powodów jest wiele, ale z reguły należą do nich niewystarczające osiągi wbudowanych wzmacniaczy czy brak możliwości kształtowania ich charakterystyki amplitudowej. Można budować obwody wzmacniające na piechotę, używając do tego typowych wzmacniaczy operacyjnych lub innych elementów aktywnych oraz odpowiednio do nich dobranych elementów biernych, lecz z takim podejściem wiąże się kilka problemów.

Po pierwsze, trzeba mieć dobrze opanowaną sztukę projektowania takich układów, do czego potrzebny jest doświadczony elektronik w zespole – a nie zawsze jest to możliwe. Przydałyby się zatem takie gotowe „kostki", których można byłoby użyć nieco jak czarnej skrzynki: tu wchodzi, tu wychodzi, tu się zasila, takie ma parametry… i do widzenia! Takie układy istnieją i – co ważniejsze – w odróżnieniu od projektowanych ręcznie wzmacniaczy, ich wzmocnienie można łatwo regulować. Mowa tutaj o PGA (Programmable Gain Amplifier).

Jednym z takich układów jest nowoczesny PGA849 od firmy Texas Instruments. To gotowy wzmacniacz pomiarowy

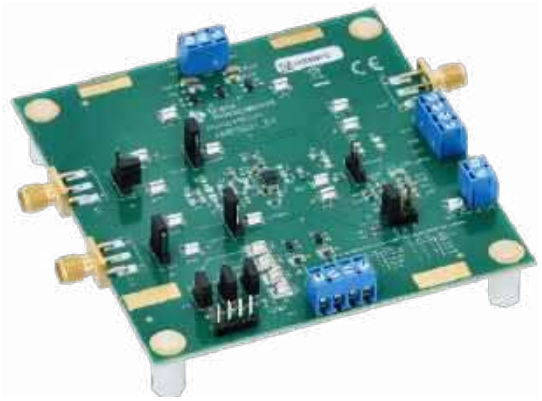


Rysunek 5. Uproszczona aplikacja układu PGA849 [5]



Rysunek 6. Charakterystyka amplitudowa układu PGA849 [5]

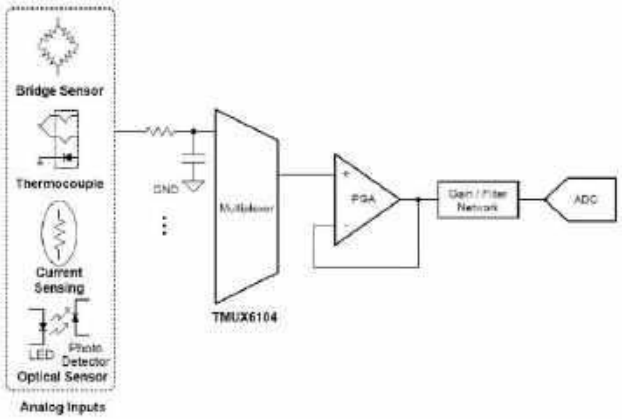
eprasa.pl ef7662c802



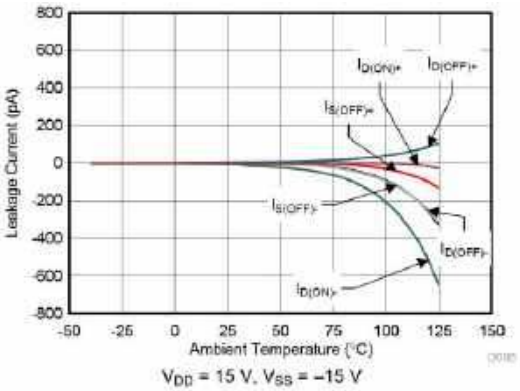
Fotografia 2. Płytka ewaluacyjna PGA849EVM z układem PGA849 [6]

(instrumentalny), który ma do wyboru aż osiem różnych wzmocnień: od 0,125 V/V do 16 V/V. Zmiany wzmocnienia dokonuje się poprzez zmianę stanów logicznych na trzech wejściach A0, A1 i A2, co powoduje przełączanie rezystorów ustalających wzmocnienie (**rysunek 5**). Pasmo przenoszenia układu rozciąga się od składowej stałej aż do 10 MHz, więc opisywany wzmacnaicz może mieć wiele zastosowań, zaś różnicowe wejście ułatwia obsługę sygnału np. z czujników tensometrycznych. Za cenę kilku dolarów mamy układ o bardzo dobrze ukształtowanej charakterystyce amplitudowej, która jest płaska w paśmie przepustowym, co udowadnia wykres na **rysunku 6**. W celu przeprowadzenia testów można nawet pozyskać płytkę ewaluacyjną (**fotografia 2**) w niewygórowanej cenie kilkudziesięciu dolarów.

Mimo że PGA są układami znanymi od dawna, piszę o nich nieprzypadkowo. Wielu elektroników, nawet doświadczonych w projektowaniu układów analogowych, nie ma zwyczajnie czasu i/lub chęci do tego, by po raz kolejny tworzyć jakiś analogowy „klocek" podczas pracy nad np. dużym, mikroprocesorowym modułem przemysłowym. To zwiększa liczbę elementów na finalnej płytce, wydłuża BOM, zwiększa koszty montażu i ryzyko pomyłki przy produkcji – słowem: same problemy. Jeżeli tylko projekt nie jest szczególnie „wyżyłowany" pod kątem finansowym, co wymuszałoby stosowanie najtańszych elementów w jak najmniejszej liczbie, sam często uciekam się do umieszczenia na płytce gotowego PGA, zwłaszcza jeżeli wzmocnienie jakiegoś stopnia nie jest dla mnie do końca znane na etapie projektowania np. prototypu. W ten sposób mały układzik w obudowie SMD, dwa kondensatory odsprzęgające zasilanie i kilka zworek SMD (lub sterowanie z mikrokontrolera) realizują to samo zadanie, co wzmacniacz operacyjny otoczony sporą liczbą elementów dyskretnych, którymi trzeba się zaopiekować na etapie projektowania i później montażu. Ot, taki elektroniczny fast food – ale od niego się nie tyje, można za to zaoszczędzić sporo czasu i nerwów.



Rysunek 7. Nowoczesny tor przetwarzania analogowego z multiplekserem [7]

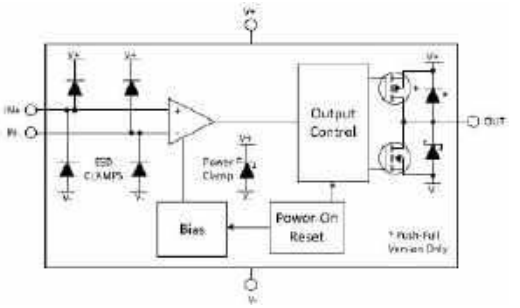


Rysunek 8. Zależność między prądem upływu wejścia a temperaturą układu TMUX6104 [7]

Doprowadzenie sygnału do PGA w przypadku obsługi kilku źródeł, na przykład czujników, wymaga użycia multipleksera, jak na **rysunku 7**. Multipleksery analogowe, zawarte w strukturach mikrokontrolerów, bywają lepsze i gorsze, lecz czasem dokładność pomiaru wymaga użycia zewnętrznego przełącznika sygnałów analogowych. Tutaj z pomocą może przyjść chociażby układ TMUX6104, oferujący cztery wejścia i jedno wyjście. Producent chwali się, że każde wejście ma pojemność 5 pF i prąd upływu wynoszący jedynie 5 pA! Przejrzenie charakterystyki z **rysunku 8** potwierdza prawdziwość tych słów, ale tylko w temperaturze pokojowej lub niższej. Po silnym podgrzaniu wartość prądu upływu rośnie wielokrotnie, co nie zmienia faktu, że to nadal bardzo ciekawy układ, parametrami bijący na głowę takie starocie, jak CD4051. Te zaś nadal mają szereg zastosowań, ale psują renomę współczesnym multiplekserom w oczach wielu „starych wyjadaczy", jakoby półprzewodnikowe przełączniki sygnałów analogowych były wolne, miały wysoki prąd upływu i wprowadzały znaczącą pojemność do toru sygnałowego. Otóż okazuje się, że w XXI wieku mamy do wyboru coś lepszego niż CD4051. Choć one nadal mają swoje zastosowania. Przykładowo w jednym z moich projektów pełną funkcję przełączników napięć stałych z przedziału 0…5 V, zwiększając dostępną liczbę wejść analogowych mikrokontrolera ATmega – i radzą sobie w tej funkcji znakomicie, kosztując przy tym kilkadziesiąt groszy za sztukę.

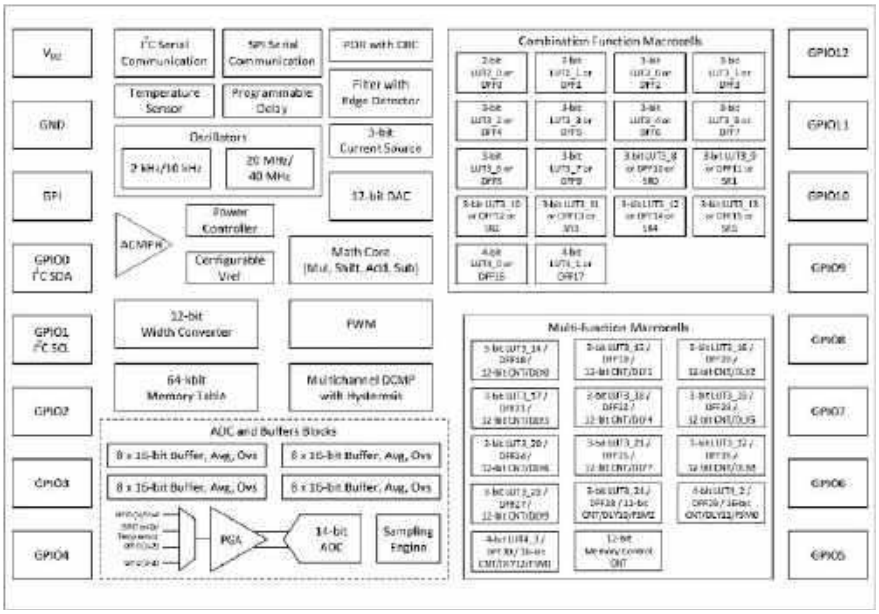
Współczesna oferta „analogowa" zawiera również wiele ciekawych wzmacniaczy operacyjnych i komparatorów. Przykładem bardzo interesującego układu jest komparator z serii TLV183x, którego schemat blokowy znajduje się na **rysunku 9**. Nie jest jakiś ekstremalnie szybki, ponieważ producent deklaruje czas przełączania na poziomie dziesiątek nanosekund, ale ma kilka cech, które odróżniają go od dobrze znanych układów typu LM311 i pokrewnych:

- napięcie zasilania z przedziału 2,7…40 V;
- wbudowane diody zabezpieczające wejścia;
- pobór prądu wynoszący tylko 75 µA na kanał;
- offset napięciowy wynoszący typowo 500 µV;
- wyjście typu push-pull (TLV184x ma wyjście typu otwarty dren), zapewniające dużą szybkość przełączania wyjścia na obu zboczach;



Rysunek 9. Schemat blokowy komparatora z serii TLV183x [8]

eprasa.pl ef7662c802

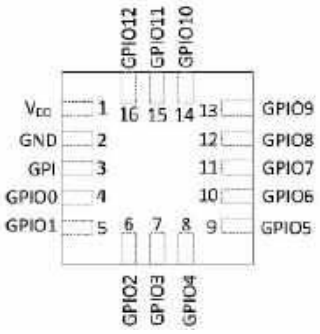


Rysunek 10. Struktura układu SLG47011 [9]

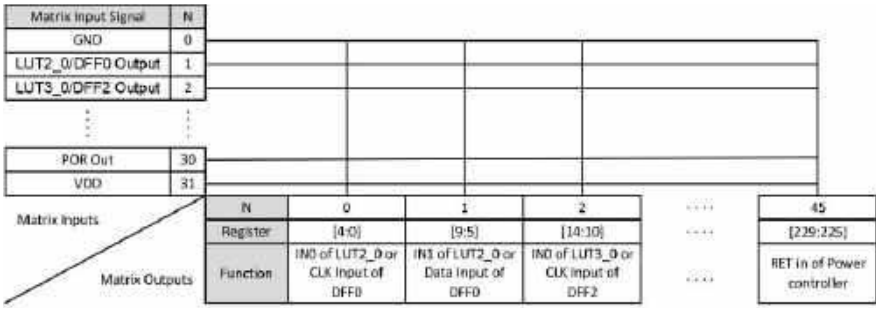
- wbudowany obwód Power-ON Reset, blokujący wyjście przez 80 µs po załączeniu zasilania;
- dostępność w wersjach: jedno-, dwu- i czterokanałowej.

Rozbudowane układy

Czy chcąc przetwarzać sygnał analogowy w bardziej zaawansowany sposób, trzeba sięgać po procesor sygnałowy lub mikrokontroler?



Rysunek 11. Układ wyprowadzeń SLG47011 [9]



Rysunek 12. Połączenia tablic konfiguracyjnych w układzie SLG47011 [9]

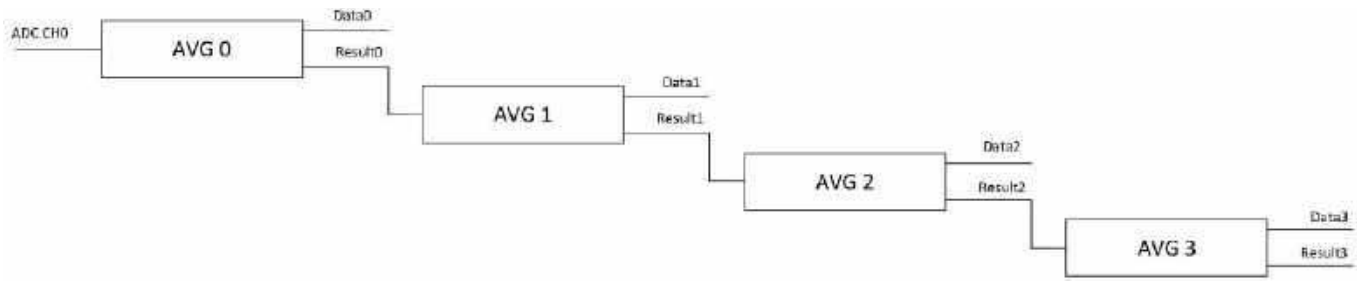
Można się posłużyć jeszcze innym „tworem", nieklasyfikującym się do jakiejkolwiek szeroko znanej grupy. Mam na myśli układ SLG47011 firmy Renesas, która w nocie katalogowej opisuje go jako GreenPAK Programmable Mixed-Signal Matrix With Analog-to-Digital Data Acquisition System. Brzmi kusząco, ale… co to właściwie jest za „zwierzę"? Na pewno struktura blokowa tego układu, znajdująca się na **rysunku 10**, będzie tu pomocna.

A czego tam nie ma! 14-bitowy przetwornik A/C z PGA i multiplekserem, bufory na dane wyjściowe, arytmetyczna jednostka logiczna, źródło prądowe, dwa oscylatory, DAC, komparator o zmiennej histerezie i wzmocnieniu, liczniki, interfejsy SPI i I²C, tablice funkcji kombinacyjnych i wielofunkcyjne makrokomórki. Co ciekawe, tak zaawansowany układ ma tylko 16 wyprowadzeń, rozrysowanych na **rysunku 11**. Nie ma konieczności dołączania całego „stada" kondensatorów odprzęgających zasilanie, rezonatorów kwarcowych, kilku stabilizatorów napięcia i innych rzeczy, które z reguły znajdują się w otoczeniu zaawansowanych mikrokontrolerów – producent zaleca tylko kondensator 100 nF przy wyprowadzeniach zasilania. Wszystkie pozostałe wyprowadzenia można skonfigurować z dosyć dużą dowolnością, tak samo jak bloki znajdujące się wewnątrz tego układu.

Przykładowo, zgodnie ze schematem z **rysunku 12**, można swobodnie utworzyć sieć połączeń bloków cyfrowych między sobą, a potem – z wyprowadzeniami układu. W ten oto sposób można stworzyć chociażby układ uśredniający 4096 próbek sygnału, pobranych przez przetwornik analogowo/cyfrowy (**rysunek 13**), działający w czasie niemalże rzeczywistym. Ale to nie wszystko, bowiem zebrane próbki można mnożyć, dodawać, przesuwać, skalować przez wartości zawarte w LUT, wystawiać na przetwornik cyfrowo-analogowy i wiele, wiele więcej.

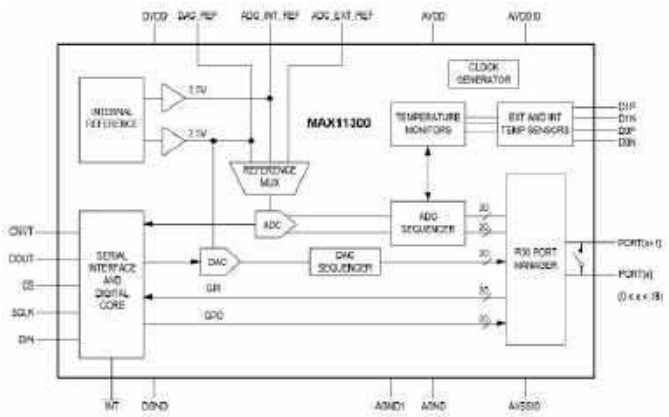
Mniej zaawansowanym układem, lecz nadal analogowym z cyfrową „przystawką", jest MAX11300 od Maxim Integrated (obecnie część koncenu Analog Devices). Nie jest to do końca mikrokontroler, bo nie realizuje programu. Zawiera przetworniki analogowo-cyfrowy i cyfrowo-analogowy wraz z niezbędnym dla nich oprzyrządowaniem (multiplekser napięcia referencyjnego oraz samo źródło napięcia odniesienia), szeregowy interfejs cyfrowy z cyfrowym blokiem sterującym i coś, co nosi nazwę PIXI – **rysunek 14**. Nie ma tutaj wzmacniaczy transimpedancyjnych czy o regulowanym wzmocnieniu, lecz za to można wygodnie konfigurować liczbę próbek uśrednianych z każdego wejścia ADC, jak również zakres przetwarzania tegoż.

Wspomniany blok PIXI umożliwia konfigurację dwudziestu wyprowadzeń układu

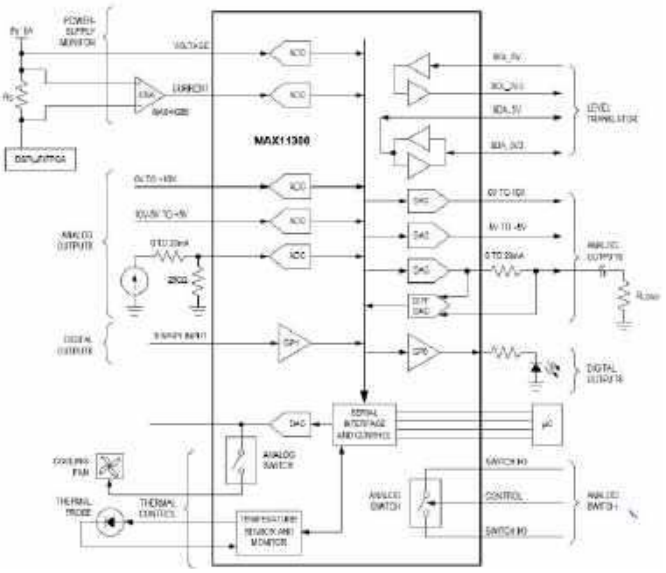


Rysunek 13. Przykładowy schemat blokowy struktury uśredniającej 4096 próbek z ADC, zrealizowny w oparciu o układ SLG47011 [9]

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 14. Schemat blokowy układu MAX11300 [10]



Rysunek 15. Przykładowe zastosowanie układu MAX11300 [10]

w dowolny sposób – mogą się one stać zarówno wejściami, jak i wyjściami analogowymi (każde o innym zakresie napięć) i cyfrowymi o regulowanej czułości (w przypadku wejścia) lub ustalanym napięciu wyjściowym (w przypadku wyjść). Przy użyciu wyprowadzeń tego bloku można też tworzyć konwertery poziomów logicznych. Jest to okupione koniecznością zasilania układu trzema różnymi napięciami (jedno dla części cyfrowej i dwa dla analogowej), za to jego możliwości stają się dzięki temu tak duże.

Na **rysunku 15** znajduje się schemat regulatora kontrolującego temperaturę, stan wejść analogowych i cyfrowych oraz natężenie prądu. Jednocześnie ten sam układ generuje wyjściowe sygnały analogowe, na przykład na potrzeby PLC. Warto zwrócić uwagę, że zakresy przetwarzania zarówno ADC, jak i DAC, są różne dla różnych wyprowadzeń. To duża przewaga tego układu nad stopniami analogowymi budowanymi na piechotę, bowiem każdy taki przetwornik operuje w swoim zakresie i już, koniec kropka. Zmiana tego wymaga dodawania wzmacniaczy, dzielników lub przesuwników potencjału – zaś MAX11300 ma już to wszystko na pokładzie. Wszystkim może zarządzać niewielki mikrokontroler, komunikujący się z tym analogowo-cyfrowym „kombajnem" poprzez SPI.

Podsumowanie

Jeżeli ktoś liczył na to, że w 2025 roku układy analogowe odejdą do lamusa, to przykro mi bardzo, ale srogo się przeliczył. Ta gałąź elektroniki jest cały czas rozwijana, o czym świadczą nowe podzespoły wprowadzane na rynek chociażby w zeszłym roku, zaś niektóre z nich zostały opisane w niniejszym artykule.

Widać na rynku tendencję do jak największego upraszczania torów przetwarzania sygnałów analogowych,co stanowi niemałą pomoc dla konstruktorów. Pakowanie w jedną strukturę scaloną buforów, przełączników, wzmacniaczy a nawet tak – wydawałoby się – prozaicznych elementów, jak systemy zerujące podczas załączania zasilania, staje się faktem. To zwiększa cenę pojedynczego układu scalonego, w porównaniu z tak prostymi układami jak LM311, za to znacząco zmniejsza liczbę elementów dyskretnych na płytce. To z kolei skraca czas projektowania i redukuje ryzyko popełnienia błędów, więc może przełożyć się na szybsze dostarczenie produktu i jego niższą cenę.

W tym tekście nawet nie zostały wspomniane takie „scalaki" jak źródła napięcia odniesienia, przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe, wzmacniacze mikrofalowe i inne cudeńka pracujące z sygnałami o wartościach rzeczywistych, nieskwantowanych. Niech nasz świat pozostanie analogowy – dzięki temu cały czas może nas zaskakiwać.

Michał Kurzela, EP

Źródła:
[1] https://t.ly/CVdc4
[2] https://t.ly/SkaCP
[3] https://t.ly/9ZkV7
[4] https://t.ly/lnFn1
[5] https://t.ly/O0LRE
[6] https://t.ly/ecqts
[7] https://t.ly/okhmE
[8] https://t.ly/EhDw4
[9] https://t.ly/9yczL
[10] https://t.ly/glFZ6

REKLAMA

eprasa.pl ef7662c802

Programowanie w środowisku MicroPython (4)

Systemy plików

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

MicroPython daje możliwość przechowywania danych w systemie plików, podobnie jak Python na zwykłych komputerach. Mamy do dyspozycji wewnętrzną pamięć Flash w ESP32, a jeżeli to nie wystarczy, możemy użyć karty SD. Najciekawszą opcją jest utworzenie „dysku" w dowolnej pamięci EEPROM, Flash czy jakiejkolwiek innej.

Podstawowe operacje zapisu i odczytu

Jeżeli wiesz, jak obsługiwać pliki w Pythonie, to przeskocz do kolejnego rozdziału.

Istnieje kilka sposobów na odczytanie pliku w Pythonie. Zaprezentujemy tylko jeden z nich, moim zdaniem najprostszy i najbezpieczniejszy. Oto on:

```
with open("plik.txt") as file:      # 1
    content = file.read()           # 2

print(content)                      # 3
```

W linii 1 rozpoczynamy blok **with**. Jest to rodzaj zabezpieczenia powodujący, że dostęp do pliku możliwy jest tylko wewnątrz tego bloku. Wyjście z bloku jest równoznaczne z bezpiecznym zamknięciem pliku. Jest to szczególnie istotne, ponieważ opuszczenie bloku może nastąpić w wyniku wystąpienia wyjątku, związanego z jakimś błędem. W takiej sytuacji nie musimy martwić się o zapewnienie prawidłowego zamknięcia dostępu do danych na dysku.

Następnie przy pomocy funkcji **open** otwieramy plik do odczytu, podając ścieżkę dostępu do niego. Jeżeli plik znajduje się w wewnątrz katalogu, należy podać ścieżkę w postaci „katalog/plik.xxx" – koniecznie z ukośnikiem „/" (tzw. slash), a nie „\" (backslash). Tak otwarty plik będzie dostępny wewnątrz bloku **with** jako zmienna o nazwie **file**.

Obiekt **file** zawiera wiele różnych metod. Jedną z nich jest **read**, która odczytuje cały plik i zwraca go jako zmienną typu **str** (opcjonalnym argumentem funkcji **read** jest liczba znaków/bajtów do odczytania, lecz w naszym przykładzie nie korzystamy z tej możliwości). Tym sposobem w linii 2 odczytujemy zawartość całego pliku i zapisujemy go do zmiennej **content**. W linii 3 wykonujemy przykładową operację: wyświetlamy zawartość pliku na konsoli. Zwróć uwagę, że w tym miejscu plik już jest zamknięty, a operujemy wyłącznie na jego kopii zapisanej do zmiennej **content**.

Plik możemy odczytywać nie tylko w całości, za jednym zamachem, ale także partiami – linia po linii. W poniższym przykładzie, w linii 1, otwieramy plik w taki sam sposób, jak wcześniej. Różnica polega natomiast na zastosowaniu funkcji **readlines** (linia 2). Zwraca ona listę, której każdy element zawiera jedną linię odczytaną z pliku. Tak otrzymaną listę można następnie przetwarzać, np. w pętli for (linia 3), aby wyświetlić ją na konsoli (linia 4).

```
with open("plik.txt") as file:      # 1
    lines = file.readlines()        # 2

for line in lines:                  # 3
    print(line)                     # 4
```

Jeżeli chcemy zapisywać dane do pliku, w funkcji open musimy podać drugi argument, który określa tryb dostępu do pliku. Możliwe są między innymi następujące opcje:

- „w" – utworzenie nowego pliku. Jeżeli plik o podanej nazwie już istnieje, jego zawartość zostanie usunięta,
- „a" – dopisywanie danych do istniejącego już pliku,
- „r" – tylko odczyt,
- „wb", „ab", „rb" – tak jak powyżej, ale pliki dostępne są w trybie binarnym, czyli bez obsługi Unicode, analizowania znaków końca linii itp.

W poniższym przykładzie otwieramy plik.txt w celu dopisywania do niego nowych danych (linia 1) za pomocą funkcji **write** (linia 2 i kolejne).

```
with open("plik.txt", "a") as file:         # 1
    file.write("Pierwsza linia\n")          # 2
    file.write("Druga linia\n")
    file.write("Trzecia linia\n")
```

We wszystkich przykładach powyżej funkcje przyjmują i zwracają zmienne typu **str**. Gdybyśmy chcieli pracować z danymi liczbowymi, np. zmiennoprzecinkowymi lub jakimikolwiek innymi, to musielibyśmy je ręcznie konwertować lub skorzystać z zupełnie innego sposobu zapisywania danych, czyli...

Pliki JSON

Format JSON pochodzi z języka JavaScript, ale ma bardzo dużo podobieństw do słowników, jakie są do dyspozycji w Pythonie. Słownik to coś w rodzaju tablicy, ale elementy nie mają kolejnych numerów, lecz unikalne identyfikatory zwane kluczami. Klucze mogą być liczbami, a także stringami. Ponadto wartości przypisane kluczom mogą mieć różne typy, a nawet stanowić kolejne słowniki. W ten sposób można przechowywać różnorodne informacje, zorganizowane w hierarchiczny sposób.

Nie będziemy zagłębiać się w teorię – zobaczmy od razu **listing 1**. Celem tego programu jest odczytanie pliku JSON i przekonwertowanie go na słownik, a następnie poproszenie użytkownika, aby na konsoli wpisał nową parę klucz-wartość. Zostanie ona dodana do słownika, a następnie przekonwertowana z powrotem na JSON i zapisana do pliku.

Rozpoczynamy od zaimportowania modułu **json**, w którym znajdują się wszystkie interesujące nas funkcje (linia 1). W linii 2 tworzymy pusty słownik o nazwie **data**. Co prawda nie musimy tego robić w tym miejscu, bo słownik mogłaby wygenerować funkcja odczytująca plik JSON, ale uważam, że zmienne globalne warto tworzyć na początku pliku, gdyż poprawia to czytelność kodu.

W linii 3 rozpoczynamy funkcję **read_json**, której zadaniem jest odczytanie pliku **test.json** i zapisanie go do zmiennej globalnej

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

eprasa.pl ef7662c802

```
# Plik json_demo.py

import json                                                 # 1

data = {}                                                   # 2

def read_json():                                            # 3
    try:                                                    # 4
        with open("test.json") as file:                     # 5
            global data                                     # 6
            data = json.load(file)                          # 7
    except:
        print("Błąd odczytu pliku test.json")

def save_json():                                            # 8
    with open("test.json", "w") as file:                    # 9
        json.dump(data, file, separators=(",\n", ":"))      # 10

if __name__ == "__main__":                                  # 11
    read_json()                                             # 12

    key   = input("Podaj nazwę nowego klucza: ")            # 13
    value = input("Podaj wartość nowego klucza: ")          # 14
    data[key] = value                                       # 15

    for key, value in data.items():                         # 16
        print(f"{key}:\t\t{value}")

    save_json()                                             # 17
```

Listing 1. Kod pliku demo_json.py

data. Może się zdarzyć, że taki plik jeszcze nie istnieje. Dlatego próbę odczytu powinniśmy wykonać przy pomocy bloku **try-except** (linia 4). W części try umieszczamy instrukcje, które mogą zakończyć się niepowodzeniem – w tym przypadku chodzi o otwarcie pliku, co do którego istnienia nie jesteśmy pewni lub którego zawartość może wcale nie być sformatowana jako JSON.

Plik otwieramy do odczytu dokładnie tak samo, jak we wcześniejszych przykładach (linia 5). W linii 6 deklarujemy, że chcemy mieć dostęp do zmiennej globalnej **data**. Bez tego utworzylibyśmy zmienną lokalną, która zostałaby skasowana po wyjściu z tej funkcji. Z modułu **json** wywołujemy funkcję **load**, której argumentem jest otwarty plik, a wartością zwracaną – gotowy słownik, który zapisujemy do zmiennej **data** (linia 7).

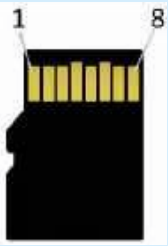
Kolejną funkcję stanowi **save_json** (linia 8). Jej zadanie polega na zapisaniu słownika do pliku **test.json**. Najpierw musimy otworzyć plik do zapisu (linia 9). Robimy to zupełnie normalnie, ale interesuje nas tryb „w", aby skasować dotychczasową zawartość pliku lub utworzyć nowy, jeżeli plik o danej nazwie jeszcze nie istnieje. W linii 10 wywołujemy funkcję **dump** z modułu **json**. Pierwsze dwa argumenty funkcji to źródłowy słownik oraz plik, do którego ma być on zapisany. Trzeci argument jest opcjonalny – bez niego wszystkie wpisy słownika zostaną zapisane w pliku bez żadnego formatowania – jeden za drugim, wszystkie w jednej linijce. W tym argumencie możemy zdefiniować separatory, a „\n" oznacza znak przejścia do nowej linii po każdej parze klucz-wartość.

Przejdźmy w końcu do głównej części programu, która zaczyna się w linii 11. Najpierw wywołujemy funkcję **read_json** (linia 12), omówioną kilka akapitów wcześniej. Następnie program wyświetla komunikaty na konsoli, prosząc użytkownika o wprowadzenie nowego klucza i jego wartości (linia 13 i 14). W kolejnej linii dodajemy nowe dane do słownika **data**, po czym – za pomocą pętli for – wyświetlamy całą zawartość słownika (linia 16). Na końcu zapisujemy słownik do pamięci plików, wywołując funkcję **save_json** (linia 17).

Niniejszy program można wywoływać wielokrotnie, wciskając klawisz F5 w środowisku Thonny, aby zaobserwować, w jaki sposób słownik gromadzi kolejne porcje danych. Można zobaczyć je także, otwierając plik test.json bezpośrednio w edytorze Thonny.

Karta microSD

Dotychczas omówiliśmy sposoby dostępu do zwykłych plików oraz plików JSON. Operacje nie różnią się istotnie od tych, które wykonalibyśmy w analogicznym celu za pomocą Pythona, znanego z normalnych komputerów. Zobaczmy teraz, w jaki sposób należy podłączyć kartę microSD do ESP32. Można skorzystać z kilku różnych interfejsów, ale my skupimy się na łączu SPI, które omówimy dokładniej w 6. odcinku kursu MicroPythona. **Rysunek 1** oraz **tabela 1** prezentują układ wyprowadzeń karty microSD.



Rysunek 1. Numeracja pinów karty microSD

Tabela 1. Opis pinów karty microSD

Pin	Interfejs SPI	Interfejs SD
1	nieużywany	DAT2
2	CS	CD/DAT3
3	MOSI	CMD
4	3,3 V	3,3 V
5	SCK	CLK
6	GND	GND
7	MISO	DAT0
8	nieużywany	DAT1

```
# Plik sd.py

import os
import machine

sd = machine.SDCard(slot=2, width=1, cs=5,          # 1
    miso=13, mosi=11, sck=12, freq=20000000)
vfs = os.VfsFat(sd)                                 # 2
os.mount(vfs, "/sd")                                # 3

print(os.listdir(""))                               # 4
print(os.listdir("sd"))                             # 5
```

Listing 2. Kod pliku sd.py

Z moich doświadczeń wynika, że tego typu nośniki pamięci są bardzo czułe na zakłócenia na linii zasilania, dlatego dobrze jest dodać kilka kondensatorów filtrujących i odsprzęgających.

Zobaczmy teraz kod pokazany na **listingu 2**. Jest on bardzo krótki, bo autorzy MicroPythona przygotowali wielofunkcyjne „gotowce", które wystarczy tylko skonfigurować i uruchomić. Dokładny opis wszystkich funkcjonalności znajdziemy pod adresem [3]. Najpierw musimy zaimportować moduły: **machine** – aby uzyskać dostęp do warstwy sprzętowej – oraz **os**, w którym znajdują się różne funkcje związane z systemem plików.

W linii 1 tworzymy instancję klasy **SDCard** i zapisujemy ją do zmiennej **sd**. W konstruktorze klasy podajemy kilka argumentów. Pierwszym jest – niezbyt trafnie nazwany – slot, który określa sposób komunikacji z pamięcią. Ustawienie go na wartość 2 oznacza, że z kartą microSD chcemy komunikować się przez interfejs SPI (uwaga – tylko w przypadku ESP32-S3!). Istnieje możliwość komunikacji z różnymi typami pamięci Flash, mamy także kilka możliwych interfejsów do wyboru. Po opis pozostałych opcji odsyłam zainteresowanych Czytelników do dokumentacji klasy **SDCard**.

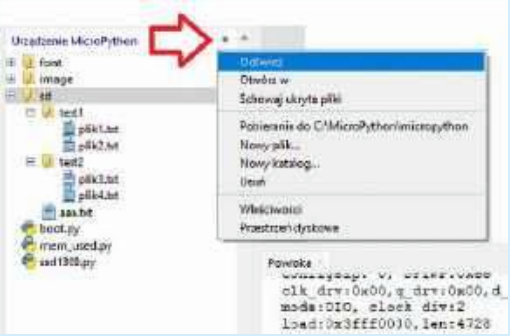
Argument **width** określa liczbę bitów magistrali, przesyłanych w ciągu jednego taktu zegarowego. W przypadku klasycznego SPI jest to rzecz jasna tylko jeden bit. Pozostałe argumenty określają numery pinów oraz częstotliwość sygnału zegarowego.

W ten sposób utworzyliśmy instancję klasy, pozwalającej na niskopoziomowy dostęp do pamięci karty microSD przy pomocy metod takich, jak **sd.readblocks()** czy **sd.writeblocks()**, które wykonują operacje na adresach i tablicach bajtów. Aby przejść na wyższy poziom,i zamiast surowych bajtów odczytywać pliki – musimy najpierw utworzyć klasę obsługującą system plików.

Robimy to w linii 2, gdzie tworzymy instancję klasy **VfsFat**. Stanowi ona rodzaj pośrednika pomiędzy systemem operacyjnym a bajtami zapisanymi w pamięci. Przede wszystkim interpretuje ona bajty zgodnie ze standardem FAT, z którego korzystają wszystkie systemy operacyjne na komputerach. System ten jest stosowany również do obsługi kart microSD. Dostępna jest także klasa **VfsLfs2**, implementująca system plików Little FS v2 – optymalny dla małych pamięci EEPROM. Tak utworzony obiekt zapisujemy do zmiennej **vfs**.

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

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 2. Przykład zainstalowanej karty SD w systemie plików MicroPythona

Ostatnim krokiem jest zamontowanie systemu plików. W tym celu z modułu **os** wywołujemy funkcję **mount**. Pierwszym argumentem jest utworzony linię wcześniej obiekt systemu plików, a drugim – ścieżka, pod którą ten system ma być zainstalowany. Wszystkie pliki i katalogi, znajdujące się na karcie microSD, widoczne będą jako dodatkowy katalog w systemie plików MicroPytona. W naszym przykładzie jest to „/sd". Tu warto wspomnieć o ciekawym błędzie, bowiem... pierwszy znak ścieżki jest ignorowany przez interpreter MicroPythona. Może on być zupełnie dowolny, a nazwa katalogu zostanie skopiowana, poczynając od drugiego znaku.

W tym momencie karta microSD jest już zainstalowana w systemie. Można otwierać i zapisywać pliki dokładnie tak samo, jak to opisaliśmy we wcześniejszej części tego odcinka naszego kursu. Linie 4 i 5 mają za zadanie wyświetlenie zawartości katalogu głównego oraz katalogu karty microSD. Efekt działania tego programu powinien być podobny do poniższego.

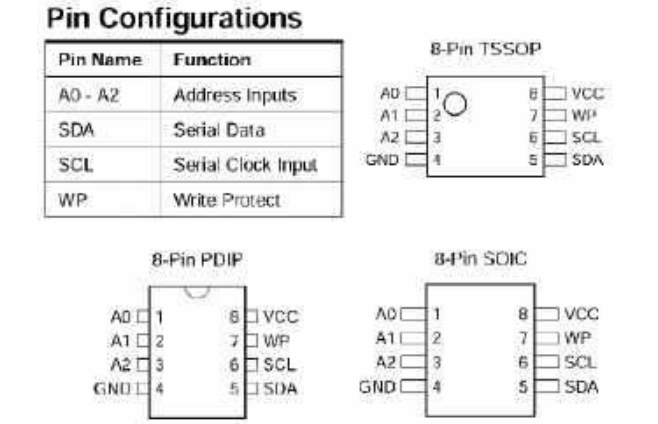
```
>>> %Run -c $EDITOR_CONTENT

MPY: soft reboot
['sd', 'boot.py', 'font', 'image', 'mem_used.py', 'ssd1309.py']
['System Volume Information', 'aaa.txt', 'test1', 'test2']
```

Po wykonaniu programu Thonny nie pokazuje jednak nowego katalogu. Trzeba ręcznie odświeżyć drzewko plików – w tym celu klikamy znajdujący się nad nim przycisk z trzema kreskami (zobacz **rysunek 2**), a następnie wybieramy **Odśwież**. Program ponownie odczyta wszystkie pliki i katalogi. Przykładowy rezultat pracy programu widać na rysunku 2.

Pamięć EEPROM typu xx24Cxxx

W tej części artykułu weźmiemy pod lupę pamięci EEPROM z popularnej serii 24, takie jak na przykład: AT24C01, AT24C32, AT24C512 itp. Liczba na końcu oznaczenia reprezentuje zwykle pojemność pamięci w kilobitach (a nie w kilobajtach!). Pamięci tego typu dostępne są w wariantach z różnymi obudowami, napięciami zasilania i czasami dostępu. Wspólną cechą tych pamięci jest układ wyprowadzeń (zobacz **rysunek 3**) oraz sposób komunikacji przez interfejs I²C.



Rysunek 3. Układ wyprowadzeń pamięci EEPROM z rodziny 24

Opracujemy moduł do obsługi pamięci AT24C32, ponieważ taką właśnie zamontowano na płytce z układami DS1307 i 24C32, którą wykorzystywaliśmy w poprzednim odcinku kursu. Istnieje kilka podobieństw pomiędzy AT24C32 i zegarem DS1307, omawianym miesiąc temu. Zegar jest także pamięcią, choć bardzo małą, bo mającą zaledwie 64 bajty. Układ AT24C32 ma 32 kilobity, czyli 4 kB pamięci EEPROM. Wynika z tego kolejna różnica między obydwoma układami – DS1307 mógł być adresowany 8-bitowo, co pozwalało na zaadresowanie 256 bajtów danych, ale AT24C32 musi już stosować adresowanie 16-bitowe, pozwalające na obsługę do 64 kB danych. Ponadto zapis do pamięci RAM odbywa się niemal natychmiast (jest na tyle szybki, że w przypadku komunikacji przez I²C nie musimy się tym wcale przejmować), ale zapis do EEPROM zajmuje pewien czas, w którym pamięć w ogóle nie odpowiada na żadne polecenia. Kolejną różnicę stanowi fakt, że pamięci EEPROM podzielone są na strony. W jednej operacji zapisu możemy zatem zmienić stan tylko tych bajtów, które znajdują się wewnątrz jednej strony. Nie da się zapisać danych na dwóch stronach w tej samej transakcji.

Jest jeszcze jedna, istotna różnica między sposobami komunikacji opisanymi w tym oraz w poprzednim odcinku kursu. Miesiąc temu napisaliśmy kod w postaci osobnych, prostych funkcji. Tym razem utworzymy własną klasę, którą będziemy mogli wykorzystać w różnych programach i działającą z pamięciami o różnych pojemnościach. Przeanalizujmy kod pokazany na **listingu 3**, zawierający klasę **Mem24**.

Przejdźmy najpierw do linii 17, w której znajduje się kod wykonywany po uruchomieniu pliku (a nie zaimportowaniu go przez inny plik).

Najpierw musimy utworzyć instancję interfejsu obsługiwanego przez naszą klasę. Robimy to w linii 18, powołując do życia instancję klasy **I2C** z modułu **machine** i zapisując ją do zmiennej **i2c**. Celowo pominąłem argumenty **sda** i **scl**, aby skorzystać z domyślnych pinów mikrokontrolera. W linii 19 „drukujemy" zawartość zmiennej **i2c** – na konsoli zostaną wyświetlone wszystkie parametry interfejsu, w tym numery użytych pinów.

W linii 20 tworzymy instancję klasy **Mem24**. Do konstruktora przekazujemy argumenty takie, jak: wybrany interfejs I²C, adres pamięci na magistrali I²C, rozmiar pamięci (w bajtach), rozmiar strony (w bajtach) oraz długość adresu pamięci (w bitach). Tak utworzoną instancję klasy zapisujemy do zmiennej **mem**. Następnie, w celach diagnostycznych, wyświetlamy zawartość zmiennej **mem**, aby mieć pewność, w jaki sposób nasza klasa została skonfigurowana (linia 21).

Na potrzeby testów tworzymy prostą funkcję w linii 22, której zadaniem jest wyświetlanie buforów. Wewnątrz tej funkcji mamy prostą pętlę for, która iteruje po wszystkich bajtach w buforze i wyświetla je jako 2-znakowe liczby szesnastkowe z zakresu od 00 do FF.

Następnie mamy dwa przykłady operacji odczytu 16 bajtów pamięci z adresów 0x0000 oraz 0x0010, po czym pod adresem 0x0F10 zapisujemy przykładowy ciąg znaków. Zwróć uwagę, że nie jest to zwykły string, ale bytestring, o czym świadczy litera **b** przed cudzysłowem. Jak widać, użycie klasy **Mem24** jest bardzo łatwe. Zobaczmy więc, w jaki sposób ta klasa jest zbudowana.

Klasę rozpoczynamy w linii 1. Nasza klasa niczego nie dziedziczy, zatem po nazwie **Mem24** nie mamy żadnych nawiasów z nazwą klasy nadrzędnej. Wewnątrz klasy definiujemy różne metody. Pierwszą z nich jest metoda specjalna **__init__**, będąca konstruktorem klasy

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

eprasa.pl ef7662c802

```
# Plik mem24.py

import time
from machine import Pin, I2C
from micropython import const

TIMEOUT_MS = const(5)

class Mem24():                                                          # 1

    def __init__(self, i2c, device_address, memory_size,                # 2
                 page_size, addr_size=16):
        self.i2c = i2c
        self.device_address = device_address
        self.memory_size = memory_size
        self.page_size = page_size
        self.addr_size = addr_size

    def __str__(self):                                                  # 3
        return f"Mem24({str(self.i2c)}, " \
               f"device_address=0x{self.device_address:02X}," \
               f"memory_size={self.memory_size}, " \
               f"page_size={self.page_size}, " \
               f"addr_size={self.addr_size})"

    def wait_for_ready(self):                                           # 4
        timeout = TIMEOUT_MS
        while timeout:                                                  # 5
            try:
                self.i2c.readfrom(self.device_address, 1)               # 6
                return
            except:                                                     # 7
                time.sleep_ms(1)
                timeout -= 1

        raise OSError(errno.ETIMEDOUT,                                  # 8
            "I2C polling too many times without ACK")

    def read(self, memory_address, length):                            # 9
        self.wait_for_ready()
        return self.i2c.readfrom_mem(self.device_address,
            memory_address, length, addrsize=self.addr_size)

    def read_into(self, memory_address, buffer):                       # 10
        self.wait_for_ready()
        self.i2c.readfrom_mem_into(self.device_address,
            memory_address, buffer, addrsize=self.addr_size)

    def write_page(self, memory_address, data):                        # 11
        self.wait_for_ready()
        self.i2c.writeto_mem(self.device_address,
            memory_address, data, addrsize=self.addr_size)

    def write(self, memory_address, data):                             # 12
        address_end         = memory_address + len(data) - 1
        page_start_num      = memory_address    // self.page_size
        page_end_num        = address_end       // self.page_size
        page_actual_num     = page_start_num
        page_actual_adr_end = None
        actual_start        = memory_address
        actual_end          = None
        actual_length       = None
        bytes_sent          = 0

        while page_actual_num <= page_end_num:
            page_actual_adr_end = self.page_size *
                                  (page_actual_num + 1) - 1
            actual_end = address_end if address_end <=
                         page_actual_adr_end else page_actual_adr_end
            actual_length = actual_end - actual_start + 1
            self.wait_for_ready()
            self.write_page(actual_start,
                            data[bytes_sent:bytes_sent+actual_length])
            bytes_sent += actual_length
            page_actual_num += 1
            actual_start = actual_end + 1

    def erase_chip(self):                                              # 13
        buffer = bytes(self.page_size * [0xFF])                        # 14
        memory_address = 0

        while memory_address < self.memory_size:                       # 15
            self.wait_for_ready()
            self.write_page(memory_address, buffer)
            memory_address += self.page_size

    def dump(self):                                                    # 16
        buffer = bytearray(16)
        memory_address = 0
        print("           0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  A  B  C  D  E  F")

        while memory_address < self.memory_size:
            self.read_into(memory_address, buffer)
            print(f"{memory_address:08X}: ", end = "")
            for byte in buffer:
                print(f"{byte:02X} ", end="")
            for byte in buffer:
                if byte >= 32 and byte <= 127:
                    print(chr(byte), end="")
                else:
                    print(" ", end="")
            print()
            memory_address += 16

if __name__ == "__main__":                                             # 17

    i2c = I2C(0)                                                       # 18
    print(i2c)                                                         # 19
```

Listing 3. Kod pliku mem24.py

(linia 2) i często wykorzystywana do skopiowania argumentów konstruktora do zmiennych wewnętrznych klasy, które poprzedzone są słówkiem **self**. Tak utworzone zmienne mogą być następnie używane przez inne metody w klasie.

W linii 3 definiujemy metodę specjalną **__str__**. Jest ona wywoływana podczas rzutowania klasy na string. Przykład takiej operacji widzimy w linii 21. W rezultacie metoda musi zwrócić jakiś napis, który możemy zastosować w celach diagnostycznych.

Metoda **wait_for_ready**, którą tworzymy w linii 4, jest właściwie najważniejszą ze wszystkich, bo bez niej reszta może nie działać prawidłowo. Jej cele to sprawdzanie, czy pamięć jest gotowa do przyjęcia kolejnego polecenia i cykliczne testowanie gotowości co pewien czas. Wykorzystujemy tu zmienną **timeout**, która jest inicjalizowana wartością stałej **TIMEOUT_MS**. Będziemy tę zmienną sprawdzać cyklicznie w pętli while tak długo, aż przyjmie wartość zero, co oznaczać będzie błąd. Wewnątrz pętli mamy blok **try-except**. W linii 6, w sekcji **try**, próbujemy wywołać pamięć i odczytać z niej 1 bajt – jego zawartość nie ma żadnego znaczenia i nigdzie go nie zapisujemy, interesuje nas tylko sprawdzenie, czy pamięć odpowie w jakikolwiek sposób na transmisję. Jeżeli tak, to znaczy, że pamięć jest gotowa do przyjmowania kolejnych poleceń, zatem kończymy działanie metody instrukcją **return**. Jeżeli nie, wówczas wchodzimy do sekcji **except**, gdzie zawieszamy działanie programu na 1 milisekundę, po czym zmienną **timeout** zmniejszamy o 1 i próbujemy ponownie.

Jeżeli pomimo wielu prób nie uda się nawiązać kontaktu z pamięcią, wtedy przechodzimy do linii 8, gdzie zgłaszamy wyjątek. Należy go w jakiś sposób obsłużyć, bo inaczej program nam się „wysypie".

W linii 9 mamy metodę **read**, której zadaniem jest odczytanie ciągu bajtów z pamięci. Adres pierwszego bajtu określany jest argumentem **memory_address**, a argument **length** określa liczbę bajtów do odczytania. Wewnątrz tej metody wywołujemy znaną już nam metodę **wait_for_ready**. Następnie wywołujemy funkcję **readfrom_mem**, należącą do instancji klasy **I2C** z modułu **machine**, która zapisana jest w wewnętrznej zmiennej **self.i2c**.

W linii 10 znajduje się bardzo podobna metoda, ale korzystająca z innego sposobu przekazywania odczytanych danych. Metoda **readfrom_mem_into** nie zwraca ciągu bajtów, lecz zapisuje je do bufora wskazanego w argumencie. Liczba bajtów do odczytania jest równa długości podanego bufora.

Przejdźmy do metody **write_page**, zapisującej dane do pojedynczej strony pamięci (linia 11). W układzie AT24C32 pamięć jest podzielona na 128 stron, każda o pojemności 32 bajtów, co daje razem 4096 B. Podczas operacji zapisu kontroler pamięci może aktualizować zawartość tylko jednej strony. Nie możemy przesyłać danych, które mają być zapisane do co najmniej dwóch stron. W takiej sytuacji zapis zostanie wykonany tylko na pierwszej zaadresowanej stronie, a na pozostałych będzie zignorowany. Korzystając z metody **write_page** musimy mieć pewność, że zapisujemy maksymalnie 32 bajty, tylko w obrębie pojedynczej strony.

Problem rozwiązuje metoda write. W argumentach podajemy dowolny adres, pod którym możemy zapisać dowolnie długi ciąg danych (oczywiście taki, który zmieści się do pamięci). Metoda sama dzieli dane na strony

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

eprasa.pl ef7662c802

i będzie wykonywać zapisy w pętli, strona po stronie, aż zapisze wszystkie podane informacje.

W linii 13 mamy metodę **erase_chip**, której zadaniem jest skasowanie całej pamięci. Układy z serii 24 nie obsługują dedykowanego rozkazu do kasowania. Wobec tego w linii 14 tworzymy bufor o długości strony pamięci, który wypełniamy bajtami 0xFF – ponieważ jest to domyślny stan fabrycznie czystej pamięci EEPROM. Tak utworzony bufor zapisujemy w pętli (linia 15), zaczynając od adresu 0x0000 i dążąc aż do końca pamięci.

Pozostaje już tylko metoda **dump** (linia 16), której celem jest odczytanie pamięci i wyświetlenie jej na konsoli. Można ją wykorzystywać w celach diagnostycznych.

Gotowe! Wciskamy F5 w edytorze Thonny i testujemy! Na konsoli powinniśmy zobaczyć wynik, jaki pokazano na **listingu 4**.

```
mem = Mem24(i2c, device_address=0x50, memory_size=4096, \          # 20
            page_size=32, addr_size=16)
print(mem)                                                          # 21

def print_hex(buffer):                                              # 22
    for byte in buffer:
        print(f"{byte:02X} ", end="")
    print()

buffer = mem.read(0x0000, 16)
print_hex(buffer)

buffer = bytearray(16)
mem.read_into(0x0010, buffer)
print_hex(buffer)

mem.write(0x0F10, b'ABCDEFGHIJ')

mem.dump()
```

Listing 3. Kod pliku mem24.py – cd.

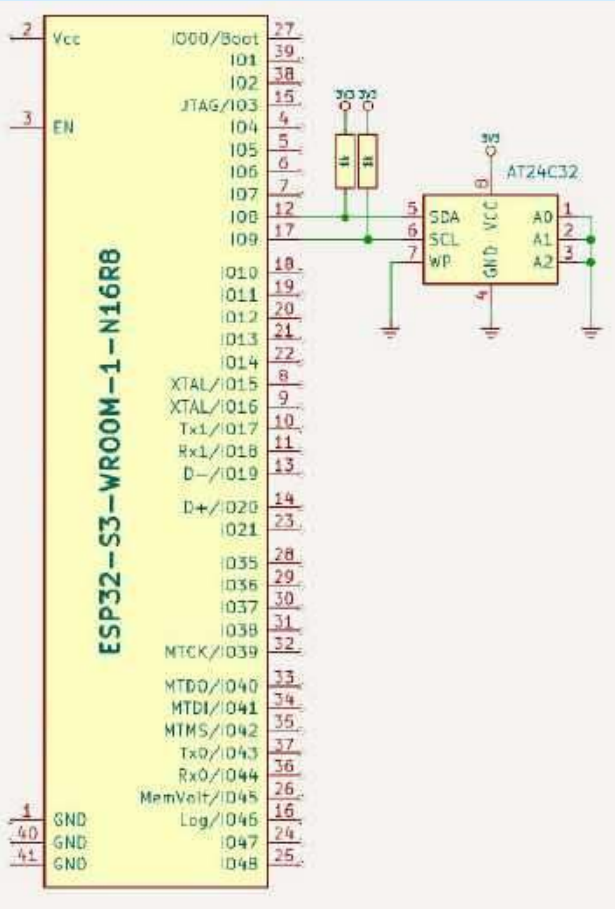
```
>>> %Run -c $EDITOR_CONTENT

MPY: soft reboot
I2C(0, scl=9, sda=8, freq=400000)
Mem24(I2C(0, scl=9, sda=8, freq=400000), device_address=0x50,memory_size=4096, page_size=32, addr_size=16)
FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
          0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  A  B  C  D  E  F
00000000: FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
00000010: FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
...wycięte...
00000F00: FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
00000F10: 41 42 43 44 45 46 47 48 49 4A 4B 4C 4D 4E 4F 50 ABCDEFGHIJKLMNOP
00000F20: 51 52 53 54 55 56 57 58 59 5A 61 62 63 64 65 66 QRSTUVWXYZabcdef
00000F30: 41 42 43 44 45 46 47 48 49 4A 4B 4C 4D 4E 4F 50 ABCDEFGHIJKLMNOP
00000F40: 51 52 53 54 55 56 57 58 59 5A 61 62 63 64 65 66 QRSTUVWXYZabcdef
00000F50: 41 42 43 44 45 46 47 48 49 4A 4B 4C 4D 4E 4F 50 ABCDEFGHIJKLMNOP
00000F60: 51 52 53 54 55 56 57 58 59 5A 61 62 63 64 65 66 QRSTUVWXYZabcdef
00000F70: FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
00000F80: FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
00000F90: FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
00000FA0: FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
00000FB0: FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
00000FC0: FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
00000FD0: FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
00000FE0: FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
00000FF0: FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF
```

Listing 4. Wynik pracy kodu z listingu 3

Dysk w pamięci EEPROM

Czas przejść na kolejny poziom – zamiast odczytywać i zapisywać bloki bajtów, chcielibyśmy w pamięci AT24C32 wykonywać operacje na plikach, które w dodatku mogą być przechowywane w różnych



Rysunek 4. Przykładowy sposób połączenia pamięci EEPROM z ESP32

```
# Plik drive24.py

import os

class Drive:
    def __init__(self, memory, path):                               # 1
        self.memory = memory
        self.path = path

        if memory.page_size < 64:                                   # 2
            self.block_size = 64
        else:
            self.block_size = memory.page_size

        try:                                                        # 3
            os.mount(self, path)
        except:                                                     # 4
            os.VfsLfs2.mkfs(self)
            os.mount(self, path)

    def format(self):                                               # 5
        os.VfsLfs2.mkfs(self)

    def deinit(self):                                               # 6
        os.umount(self.path)

    def readblocks(self, block_num, buf, offset=0):                 # 7
        address = block_num * self.block_size + offset
        self.memory.read_into(address, buf)

    def writeblocks(self, block_num, buf, offset=0):                # 8
        if offset is None:
            offset = 0

        address = block_num * self.block_size + offset
        self.memory.write(address, buf)

    def ioctl(self, op, arg):                                       # 9

        # Number of blocks
        if op == 4:
            return self.memory.memory_size // self.block_size

        # Block size
        if op == 5:
            return self.block_size

        # Block erase
        if op == 6:
            address = arg * self.block_size
            buffer = bytes(b'\x00' * self.block_size)
            self.memory.write(address, buffer)
            return 0
```

Listing 5. Kod pliku drive24.py

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

eprasa.pl ef7662c802

folderach. Przechodzimy zatem do najważniejszej części tego odcinka: nauczymy się, w jaki sposób można zainstalować system plików w dowolnej pamięci. W tym celu musimy napisać kolejną klasę, która jest pośrednikiem pomiędzy systemem operacyjnym a klasą transferującą tablice bajtów z i do pamięci. Zobaczmy kod z **listingu 5**, który zawiera tylko jedną klasę o nazwie **Drive**.

Już na pierwszy rzut oka widać, że klasa ta jest bardzo prosta i składa się z kilku banalnych metod. Pierwszą z nich stanowi konstruktor **__init__** (linia 1). Pobiera on dwa argumenty, nie licząc **self**. Argument **memory** to instancja klasy obsługującej pamięć, na przykład **Mem24**, jaką opracowaliśmy wcześniej. Argument **path** to string z nazwą folderu, w którym ma zostać zainstalowana pamięć. W przypadku karty SD nazwaliśmy go „/sd", a tutaj będziemy używać nazwy „/eeprom".

W linii 2 znajduje się potencjalna przyczyna wielu błędów. Tym bardziej że w oficjalnej dokumentacji MicroPythona wcale o tym fakcie nie wspomniano. Algorytmy systemu plików dzielą mianowicie pamięć na strony i rozsądnie jest, aby strona systemu plików miała taką samą pojemność, jak rzeczywista strona podłączonej pamięci. Jednak strona systemu plików nie może być mniejsza niż 64 B i musi stanowić potęgę dwójki. Pamięć AT24C32 ma długość strony równą 32 B, zatem jedna strona systemu plików musi składać się z dwóch stron pamięci fizycznej.

Następnie mamy blok try-except. W linii 3 próbujemy zamontować system plików pod ścieżką wskazaną w argumencie **path**. Ta operacja może się nie udać, jeżeli pamięć nie została wcześniej sformatowana. W takiej sytuacji przechodzimy do linii 4, gdzie formatujemy pamięć w formacie LittleFS2. Możemy także wykorzystać system plików FAT, jednak do małych pamięci LittleFS2 jest optymalnym rozwiązaniem. Po sformatowaniu ponownie próbujemy zamontować pamięć jeszcze raz.

Dalej mamy kilka metod. Metoda **format** (linia 5) służy do czyszczenia pamięci i utworzenia systemu plików na nowo, a **deinit** (linia 6) odinstalowuje pamięć z systemu – co warto zrobić, jeżeli pamięć ma być fizycznie odłączona od mikrokontrolera. Dalej mamy metody **readblocks** (linia 7) i **writeblocks** (linia 8), które odczytują i zapisują bloki pamięci. Funkcje te nie są obowiązkowe do zamontowania pamięci w systemie plików MicroPythona. Na samym końcu mamy metodę **ioctl** (linia 9). Jest ona wykorzystywana przez MicroPythona, by wykonać inne operacje na pamięci. Istotny jest tutaj argument **op**, który określa, jaką operację należy wykonać. Obligatoryjne jest zaimplementowanie instrukcji dla **op** równego 4, 5 i 6, które oznaczają odpowiednio: zwrócenie liczby bloków pamięci, zwrócenie rozmiaru bloku i skasowanie bloku.

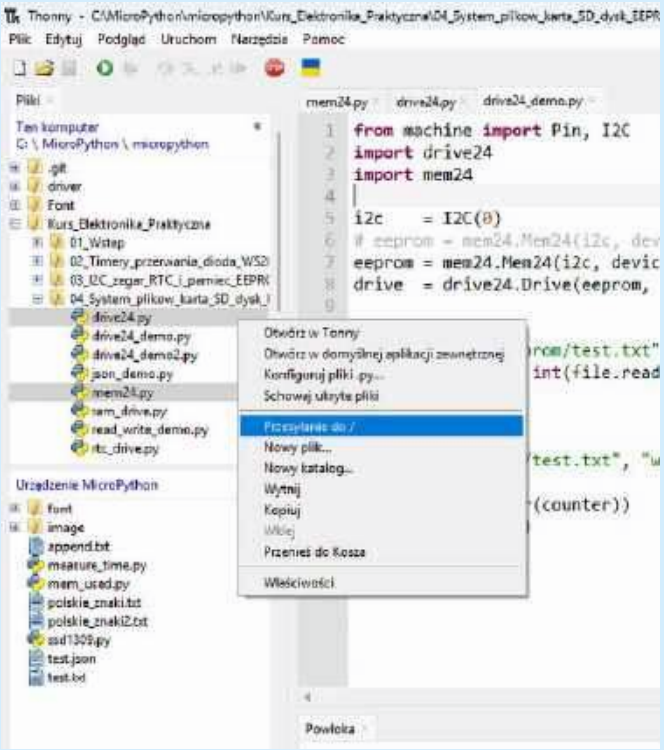
W taki sposób możemy zaimplementować obsługę zupełnie dowolnych pamięci, aby korzystać z nich poprzez system plików.

Testujemy!

Pora zebrać wszystko w jedną całość. Napiszemy teraz prosty program, który w pamięci EEPROM typu AT24C32 tworzy system plików i montuje go pod ścieżką „/eeprom". Następnie spróbujemy odczytać plik „eeprom/test.txt", w którym spodziewamy się zmiennej liczbowej. Po jej znalezieniu program inkrementuje ją o 1, a następnie zapisuje w tym samym pliku.

Aby taki skrypt mógł działać, najpierw musimy przesłać napisane przez nas moduły **mem24** i **drive24** do ESP32. W tym celu, w lewym górnym oknie klikamy odpowiednie pliki prawym przyciskiem myszy, a następnie wybieramy opcję **Przesyłanie do** /, tak jak pokazuje to **rysunek 5**. Można zaznaczyć kilka plików do przesłania jednocześnie, klikając je z wciśniętym przyciskiem CTRL lub SHIFT. Po przesłaniu pliki powinny pojawić się w lewym dolnym oknie, gdzie pokazana jest zawartość pamięci w ESP32.

Zobaczmy kod pokazany na **listingu 6**. W liniach 1 i 2 importujemy moduły, które napisaliśmy w tym odcinku. Następnie



Rysunek 5. Przesyłanie plików do ESP32

```
# Plik drive24_demo.py

from machine import Pin, I2C
import drive24                                                  # 1
import mem24                                                    # 2

i2c    = I2C(0)                                                 # 3
eeprom = mem24.Mem24(i2c, device_address=0x50, \                # 4
                     memory_size=4096, page_size=32, \
                     addr_size=16)
drive  = drive24.Drive(eeprom, "/eeprom")                       # 5

try:                                                            # 6
    with open("eeprom/test.txt") as file:
        counter = int(file.read())                              # 7
except:                                                         # 8
    counter = 0

with open("eeprom/test.txt", "w") as file:                      # 9
    counter += 1
    file.write(str(counter))                                    # 10
    print(counter)
```

Listing 6. Kod pliku drive24_demo.py

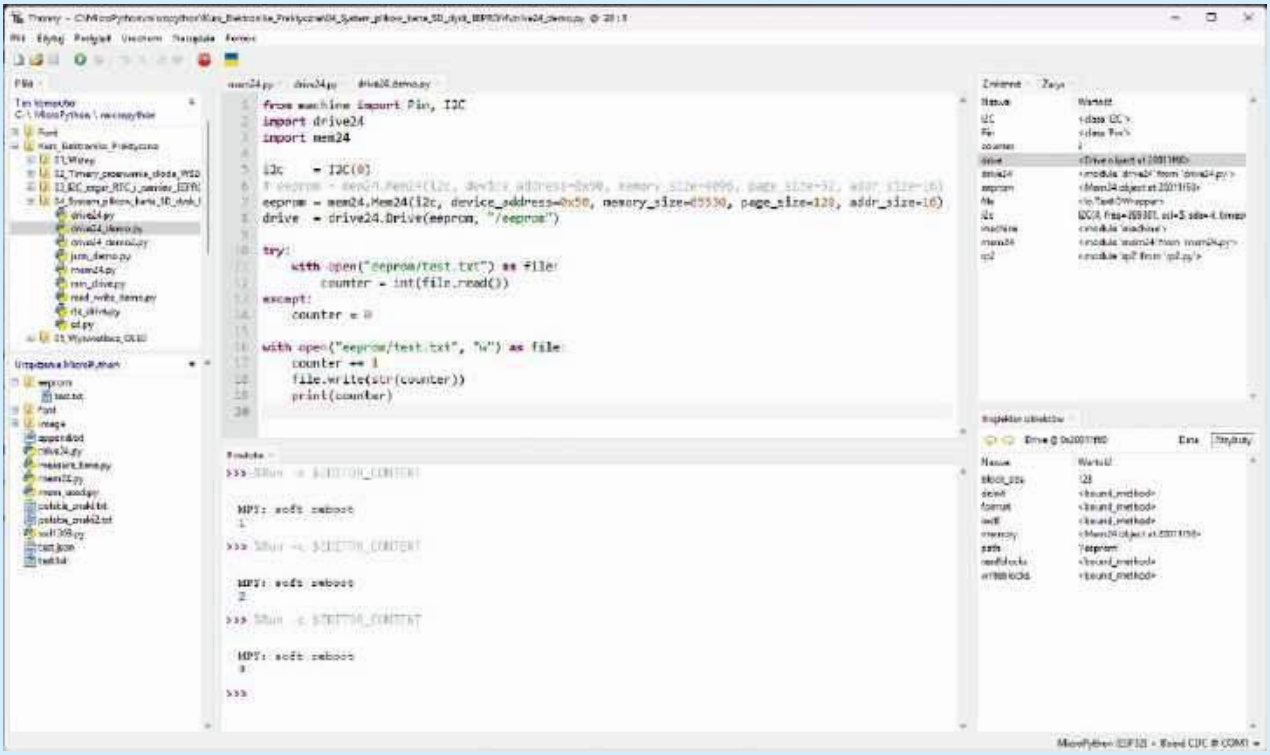
tworzymy różne obiekty, które będziemy wykorzystywać później. W linii 3 tworzymy instancję interfejsu I²C w jego domyślnej konfiguracji. Następnie tworzymy instancję pamięci EEPROM. W pierwszym argumencie konstruktora przekazujemy utworzoną wcześniej instancję interfejsu I²C, a w kolejnych znajdują się poszczególne parametry pamięci. Dalej, w linii 4, tworzymy instancję klasy budującej system plików. Pierwszym argumentem konstruktora jest utworzona wcześniej pamięć EEPROM, a drugim – ścieżka dostępu. To wszystko! Utworzyliśmy i skonfigurowaliśmy potrzebne bloki, które są gotowe do użycia.

Dalej widzimy kod, którego celem jest wykonanie właściwego zadania powierzonego naszemu programowi. Plik próbujemy

Zobacz więcej:
- Repozytorium kursu na GitHubie https://github.com/leonow32/micropython
- Tryby otwierania plików https://www.geeksforgeeks.org/file-mode-in-python/
- Dokumentacja klasy SDCard https://docs.micropython.org/en/latest/library/machine.SDCard.html

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

eprasa.pl ef7662c802



Rysunek 6. Efekt działania kodu z listingu 6

otworzyć w bloku **try-except** (linia 6). Odczytujemy plik funkcją **read**, która zwraca jego zawartość jako string. Aby wykonywać operacje matematyczne, musimy jego zawartość przekonwertować na liczbę przy pomocy funkcji **int** i wynik tej operacji zapisujemy do zmiennej **counter**. Jeżeli któraś z tych operacji się nie powiedzie, od razu przechodzimy do bloku **except**, gdzie zmienną **counter** inicjalizujemy wartością zero. Pozostaje już tylko blok **with**, w którym zapisujemy zmienną **counter** powiększoną o 1. Zwróć uwagę, że w linii 10 używamy funkcji str, aby przekształcić liczbę ze zmiennej **counter** na string.

Uruchamiamy program naciskając F5. Po każdym uruchomieniu na konsoli wyświetli się kolejna liczba, tak jak pokazano na **rysunku 6**. Odśwież listę plików w okienku *Urządzenie MicroPython* w lewym dolnym rogu. Wtedy pojawi się katalog eeprom, a w nim plik test.txt. Możesz go otworzyć i edytować jak normalny plik, mimo że zapisany jest w pamięci EEPROM.

W następnym odcinku poznamy sterownik wyświetlacza OLED typu SSD1309 firmy Solomon Systech. Wykorzystamy wyświetlacz o rozdzielczości 128×64 px, pracujący z interfejsem I²C. Na rynku jest dużo różnych płytek z takimi wyświetlaczami. Gorąco polecam zakupić „niebieską" płytkę z wyświetlaczem o przekątnej 2,42 cala, z 7-pinowym konektorem. Takie moduły mogą pracować z interfejsem SPI lub I²C, a zmiana interfejsu jest bardzo prosta i wymaga przylutowania lub odlutowania małych zworek. Wyświetlacze OLED 128×64 px dostępne są w kolorach białym, żółtym, zielonym i niebieskim.

Dominik Bieczyński
leonow32@gmail.com

REKLAMA

eprasa.pl ef7662c802

koktajl niusów

Orange kontynuuje wygaszanie sieci 3G – we wrześniu zniknie z kolejnych 5 województw

Orange kontynuuje proces stopniowego wyłączania własnej sieci komórkowej 3G, który rozpoczął się ponad dwa lata temu. Celem operacji jest zwolnienie pasma 900 MHz i przeznaczenie go na potrzeby nowocześniejszej i bardziej wydajnej technologii LTE.

We wrześniu 2025 roku planowane są kolejne wyłączenia sieci 3G na terenie pięciu województw: pomorskiego, mazowieckiego, dolnośląskiego, małopolskiego i podkarpackiego. Zmiany obejmą zarówno duże aglomeracje, jak Warszawa, Kraków, Gdańsk i Gdynia, jak i mniejsze miasta – w tym Tarnów, Sopot, Jelenią Górę i Otwock.

Proces modernizacji infrastruktury telekomunikacyjnej wiąże się ze wzrostem zapotrzebowania na transfer danych i coraz większym ruchem abonenckim. Przejście z 3G na LTE pozwala operatorowi zwiększyć zarówno zasięg, jak i pojemność sieci komórkowej, co przekłada się na lepszą jakość usług dla użytkowników.

Harmonogram wygaszania został zaprezentowany w formie mapy, na której kolorem pomarańczowym zaznaczono obszary objęte wrześniową aktualizacją. Zgodnie z planem, ostatni etap wyłączeń obejmie południową część kraju, w tym Poznań i Wrocław. Zakończenie całego procesu przewidziano na 1 stycznia 2026 roku – od tego dnia sieć 3G Orange nie będzie już dostępna na terytorium Polski.

Warto zaznaczyć, że wyłączenia te dotyczą wyłącznie sieci Orange. W przypadku innych operatorów komórkowych decyzje o zakończeniu działania technologii 3G mogą być podejmowane niezależnie – część z nich już zakończyła ten proces, inni mogą zrobić to w przyszłości.

https://tiny.pl/7k622vt2

Elektroniczna perkusja ręczna Mood Pan – nowy instrument od firmy Roland

Mood Pan to elektroniczna perkusja ręczna, która została opracowana z myślą o szerokim gronie odbiorców – od początkujących po bardziej zaawansowanych muzyków. Urządzenie łączy w sobie cechy tradycyjnych handpanów z nowoczesną technologią perkusyjną firmy Roland, oferując szeroką paletę brzmień oraz intuicyjny sposób gry.

Instrument nie wymaga znajomości specjalistycznych technik ani doświadczenia muzycznego. Można na nim grać wyłącznie palcami, co czyni go dostępnym również dla osób, które wcześniej nie miały kontaktu z tego rodzaju instrumentami. Mood Pan wyposażono w dziesięć wrażliwych na dotyk padów, które można przypisać

do wybranych skal muzycznych – pozwala to uniknąć fałszywych dźwięków i sprzyja swobodnej improwizacji. Dodatkowe efekty uzyskuje się poprzez grę dłońmi po bokach instrumentu, a także przez dotykowe wyciszanie dźwięków i korzystanie z wbudowanego panelu do modyfikacji brzmienia.

Mood Pan oferuje szeroki wybór barw dźwiękowych – od klasycznego brzmienia handpanu po instrumenty akustyczne takie jak bęben językowy, gamelan, misa kryształowa czy misa śpiewająca. Użytkownicy mogą sięgnąć również po charakterystyczny dźwięk sitaru, brzmienia smyczkowe o orkiestrowym charakterze oraz syntezatorowe pady. Urządzenie oferuje cztery tryby pracy dedykowane różnym nastrojom i porom dnia – od sesji relaksacyjnych i porannej jogi po wieczorny wypoczynek. W pamięci urządzenia zapisano cztery konfiguracje użytkownika, które umożliwiają szybki dostęp do wybranych wariacji brzmieniowych.

Mood Pan może także pełnić funkcję głośnika Bluetooth, co rozszerza jego zastosowania o codzienne korzystanie z funkcji odtwarzania dźwięku. W praktyce jest to kompaktowy i wszechstronny instrument, który łączy w sobie funkcjonalność, prostotę obsługi i różnorodność brzmień. Może być używany zarówno w warunkach domowych, jak i podczas zajęć muzycznych, sesji terapeutycznych czy spotkań w plenerze. Urządzenie stanowi dowód na rosnące zainteresowanie instrumentami elektronicznymi, które wspierają kreatywność użytkowników niezależnie od ich wieku i poziomu zaawansowania.

https://www.roland.com/pl/products/mood_pan_mn-10/

Hikvision prezentuje wielkoskalowe modele AI Guanlan do zaawansowanej analizy danych

Firma Hikvision ogłosiła premierę zaawansowanych modeli sztucznej inteligencji z serii Guanlan, zaprojektowanych z myślą o analizie obrazu, przetwarzaniu języka naturalnego oraz

eprasa.pl ef7662c802

integracji danych z wielu źródeł. Nowe rozwiązania mają służyć jako narzędzia wspierające transformację cyfrową w sektorach publicznym i prywatnym, odpowiadając na rosnące potrzeby w zakresie automatyzacji oraz zarządzania danymi w środowiskach opartych na technologii Internetu Rzeczy (IoT).

Modele Guanlan bazują na trójwarstwowej architekturze. Pierwszą warstwę stanowią modele bazowe, obejmujące duże modele wizyjne, językowe oraz multimodalne. Druga warstwa integruje modele branżowe, które dostosowano do specyficznych zastosowań w różnych sektorach. Na najwyższym poziomie architektury znajdują się modele zadaniowe, wykorzystywane w konkretnych scenariuszach operacyjnych. Dzięki tej strukturze możliwe jest skuteczne łączenie analizy wizualnej, przetwarzania języka i danych kontekstowych.

Zastosowanie modeli Guanlan umożliwia integrację danych tekstowych i wizualnych w ramach tzw. percepcji multimodalnej. Systemy oferują elastyczne metody wdrożeń, co pozwala na ich wykorzystanie w zróżnicowanych środowiskach i aplikacjach – od prostych systemów analitycznych po złożone projekty bazujące na uczeniu maszynowym i przetwarzaniu w czasie rzeczywistym.

Rozwój serii Guanlan jest elementem szerszej strategii firmy Hikvision, która stopniowo poszerza swoją działalność poza – dotychczas dominujący w ofercie producenta – sektor systemów monitoringu wizyjnego. Skupiając się na rozwiązaniach AI i IoT, producent dąży do stworzenia otwartych, skalowalnych i zintegrowanych systemów odpowiadających na konkretne potrzeby biznesowe i instytucjonalne. Nowe modele mają odegrać kluczową rolę w cyfryzacji procesów i przyspieszeniu wdrożeń technologii inteligentnych w wielu branżach.

https://tiny.pl/zr11r8-h

Ultraczysty trichlorek krzemu ($SiHCl_3$) w ofercie Grupy PCC

Grupa PCC rozszerzyła swoją ofertę o wysokiej czystości trichlorek krzemu ($SiHCl_3$), osiągający czystość na poziomie 99,99% lub wyższym. Produkt ten znajduje zastosowanie przede wszystkim w zaawansowanych technologiach przemysłowych, w tym w produkcji polikrzemu oraz w procesach osadzania z fazy gazowej warstw epitaksjalnych krzemu (Si) i węglika krzemu (SiC). Ze względu na swoją wysoką jakość, oznaczaną jako >6N, trichlorek krzemu oferowany przez Grupę PCC może być wykorzystywany jako prekursor do produkcji polikrzemu dla sektorów: fotowoltaicznego i półprzewodnikowego.

Trichlorek krzemu jest kluczowym związkiem chemicznym stosowanym w procesie epitaksji, czyli osadzania cienkich warstw krzemu na powierzchniach bazowych. W typowych reakcjach $SiHCl_3$ ulega przemianie do dichlorku krzemu ($SiCl_2$), który następnie chemicznie adsorbuje się na powierzchni krzemu, uwalniając przy tym chlorowodór (HCl), zgodnie z reakcją: $SiHCl_3 \rightarrow HCl + SiCl_2$. Alternatywnie, dichlorek krzemu może reagować z wodorem, tworząc czysty krzem i wydzielając HCl: $SiCl_2 + H_2 \rightarrow Si + 2HCl$.

Zastosowanie trichlorku krzemu obejmuje także procesy wytwarzania warstw epitaksjalnych z węglika krzemu (SiC), które są niezbędne w produkcji zaawansowanych elementów półprzewodnikowych. Dzięki wysokiej czystości i stabilności chemicznej, oferowany produkt odpowiada rygorystycznym wymaganiom elektroniki i fotowoltaiki, gdzie precyzja procesów i jakość materiałów mają najwyższe znaczenie.

Nowa oferta Grupy PCC stanowi odpowiedź na rosnące zapotrzebowanie rynku na wysokiej klasy prekursory chemiczne wykorzystywane w nowoczesnych technologiach materiałowych i energetycznych.

Najważniejsze własności ultraczystego chlorku krzemu:

- **Masa molowa:** 135,45 g/mol
- **Kolor:** bezbarwny
- **Zapach:** ostry, duszący
- **Rozpuszczalność w wodzie:** gwałtowna (z wydzielaniem HCl i H_2)
- **Gęstość substancji** (przy temperaturze 20°C): 1,34 g/ml
- **Temperatura topnienia:** –126,6°C
- **Temperatura wrzenia:** 31,9°C
- **Prężność par** (przy temperaturze 22,5°C): 72 kPa
- **Właściwości wybuchowe:** brak (przy kontakcie z wodą wydzielany jest palny gaz)
- **Temperatura samozapłonu:** powyżej 224°C

https://tiny.pl/8r7jzdjf

VARTA wprowadza na rynek latarki Night Cutter Pro o mocy 2000 lumenów

Firma VARTA rozszerzyła swoją ofertę o serię latarek Night Cutter Pro, przeznaczonych do pracy w trudnych warunkach terenowych. Urządzenia generują strumień świetlny sięgający 2000 lumenów, co pozwala oświetlić duże przestrzenie w stopniu porównywalnym z warunkami dziennymi. Aluminiowa obudowa, wykonana z materiału klasy lotniczej, oferuje doskonałą wytrzymałość mechaniczną przy zachowaniu kompaktowych wymiarów, dzięki czemu latarka mieści się w kieszeni lub schowku podręcznym.

Konstrukcja Night Cutter Pro spełnia wymagania stopnia ochrony IP67, co oznacza nie tylko pełną odporność na pył, ale także możliwość zanurzenia do głębokości jednego metra przez 30 minut. Producent deklaruje również wytrzymałość na upadki z wysokości do dwóch metrów. Wbudowany port USB-C umożliwia ładowanie akumulatora i, podobnie jak reszta obudowy, jest zabezpieczony aluminiową nasadką. Stan naładowania wskazuje kontrolka LED.

Użytkownik ma do dyspozycji pięć trybów pracy: turbo, wysoki, średni, niski oraz stroboskopowy. Dodatkowo latarki oferują regulację ostrości wiązki, dzięki czemu można łatwo dostosować szerokość i zasięg światła do aktualnych potrzeb. Optymalne połączenie parametrów technicznych – wysokiej mocy, wytrzymałej i szczelnej obudowy oraz kilku trybów pracy z regulowanym poziomem jasności – pozycjonuje serię Night Cutter Pro jako uniwersalne narzędzie oświetleniowe zarówno do zastosowań profesjonalnych, jak i rekreacyjnych.

https://tiny.pl/c894zp3w

eprasa.pl ef7662c802

BenQ W2720i – projektor kina domowego z technologiami AI Cinema i HDR-PRO

Firma BenQ wprowadziła do swojej oferty projektor W2720i, zaprojektowany z myślą o użytkownikach domowych, którzy oczekują wysokiej jakości obrazu bez konieczności samodzielnej konfiguracji parametrów. Urządzenie wyposażono w tryb AI Cinema, który automatycznie dostosowuje jasność oraz inne ustawienia do warunków otoczenia. Dzięki temu obraz zachowuje wysoką jakość zarówno w ciągu dnia, jak i wieczorem, a użytkownik może cieszyć się wrażeniami zbliżonymi do tych, jakie zaplanował reżyser, bez potrzeby znajomości zaawansowanych narzędzi kalibracyjnych.

Zastosowana w projektorze technologia CinematicColor, opracowana przez firmę BenQ, gwarantuje precyzyjne odwzorowanie barw. Każdy egzemplarz urządzenia dostarczany jest z indywidualnym raportem kalibracji fabrycznej, który potwierdza zgodność z temperaturą barwową D65 oraz wysoki poziom odwzorowania kolorów. Uzupełnieniem systemu wyświetlania obrazu jest technologia HDR-PRO z wieloetapową kontrolą jasności, wspierana przez energooszczędne źródło światła LED. Dzięki temu projektor charakteryzuje się długą żywotnością i eliminuje konieczność częstej wymiany lampy, co przekłada się na niższe koszty eksploatacji.

W2720i może wyświetlać obraz o przekątnej 120 cali z odległości 2,7 metra. Zastosowany w nim zoom optyczny 1,3×, funkcja przesunięcia soczewki w pionie oraz ośmiopunktowe dopasowanie ekranu umożliwiają elastyczne ustawienie obrazu w różnych warunkach przestrzennych. Projektor pracuje w oparciu o system Android TV, oferując dostęp do aplikacji streamingowych 4K, takich jak Netflix czy Disney+. Urządzenie wyposażono w złącza: HDMI 2.1 (z obsługą HDCP 2.3), SPDIF oraz eARC, co pozwala na bezproblemowe podłączenie soundbarów i systemów audio 7.1, niezależnie od producenta sprzętu. Dzięki zaawansowanej technologii przetwarzania obrazu, szerokiej kompatybilności i funkcjom wspieranym przez sztuczną inteligencję, projektor W2720i stanowi dopracowane rozwiązanie dla użytkowników poszukujących kinowych doznań w domowym zaciszu.

https://tiny.pl/vmkhcdc3

Superkondensatory hybrydowe LY firmy CAP-XX w ofercie TME

Wraz z dynamicznym rozwojem technologii Internetu Rzeczy (IoT) oraz rozwiązań z zakresu odzyskiwania energii (energy harvesting), superkondensatory zyskują na znaczeniu jako istotne elementy układów zasilających. Jednym z wiodących producentów specjalizujących się w tego typu komponentach jest australijska firma CAP-XX, której produkty, w tym seria superkondensatorów hybrydowych LY, są dostępne w ofercie TME.

Seria LY została zaprojektowana z myślą o zastosowaniach wymagających wysokiej gęstości energii przy kompaktowych wymiarach. Urządzenia te doskonale sprawdzają się w aplikacjach typu energy harvesting, w których konieczne jest gromadzenie i szybkie uwalnianie energii, również z nieodnawialnych źródeł zasilania.

Superkondensatory hybrydowe LY oferują prąd rozładowania w zakresie od 1,4 do 9,7 A, przy napięciu roboczym wynoszącym od 2,5 do 3,8 V, w zależności od konkretnego modelu. Charakteryzują się szerokim zakresem temperatur pracy (od –40 do 65°C) oraz długą żywotnością, która wynosi co najmniej 250 000 cykli ładowania i rozładowania. Wszystkie modele z tej serii mają obudowę z radialnymi wyprowadzeniami, co umożliwia ich montaż w technologii przewlekanej (THT).

Dzięki tym właściwościom superkondensatory LY są szczególnie polecane do urządzeń przenośnych, sensorów bezprzewodowych, liczników i innych aplikacji, w których niezawodność i oszczędność przestrzeni mają kluczowe znaczenie.

https://tiny.pl/zb35xk6p

Pozytywne zakończenie testów przełomowej konstrukcji jednofazowego transformatora olejowego 765 kV firmy Hitachi

Firma Hitachi z powodzeniem zakończyła testy jednofazowego transformatora olejowego o napięciu 765 kV i mocy 250 MVA, wypełnionego naturalnym estrem. Jest to pierwszy na świecie transformator tego typu, łączący tak wysokie parametry napięciowe z zastosowaniem ekologicznego środka izolacyjnego. Rozwiązanie to powstało z myślą o operatorach systemów elektroenergetycznych bardzo wysokiego napięcia, którzy poszukują bezpieczniejszych i bardziej zrównoważonych technologii przesyłu energii.

Transformatory o napięciu 765 kV stanowią kluczowy element infrastruktury przesyłowej, odpowiadającej na rosnące zapotrzebowanie energetyczne, w tym zasilanie dużych obszarów miejskich – na przykład miast liczących około 250 tysięcy mieszkańców. Nowe urządzenie powstało w ramach rozwoju platformy technologicznej TrafoStar i zostało zaprojektowane z uwzględnieniem najwyższych standardów bezpieczeństwa i niezawodności.

Zastosowany w transformatorze naturalny ester wyróżnia się temperaturą zapłonu ponad dwukrotnie wyższą niż w przypadku klasycznych olejów mineralnych, a ponadto wykazuje właściwości samogasnące, co znacząco zwiększa poziom bezpieczeństwa urządzenia w przypadku awarii. Dodatkową zaletą estrów jest ich szybka biodegradowalność – po ewentualnym wycieku do środowiska ulegają rozkładowi w czasie krótszym niż 28 dni.

Konstrukcja transformatora uwzględnia także technologię TXpand, której celem jest zapewnienie odporności mechanicznej obudowy na uszkodzenia i rozerwania – nawet w skrajnych warunkach eksploatacyjnych. W połączeniu z przyjaznym środowisku płynem izolacyjnym, czyni to nowe rozwiązanie firmy Hitachi istotnym krokiem w kierunku bezpieczniejszej, bardziej zrównoważonej energetyki wysokiego napięcia.

https://tiny.pl/4xsn7-59

Jakub Tyburski
jakub.tyburski@elportal.pl

eprasa.pl ef7662c802

Hity następnego numeru • „Elektronika Praktyczna” 9/2025

Temat numeru: Złącza i akcesoria

Złącza to niepozorne, lecz kluczowe elementy każdego urządzenia elektronicznego – odpowiadają za stabilność połączeń, niezawodność działania i wygodę serwisowania. Niewłaściwie dobrane mogą prowadzić do usterek, zakłóceń, a nawet uszkodzeń sprzętu.

W artykule przyglądamy się różnym typom złączy stosowanych w elektronice – od popularnych konektorów sygnałowych i zasilających, przez złącza przemysłowe, aż po specjalistyczne akcesoria montażowe. Omawiamy ich budowę, parametry elektryczne i mechaniczne, standardy kompatybilności oraz czynniki, które należy uwzględnić przy projektowaniu płytek PCB i obudów.

Nie zabraknie również praktycznych wskazówek dotyczących doboru, lutowania i zabezpieczania złączy w środowiskach narażonych na wibracje, wilgoć czy zapylenie.

Elektronika w Praktyce: Komponenty bierne pod lupą

Komponenty bierne – czyli rezystory, kondensatory i inne podzespoły, na których działanie z reguły mamy ograniczony wpływ – często nie są w centrum uwagi projektanta. Moc się zgadza, napięcie też – a więc, pozornie, nie ma się czym przejmować. Ale czy takie podejście zawsze jest słuszne?

Prawdopodobnie w 90% przypadków możemy zastosować element o odpowiednich wartościach (rezystancji lub pojemności), nie zastanawiając się dłużej. Jednak pozostałe 10% bywa kluczowe. Pominięcie specyficznych właściwości może skutkować tym, że układ będzie działał w sposób całkowicie odmienny od zamierzonego:

- niewłaściwe pasmo przenoszenia,
- dziwny szum na wyjściu,
- trzaski w sygnale,
- czy uporczywy przydźwięk 50 Hz, którego nie da się usunąć, mimo zastosowania ekranów i filtrów.

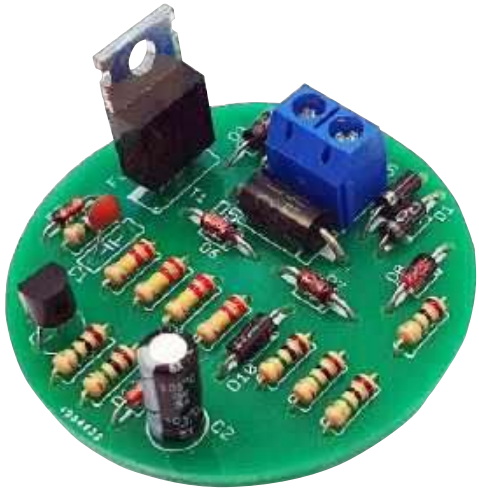
W artykule zwracamy uwagę na te „niedopowiedziane 10%”, które nierzadko decydują o powodzeniu całego projektu.

Projekt: Opóźniacz wyłączenia światła

Każdy doskonale wie, jak działa wyłącznik światła: w jednej pozycji klawisza światło świeci, w drugiej nie. Jeden ruch ręką pozwala natychmiastowo zmienić bieżący stan na przeciwny. Niekiedy jednak przydałoby się wprowadzić pewne opóźnienie przy wyłączaniu źródła lampy, aby można było np. włożyć klucz do zamka i swobodnie go przekręcić, bez robienia tego po omacku lub przy świetle latarki trzymanej w zębach. Ten prosty i tani układ umożliwia wprowadzenie takiej zwłoki w obwodach z nowoczesnymi źródłami światła.

Najważniejsze parametry:

- opóźnienie wyłączenia obciążenia o około 50…90 sekund,
- prosta instalacja: układ podłącza się równolegle do styków przełącznika sieciowego,
- możliwość instalacji w typowej puszce podtynkowej,
- przystosowany do napięcia przemiennego 50 Hz o wartości skutecznej 230 V,
- współpraca z obciążeniem o mocy z przedziału 2…30 W, najlepiej lampą LED.



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

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, 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

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 ef7662c802

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

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

BESTSELLERY sklepu AVT – sklep.avt.pl

Mikroskopy cyfrowe dla elektroników

Rabat dla Czytelników EP
przy zakupie podaj kod **EP2505MC** **–3%**

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

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

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

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

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